

ОРИГИНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Научная статья

УДК 612.82

doi: <https://doi.org/10.19163/1994-9480-2025-22-4-122-128>

Элементный статус как фактор индивидуализации церебрального метаболизма

Ю.А. Шатыр¹, М.А. Кунавин², И.В. Улесикова¹, Ю.А. Емельянов¹, А.И. Перепелкин³✉, А.Б. Мулик¹

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

² Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

³ Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия

Аннотация. Цель работы – выявить связи содержания в организме человека биологически значимых микро- и макроэлементов с выраженностью стандартных показателей fNIRS. **Методика исследования.** В исследовании приняли участие студенты государственных вузов, коренные жители трех регионов европейской части России: Архангельской и Волгоградской областей, Республики Крым в возрасте 18–25 лет, всего 49 мужчин и 51 женщина. Элементный статус испытуемых оценивался по содержанию в пробах волос биологически значимых микро- и макроэлементов (Al, As, B, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, I, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Se, Si, Sn, V, Zn). Химический анализ биологического материала выполнялся стандартными методами атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой в АНО «Центр биотической медицины» (Москва). Для оценки гемодинамического отвeta коры головного мозга в ближнем инфракрасном диапазоне применяли прибор Cortivision Poton Cap C20 (Cortivision, Польша), укомплектованный 20 оптодами (10 источников и 10 детекторов) с частотой дискретизации 7,8125 Гц. Статистическая обработка результатов была выполнена в программе SPSS для Windows (ver. 20). **Результаты исследования.** Полученные результаты показали, что концентрация гемоглобина в циркуляторном русле головного мозга, отражающая общий уровень активации метаболических процессов, прямо связана с содержанием основных катионных макроэлементов (Na, K, Ca, Mg), и обратно связана с содержанием тяжелых металлов и токсикантов (Pb, Hg, Sn, As, Ni). **Заключение.** Представленные данные обусловливают необходимость дальнейшей разработки вопросов индивидуализации церебрального метаболизма с учетом элементного статуса организма, особенно в отношении лиц с кардиометаболическими и нейрокогнитивными нарушениями. Кроме этого, определяется перспективность широкого внедрения функциональной ближней инфракрасной спектроскопии в исследовательскую деятельность и клиническую практику, как простой и эффективной методики нейровизуализации функций мозга.

Ключевые слова: церебральный гомеостаз, макроэлементы, микроэлементы, элементный статус, fNIRS

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

ORIGINAL RESEARCHES

Original article

doi: <https://doi.org/10.19163/1994-9480-2025-22-4-122-128>

Elemental status as a factor in individualization of cerebral metabolism

Yu.A. Shatyr¹, M. A. Kunavin², I.V. Ulesikova¹, Yu.A. Emelianov¹, A.I. Perepelkin³✉, A.B. Mulik¹

¹ S.M. Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia

² Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

³ Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia

Abstract. The aim of the study was to identify associations between the levels of biologically significant micro- and macroelements in the human body and the expression of standard fNIRS indicators. **Research methodology:** The study involved students from state universities, native residents of three regions of the European part of Russia: Arkhangelsk and Volgograd Oblasts, and the Republic of Crimea, aged 18–25 years (49 men and 51 women). The elemental status of the subjects was assessed based on the content of biologically significant micro- and macroelements (Al, As, B, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, I, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Se, Si, Sn, V, Zn) in hair samples. Chemical analysis of the biological material was performed using standard methods of inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy at the ANO Center for Biotic Medicine (Moscow). To assess the hemodynamic response of the cerebral cortex in the near infrared range, a Cortivision Poton Cap C20 device (Cortivision, Poland) equipped with 20 optodes (10 sources and 10 detectors) with a sampling frequency of 7.8125 Hz was used. Statistical processing of the results was performed in SPSS for Windows (ver. 20). **The results of the study:** The obtained results showed that hemoglobin concentration in the cerebral circulation, reflecting the overall level of metabolic activation, is directly related to the content of essential cationic macronutrients (Na, K, Ca, Mg) and inversely related to the content of heavy metals and toxicants (Pb, Hg, Sn, As, Ni). **Conclusion:** These data necessitate further development of individualized cerebral metabolism based on the body's elemental status, particularly for individuals with cardiometabolic and neurocognitive disorders. Furthermore, the potential for widespread implementation of functional near-infrared spectroscopy in research and clinical practice as a simple and effective method for neuroimaging brain function is demonstrated.

