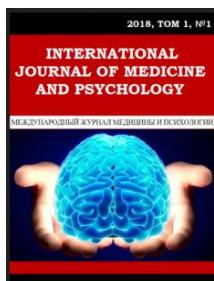


# МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ



Научно-исследовательский журнал «*International Journal of Medicine and Psychology / Международный журнал медицины и психологии*»

<https://ijmp.ru>

2025, Том 8, № 1 / 2025, Vol. 8, Iss. 1 <https://ijmp.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

Шифр научной специальности: 3.3.3. Патологическая физиология (медицинские науки)

УДК 616.831-001.34: 615.835.3

<sup>1, 2, 3</sup> Трофимов А.О.,

<sup>3, 4</sup> Еремина Н.А.,

<sup>1</sup> Трофимова К.А.,

<sup>5</sup> Калентьев Г.В.,

<sup>6, 7</sup> Брагин Д.Е.,

<sup>8</sup> Севрюков Ф.А.,

<sup>1</sup> Приволжский исследовательский медицинский университет,

<sup>2</sup> Саратовский государственный университет,

<sup>3</sup> Клиника «Персона», г. Нижний Новгород,

<sup>4</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,

<sup>5</sup> Городская клиническая больница № 10, г. Нижний Новгород,

<sup>6</sup> Медицинская Школа Университета Нью-Мексико, Альбукерке, США,

<sup>7</sup> Институт Биомедицинских Исследований Лавлейса, Альбукерке, Нью-Мексико, США,

<sup>8</sup> Приволжский исследовательский медицинский университет

## Сопоставление кислородного статуса и показателей айтреクリнга при легкой изолированной черепно-мозговой травме: предварительное исследование

**Аннотация:** целью данного исследования была оценка взаимосвязи между окуломоторными синергиями и статусом кислорода в мозге при легкой черепно-мозговой травме (ЛЧМТ) с использованием одновременного сравнения параметров айтреクリнга (АТ) и насыщения мозга кислородом.

Материалы и методы. Нерандомизированное одноцентровое проспективное исследование включало 77 пациентов с ЛЧМТ (средний возраст составил  $36,3 \pm 4,8$  года, 48 мужчин, 29 женщин, медиана Шкалы комы Глазго  $13,7 \pm 0,7$ ). Церебральная оксиметрия использовалась для определения уровня насыщения кислородом ( $SctO_2$ ) в области полюса лобной доли (ПЛД). Движения глаз измерялись одновременно с помощью EyeTracker. Расчетными параметрами были: вертикальная и горизонтальная угловая скорость глазного яблока (УС); левая вертикальная угловая скорость (ЛВУС); правая вертикальная угловая скорость (ПВУС); левая горизонтальная угловая скорость (ЛГУС); и правая горизонтальная угловая скорость (ПГУС). Индексы реактивности вертикальной и горизонтальной глазной вергенции (vergence reactivity index – VRx) рассчитывались как коэффициент корреляции Пирсона между соответствующими угловыми скоростями правого и левого глаза. Уровень значимости была установлена на уровне  $p < 0,05$ . Результаты.  $SctO_2$  в лобной области варьировалась от 62% до 79. Средние значения  $SctO_2$  составили  $69,26 \pm 6,96\%$  по сравнению с левым ПЛД и  $70,25 \pm 7,58\%$  по сравнению с правым ПЛД ( $p = 0,40$ ). Общий анализ данных отслеживания глаз выявил следующие значения параметров взгляда: ЛВУС –  $0,327 \pm 0,263$  рад/сек; ЛГУС –  $0,201 \pm 0,164$  рад/сек; ПВУС –  $0,361 \pm 0,269$  рад/сек; и ПГУС –  $0,197 \pm 0,124$  рад/сек. Расчетный индекс реактивности вертикальной вергенции (VVx) составил  $0,80 \pm 0,12$ . Расчетный индекс реактивности горизонтальной вергенции (HVx) составил  $0,82 \pm 0,11$ . VVx и HVx коррелировали с уровнями  $SctO_2$  в соответствующем ПЛД ( $p=0,038$ ;  $r=0,235$ ;  $p=0,048$ ;  $r=0,218$ , соответственно,  $p=0,035$ ;  $r=0,241$ ;  $p=0,039$ ;  $r=0,235$ , соответственно). Выводы. VVx и HVx коррелируют с уровнем  $SctO_2$  в ПЛД ( $p<0,01$ ) при ЛЧМТ. Не обнаружено значимой корреляции между уровнем  $SctO_2$  и вертикальным и горизонтальным угловыми скоростями глазных яблок. АТ может помочь количественно оценить тяжесть нарушений содружественности движений глаз после ЛЧМТ, а также изучить вклад, который нарушения церебрального кислородного статуса вносят в этот процесс.

**Ключевые слова:** айтреクリнг, церебральная спектроскопия, легкая черепно-мозговая травма

**Для цитирования:** Трофимов А.О., Еремина Н.А., Трофимова К.А., Калентев Г.В., Брагин Д.Е., Севрюков Ф.А. Сопоставление кислородного статуса и показателей айтреккинга при легкой изолированной черепно-мозговой травме: предварительное исследование // International Journal of Medicine and Psychology. 2025. Том 8. № 1. С. 5 – 11.

Поступила в редакцию: 16 октября 2024 г.; Одобрена после рецензирования: 15 декабря 2024 г.; Принята к публикации: 10 февраля 2025 г.

<sup>1, 2, 3</sup> **Trofimov A.O.,**

<sup>3, 4</sup> **Eremina N.A.,**

<sup>1</sup> **Trofimova K.A.,**

<sup>5</sup> **Kalentev G.V.,**

<sup>6, 7</sup> **Bragin D.E.,**

<sup>8</sup> **Sevryukov F.A.,**

<sup>1</sup> *Privolzhsky Research Medical University,*

<sup>2</sup> *Saratov State University,*

<sup>3</sup> *Clinic "Persona", Nizhny Novgorod,*

<sup>4</sup> *Lobachevsky State University iža Nizhny Novgorod,*

<sup>5</sup> *City Clinical Hospital №10, Nizhny Novgorod,*

<sup>6</sup> *University of New Mexico School of Medicine, Albuquerque, USA,*

<sup>7</sup> *Lovelace Biomedical Research Institute, Albuquerque, NM, USA.,*

<sup>8</sup> *Privolzhsky Research Medical University*

## **Comparison of oxygen status and eye tracking parameters in patients with mild isolated traumatic brain injury: a preliminary study**

**Abstract:** the aim of this study was to evaluate the relationship between oculomotor synergies and brain oxygen status in mild traumatic brain injury (mTBI) using a simultaneous comparison of eye tracking (ET) and cerebral oxygenation parameters. Materials and methods. This non-randomized, single-center prospective study included 77 patients with mTBI (mean age  $36.3 \pm 4.8$  years, 48 men, 29 women, median Glasgow Coma Scale  $13.7 \pm 0.7$ ). Cerebral oximetry was used to determine the oxygen saturation level (SctO<sub>2</sub>) in the frontal lobe pole region (FLP). Eye movements were measured simultaneously using EyeTracker. The calculated parameters were: vertical and horizontal angular velocity of the eyeball (VA); left vertical angular velocity (LVAV); right vertical angular velocity (RVAV); left horizontal angular velocity (LHAV); and right horizontal angular velocity (RHAV). The vertical and horizontal ocular vergence reactivity index (VRx) were calculated as the Pearson's correlation coefficient between the corresponding angular velocities of the right and left eyes. Significance was preset at  $p < 0.05$ . Results. SctO<sub>2</sub> in FLP ranged from 62% to