Keywords: cerebral homeostasis, macronutrients, micronutrients, elemental status, fNIRS

Funding. This work was conducted as part of the research and development program under the Priority 2030 academic strategic leadership program.

В организме человека присутствует множество химических элементов, уровень и соотношение которых в совокупности определяют обмен веществ, процессы роста и развития, функциональное состояние, защитные возможности организма, включая его адаптационный потенциал. Баланс микро- и макроэлементов является одним из основных факторов индивидуализации церебрального метаболизма. Химические элементы участвуют в регуляции энергетических и пластических процессов в нервной ткани, их содержание и соотношение оказывают влияние на функционирование мозга. Основные исследования в этом направлении распространяются на ограниченный ряд биологически значимых макро- и микроэлементов. Известно, что магний, натрий, калий, кальций влияют на работу кровеносных сосудов мозга. Кроме этого, магний предотвращает поражения белого вещества головного мозга, сохраняя его функциональный потенциал, участвует в регуляции обмена веществ и поддержании гомеостаза в головном мозге, где он регулирует передачу нервных сигналов и обеспечивает целостность гематоэнцефалического барьера [1]. Дефицит железа, йода, меди и цинка вызывает как нейроанатомические (дегенерация нейронов), нейрохимические (изменение синтеза нейропередатчиков, рецепторов), так и нейрофизиологические (изменение метаболизма и прохождения сигналов по проводящим путям) нарушения [2]. В то же время избыток цинка, железа и меди провоцирует митохондриальную дисфункцию, нарушение кальциевого гомеостаза в нейронах, накопление поврежденных молекул, нарушение репарации ДНК, снижение нейрогенеза и нарушение энергетического метаболизма [3]. Образцы тканей из разных областей мозга у жертв самоубийств отличались повышенным содержанием железа, меди, фосфора и серебра [4]. Негативное влияние на развивающиеся нейроны оказывают ртуть, никель и марганец [3].

Представленные результаты, отражающие конечные эффекты влияния химических элементов на церебральный гомеостаз, тем не менее, не раскрывают в достаточной мере особенностей организации метаболической активности нервных тканей различных областей головного мозга в зависимости от элементного статуса конкретного организма. Такого рода знания открывают возможности регулирования церебрального метаболизма путем коррекции содержания химических элементов в организме человека, что позволяет не только предотвращать вероятные нарушения здоровья, но и модулировать желательные нейрофизиологические состояния центральной нервной системы.

Для изучения влияния биологически значимых химических элементов на церебральный метаболизм существует два наиболее эффективных неинвазивных метода функциональной нейровизуализации: электроэнцефалография (ЭЭГ) и функциональная ближняя

инфракрасная спектроскопия (fNIRS). ЭЭГ имеет лучшее временное, но низкое пространственное разрешение, а fNIRS, напротив, обеспечивает лучшее пространственное разрешение, но имеет низкое временное разрешение [5]. Поскольку в изучаемом вопросе требуется объективно оценить выраженность и локализацию метаболической активности тканей головного мозга в состоянии покоя, fNIRS является наиболее оптимальным инструментом для решения этой задачи.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Выявить связи содержания в организме человека биологически значимых микро- и макроэлементов с выраженностю стандартных показателей fNIRS.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования были отобраны студенты государственных вузов, коренные жители трех регионов европейской части России: Архангельской (16 мужчин 20,1 (SD 1,82) года и 17 женщин 18,8 (SD 1,48) года, Волгоградской (16 мужчин 20,4 (SD 2,44) года и 17 женщин 19,8 (SD 1,56) года) областей и Республики Крым (17 мужчин 19,3 (SD 1,26) года и 17 женщин 19,9 (SD 2,59) года), всего 49 мужчин и 51 женщина. Условием включения студентов в выборочную совокупность являлось: 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. Все работы выполнялись в соответствии с принципами Всеобщей декларации о биоэтике и правах человека, в части статей 4 (благо и вред), 5 (самостоятельность и индивидуальная ответственность), 6 (согласие) и 9 (неприкосновенность частной жизни и конфиденциальность). Исследование было одобрено Этическим комитетом при Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова (Санкт-Петербург, Россия), протокол № 295 от 22.10.2024 г.

Элементный статус испытуемых оценивался по содержанию в пробах волос биологически значимых микро- и макроэлементов (Al, As, B, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, I, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Se, Si, Sn, V, Zn). Химический анализ биологического материала выполнялся стандартными методами атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанный плазмой в АНО «Центр биотической медицины» (Москва).

Для оценки активности мозговой деятельности применяли прибор Cortivision Poton Cap C20 (Cortivision, Польша). Прибор сертифицирован и соответствует требованиям технического регламента Евразийского экономического союза (ЕАЭС N RU Д-PL.RA03.B.20841/21 от 03.12.2021 г., срок действия – до 02.12.2026 г.). Cortivision Poton Cap C20

укомплектован 20 оптодами (10 источников и 10 детекторов) с частотой дискретизации 7,8125 Гц. Оптоды неинвазивно фиксируются на голове обследуемого путем применения эластичной шапочки Easycap. Схема распределения оптодов была отработана в ранее выполненном собственном исследовании [6]. 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); еще 2 пары оптодов были размещены для исследования префронтальной области коры (AF3 и AF4) (табл.).

Схема отведения оптодов функциональной ближней инфракрасной спектроскопии

Номер канала	Тип датчика	Соответствие датчика отведенийм 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	O1	Левая затылочная кора
	Детектор	OL1h	
10	Источник	O2	Правая затылочная кора
	Детектор	OL2h	

Исследование fNIRS выполнялось в течение 30 секунд, испытуемые находились в положении сидя в удобной для себя позе с открытыми глазами.

Для последующего анализа данных учитывали среднеарифметические значения показателей концентрации оксигенированного (HbO) и деоксигенированного (HbR) гемоглобина (ммоль/л).

На этапе статистического анализа данных производился расчет коэффициентов корреляции r -Пирсона

между показателями fNIRS и концентрацией биологически значимых химических элементов в пробах волос. Полученная корреляционная матрица служила основой для выполнения иерархического кластерного анализа, в результате которого была построена дендрограмма, группирующая различные макро- и микроэлементы на основании сходства их корреляционных паттернов. Кластеризация элементов и построение дендрограммы выполнялась в среде разработки Spyder с использованием пакетов Pandas и Seaborn, выделение кластеров осуществлялось с применением метода самого дальнего соседа. Статистически значимыми считались корреляции при $p < 0,05$, значения p в диапазоне от 0,05 до 0,1 рассматривались как тенденция к статистической значимости.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Предпринятое исследование выявило наличие средних по силе связей между концентрацией некоторых биологически значимых химических элементов в пробах волос и уровнями HbO и HbR в различных отделах головного мозга испытуемых (рис.).

Все анализируемые химические элементы разделились на два больших кластера, в зависимости от преобладания положительных или отрицательных корреляционных связей с показателями fNIRS. В первый кластер, характеризующийся прямыми связями с уровнем гемоглобина в лобных и теменно-затылочных отделах головного мозга, вошло 12 химических элементов, среди которых натрий, калий, кальций и магний, относящиеся к категории макроэлементов; железо, кобальт и йод, входящие в группу эссенциальных микроэлементов; а также кадмий, бериллий и алюминий, которые могут рассматриваться как токсичные или условно токсичные элементы.

В основе выявленных положительных корреляций могут лежать различные аспекты нейрогуморального баланса, которые находят свое отражение в изменении сигнала fNIRS. Наиболее естественным образом они могут быть связаны с общей концентрацией гемоглобина в крови, соотношением окси- и карбогемоглобина. Косвенно, они могут отражать метаболическую активность тканей головного мозга, а на системном уровне зависеть от характера регуляции сосудистого тонуса, работы сердца и общей активности обменных процессов в организме человека. В каждом из этих случаев положительная связь с концентрацией химического элемента указывает на его роль в активации соответствующих метаболических путей и реакций. Так, прямые корреляции с содержанием в организме железа могут быть с одной стороны транспортированы через его участие в синтезе гема и ключевую роль в транспорте дыхательных газов; с другой стороны, на системном уровне, железо является важным активатором клеточного метаболизма, вовлекаясь в реакции расщепления жирных кислот и синтеза АТФ в митохондриях.

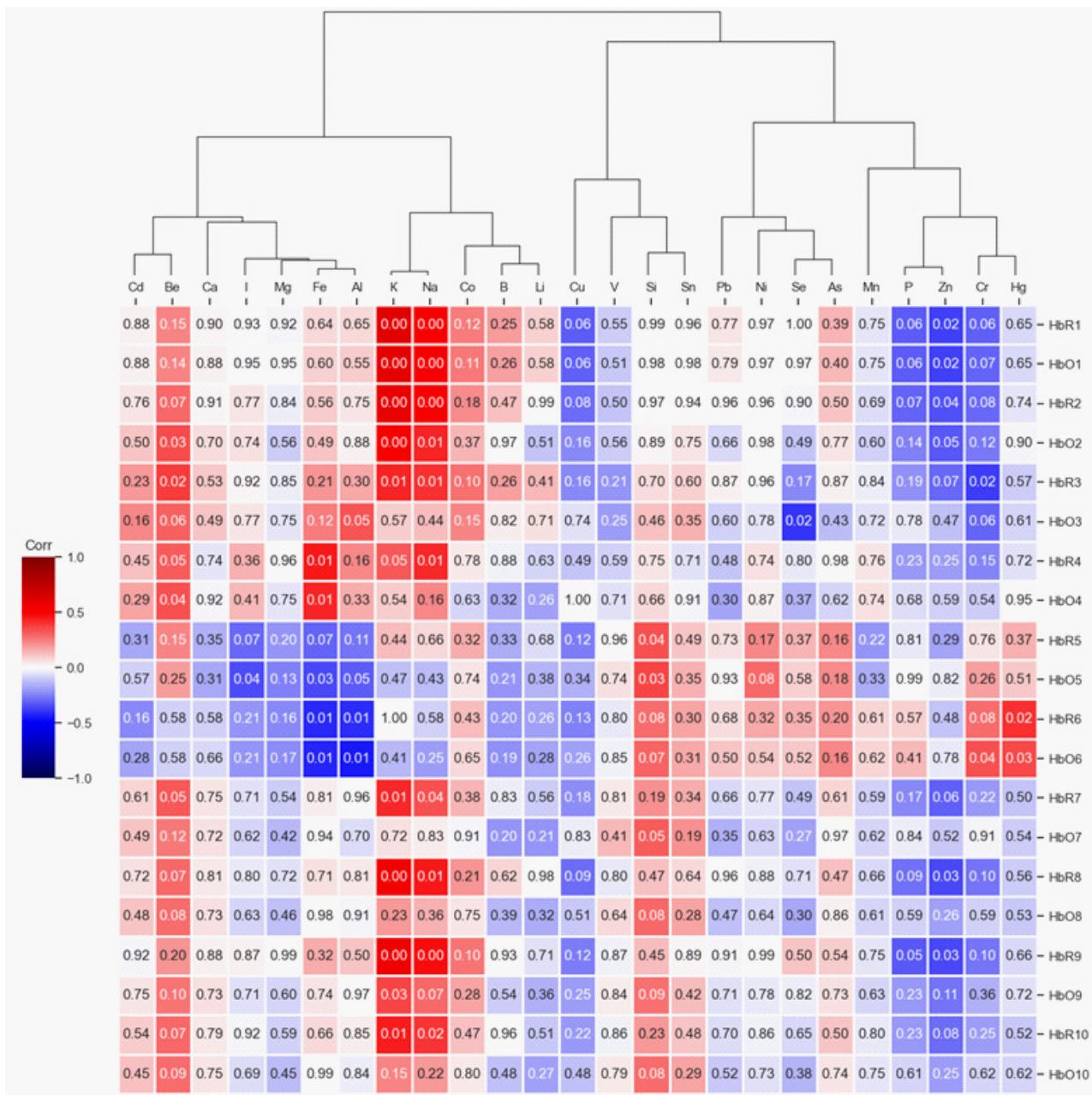


Рис. Результаты иерархического кластерного анализа, основанного на корреляционных связях концентрации биологически значимых химических элементов в пробах волос с показателями fNIRS. Тепловая карта демонстрирует силу и направленность корреляций, в ячейках указаны уровни значимости корреляционных связей.

Дендрограмма группирует химические элементы на основании сходства их корреляционных паттернов

Наибольшее количество статистически значимых положительных корреляций, а также их наибольшая сила ($r = 0,33\text{--}0,6$) были получены для концентраций натрия и калия. Натрий и калий являются одними из основных макроэлементов организма. Они задействованы в формировании электролитного баланса внутриклеточной и межклеточной среды, являются важнейшими осмотически активными элементами, вносящими свой вклад, в том числе и в поддержание артериального давления. Возбудимость нервной ткани,

формирование потенциалов покоя и потенциалов действия нейронов осуществляется благодаря перераспределению ионов натрия и калия, функционированию трансмембранных натрий-калиевых насосов. При этом важно подчеркнуть, что концентрация этих элементов во внутренних средах организма жестко регулируется различными буферными системами по причине их жизненно важной роли в поддержании общего гомеостаза. Так же содержание в крови натрия и калия не может рассматриваться в качестве универсального

индикатора, отражающего их общее количество в организме. В то же время химический состав волос в большей степени коррелирует с элементным профилем внутренней среды человека, а значит является более информативным методом оценки обеспеченности организма данными макроэлементами и их связи с общим уровнем метаболизма в период 3–6 месяцев, предшествующих забору проб. Максимально выраженные положительные связи содержания натрия и калия с показателями fNIRS выявлены в отношении правой и левой лобной, затылочной и теменной коры, причем по третьему, четвертому, седьмому, восьмому, девятому и десятому каналу данные связи актуализированы только для деоксигенированного гемоглобина. Последнее может свидетельствовать о том, что повышенное содержание натрия и калия способствует функциональной активации переднелобных, теменных и затылочных долей головного мозга за счет усиленного кислородного метаболизма, который приводит к превращению оху-Hb в deoxy-Hb.

В общий кластер с калием и натрием оказались включены также кальций и магний, макроэлементы, известные своей ролью универсальных активаторов метаболических процессов. Особенно важна в этом контексте роль кальция, вовлеченного в регуляцию работы как сердечно-сосудистой, так и нервной системы. Хорошо известно, что трансмембранный потенциал кальция поддерживает сократимость сердечной мышцы и регулирует ритм сердечных сокращений. Выброс нейромедиаторов при синаптической передаче внутри ЦНС и за ее пределами также осуществляется с вовлечением в эти процессы ионов кальция. Таким образом, обнаруженные корреляционные связи между основными катионными макроэлементами и параметрами fNIRS могут одновременно отражать и общую активность нейронного субстрата головного мозга, и активность системы регуляции сердечно-сосудистого тонуса.

Включение йода в общий кластер с кальцием и магнием также подчеркивает его схожую роль в активации процессов нейрогуморального баланса. Йод принимает участие в синтезе тиреоидных гормонов, регулирующих общую скорость метаболических процессов на уровне ядерного аппарата клетки. Нарушения баланса йода, гипо- и гипертиреозы приводят к появлению сложного симптомокомплекса, в том числе со стороны сердечно-сосудистой и нервной системы.

Прямые корреляционные связи показателей fNIRS с концентрацией ряда токсичных элементов (в особенности с кадмием и бериллием), которые также вошли в один кластер с катионными макроэлементами, тоже могут объясняться активационными процессами, которые в этом случае могут иметь компенсаторный характер. Данные микроэлементы являются классическими индустриальными загрязнителями и могут

поступать в организм через вдыхание атмосферной пыли, выхлопных газов и табачного дыма. Существуют исследования, показывающие, что проживание в условиях с повышенной нагрузкой кадмия характеризуется более высокими значениями индекса напряжения сердечно-сосудистой системы, что проявляется в больших значениях частоты сердечных сокращений и меньшей вариабельности сердечного ритма по сравнению с аналогичными показателями у лиц, проживающих в экологически благополучных регионах по уровню загрязнения кадмием [7]. Накопление бериллия, напротив, обычно оказывается на дыхательной функции, снижая качество диффузии кислорода и углекислого газа в альвеолярной системе легких. В таких условиях прямая корреляция между уровнем бериллия и концентрациями гемоглобина может объясняться компенсаторным увеличением кислородной емкости крови.

Другой кластер (13 химических элементов), сформированный на основе анализа корреляционной матрицы, характеризуется значительным количеством отрицательных связей между показателями fNIRS и содержанием различных химических элементов в пробах волос. В него вошло существенно большее количество тяжелых металлов (свинец, ртуть, олово), а также других элементов с выраженным токсическим действием, часто связанных с промышленными загрязнениями (никель, мышьяк, ванадий). Этот кластер практически не представлен макроэлементами (за исключением фосфора), но содержит ряд микроэлементов, играющих важную роль в системе антиоксидантной защиты (селен, цинк, хром).

Следует предположить, что объединение в одном кластере токсикантов и эссенциальных микроэлементов системы антиоксидантной защиты может быть связано с их антагонизмом. Так, в частности, в настоящее время доказано, что селен является важным фактором снижения токсического действия мышьяка. Этот эффект селена может реализовываться несколькими путями: через образование биологически инертных комплексов с мышьяком и/или посредством действия антиоксидантных ферментов, чей синтез находится в зависимости от концентрации селена. Аналогичные механизмы защиты могут реализовываться и в отношении цинка. Кроме того, цинк известен своей регулирующей ролью в процессах вазоконстрикции и вазодилатации, однако направленность этих влияний разнородна. Существуют свидетельства, указывающие как на прямые, так и на обратные связи между обеспеченностью организма цинком и показателями сердечно-сосудистого тонуса [8]. Дополнительно, включение определенных эссенциальных микроэлементов в отрицательный кластер может быть связано с антагонизмом их метаболизма по отношению к элементам из положительного кластера. Например, для меди получены данные, показывающие обратную зависимость ее содержания от содержания железа [9].

Отдельным моментом, требующим осмысления, является проявление разнонаправленных корреляционных связей содержания одних и тех же химических элементов с концентрацией HbO и HbR в различных долях головного мозга. Так, отнесенные к первому кластеру алюминий, железо и йод проявляют отрицательные связи с концентрацией HbO и HbR в височных долях, на фоне положительных связей с показателями fNIRS в переднелобных долях головного мозга. Напротив, хром и ртуть, отнесенные ко второму кластеру, характеризуются прямыми связями с концентрацией HbO и HbR в височных долях, на фоне обратных связей с показателями fNIRS в лобных, теменных и затылочных долях головного мозга. Только в височных долях наблюдается диаметрально противоположная направленность связи содержания некоторых химических элементов с показателями fNIRS, по отношению к связи этих же химических элементов с показателями fNIRS в лобных, теменных и затылочных отведениях. Данный феномен требует дальнейшего изучения нейроанатомических, нейрохимических и нейрофункциональных взаимосвязей различных долей коры головного мозга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный корреляционный анализ элементного состава волос и показателей fNIRS выявил сложную систему связей, кластеризация которых позволила определить общие закономерности, указывающие на роль различных биологически активных макро- и микроэлементов в регуляции системы кровоснабжения корковых отделов ЦНС. Полученные результаты показали, что концентрация гемоглобина в циркуляторном русле головного мозга, отражающая общий уровень активации метаболических процессов, прямо связана с содержанием основных катионных макроэлементов (Na, K, Ca, Mg), и обратно связана с содержанием тяжелых металлов и токсикантов (Pb, Hg, Sn, As, Ni). Выявлены проблемные для осмысления позиции, связанные с разнонаправленностью связи содержания некоторых химических элементов с показателями fNIRS в височных долях, по отношению к связи этих же химических элементов с показателями fNIRS в лобных, теменных и затылочных отведениях. Представленные данные обуславливают необходимость дальнейшей разработки вопросов индивидуализации церебрального метаболизма с учетом элементного статуса организма, особенно в отношении лиц с кардиометаболическими и нейрокогнитивными нарушениями. Кроме этого, определяется перспективность широкого внедрения функциональной ближней инфракрасной спектроскопии в исследовательскую деятельность и клиническую практику как простой и эффективной методики нейровизуализации функций мозга.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Alateeq K., Walsh E.I., Cherbuin N. Dietary magnesium intake is related to larger brain volumes and lower white matter lesions with notable sex differences. *European Journal of Clinical Nutrition*. 2023;62(5):2039–2051. doi: 10.1007/s00394-023-03123-x.
2. Cusick S.E., Barks A., Georgieff M.K. Nutrition and Brain Development. *Current topics in behavioral neurosciences*. 2022;53:131–165. doi: 10.1007/7854_2021_244.
3. Ijomone O.M., Ifenatuoha C.W., Aluko O.M., Ijomone O.K., Aschner M. The aging brain: impact of heavy metal neurotoxicity. *Critical reviews in toxicology*. 2020;50(9):801–814. doi: 10.1080/10408444.2020.1838441.
4. Baj J., Forma A., Karakula K., Flieger W., Flieger M., Kowalska B. et al. Changes in the distribution of elements in the liver and various brain regions in suicides from southeastern Poland. *Scientific reports*. 2025;15(1):18946. doi: 10.1038/s41598-025-03283-2.
5. Li R., Yang D., Fang F., Hong K.-S., Reiss A.L., Zhang Y. Concurrent fNIRS and EEG for BrainFunction Investigation: A Systematic, Methodology-Focused Review. *Sensors*. 2022;22:5865. doi: 10.3390/s22155865.
6. Мулик А.Б., Улесикова И.В., Назаров Н.О., Кунавин М.А., Соловьев 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;31(11):807–818. doi: 10.17816/humeco643398.
7. Губарева Л.И., Ермоленко Г.В., Агаркова Е.В., Ермолова Л.С. Адаптационные изменения сердечно-сосудистой системы подростков при микроэлементозах, обусловленных химическим загрязнением окружающей среды. *Вестник Адыгейского государственного университета*. Серия: естественно-математические и технические науки. 2012;4(110):93–105.
8. Knez M., Glibetic M. Zinc as a Biomarker of Cardiovascular Health. *Frontiers in nutrition*. 2021;8:686078. doi: 10.3389/fnut.2021.686078.
9. Левина А.А., Цибульская М.М., Минина Л.Т., Цветаева Н.В. Соотношение между основными микроэлементами (Fe, Cu, Zn) при анемиях различной этиологии. *Клиническая лабораторная диагностика*. 2013;7:45–48.

REFERENCES

1. Alateeq K., Walsh E.I., Cherbuin N. Dietary magnesium intake is related to larger brain volumes and lower white matter lesions with notable sex differences. *European Journal of Clinical Nutrition*. 2023;62(5):2039–2051. doi: 10.1007/s00394-023-03123-x.
2. Cusick S.E., Barks A., Georgieff M.K. Nutrition and Brain Development. *Current topics in behavioral neurosciences*. 2022;53:131–165. doi: 10.1007/7854_2021_244.
3. Ijomone O.M., Ifenatuoha C.W., Aluko O.M., Ijomone O.K., Aschner M. The aging brain: impact of heavy metal neurotoxicity. *Critical reviews in toxicology*. 2020;50(9):801–814. doi: 10.1080/10408444.2020.1838441.

4. Baj J., Forma A., Karakuła K., Flieger W., Flieger M., Kowalska B. et al. Changes in the distribution of elements in the liver and various brain regions in suicides from southeastern Poland. *Scientific reports.* 2025;15(1):18946. doi: 10.1038/s41598-025-03283-2.
5. Li R., Yang D., Fang F., Hong K.-S., Reiss A.L., Zhang Y. Concurrent fNIRS and EEG for BrainFunction Investigation: A Systematic, Methodology-Focused Review. *Sensors.* 2022;22:5865. doi: 10.3390/s22155865.
6. Mulik A.B., Ulesikova I.V., Nazarov N.O., Kunavin M.A., Solovyov A.G., Shatyr Yu.A. 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. (In Russ.) doi: 10.17816/humeco643398.
7. Gubareva L.I., Ermolenko G.V., Agarkova E.V., Ermolova L.S. Adaptation of the cardiovascular system of adolescents with microelementoses resulting from chemical pollution. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Yestestvenno-matematicheskiye i tekhnicheskiye nauki = The Bulletin of Adyge State University: Internet Scientific Journal.* 2012;4(11):93–105. (In Russ.).
8. Knez M., Glibetic M. Zinc as a Biomarker of Cardiovascular Health. *Frontiers in nutrition.* 2021;8:686078. doi: 10.3389/fnut.2021.686078.
9. Levina A.A., Tsibulskaya M.M., Minina L.T., Tsvetaeva N.V. The ratio between the main microelements (Fe, Cu, Zn) in anemias of various etiologies. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika = Russian Clinical Laboratory Diagnostics.* 2013;7:45–48. (In Russ.).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Этические требования соблюдены. Текст не сгенерирован нейросетью.

Информация об авторах

Юлия Александровна Шатыр – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела медико-биологических исследований научно-исследовательского центра, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия; yuliashatyr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9279-5282>

Михаил Алексеевич Кунавин – кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии человека и биотехнических систем Высшей школы естественных наук и технологий, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия; m.kunavin@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7948-1043>

Ирина Владимировна Улесикова – кандидат биологических наук, научный сотрудник научно-исследовательского отдела обитаемости научно-исследовательского центра, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия; ulesikovairina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9284-3280>

Юрий Александрович Емельянов – кандидат медицинских наук, научный сотрудник научно-исследовательского отдела обитаемости научно-исследовательского центра, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия; volandgm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4803-3517>

Андрей Иванович Перепелкин – доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой детской хирургии, Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия; similipol@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5964-3033>

Александр Борисович Мулик – доктор биологических наук, профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела медико-психологического сопровождения научно-исследовательского центра, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия; mulik-ab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6472-839X>

Статья поступила в редакцию 30.09.2025; одобрена после рецензирования 17.11.2025; принята к публикации 18.11.2025.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.
Ethical requirements are met. The text is not generated by a neural network.

Information about the authors

Yulia A. Shatyr – Candidate of Biological Sciences, Docent, Senior Researcher, Research Department of Medical and Biological, Research Center, S.M. Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg, Russia; yuliashatyr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9279-5282>

Mikhail A. Kunavin – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Human Biology and Biotechnical Systems, Higher School of Natural Sciences and Technologies, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia; m.kunavin@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7948-1043>

Irina V. Ulesikova – Candidate of Biological Sciences, Researcher, Research Department of Habitability, Research Center, S.M. Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg, Russia; ulesikovairina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9284-3280>

Yuri A. Emelianov – Candidate of Medical Sciences, Researcher, Research Department of Habitability, Research Center, S.M. Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg, Russia; volandgm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4803-3517>

Andrey I. Perepelkin – Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of Pediatric Surgery Department, Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia; similipol@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5964-3033>

Alexander B. Mulik – Doctor of Biological Sciences, Professor, Senior Researcher, Research Department of Medical and Psychological Support, Research Center, S.M. Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg, Russia; mulik-ab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6472-839X>

The article was submitted 30.09.2025; approved after reviewing 17.11.2025; accepted for publication 18.11.2025.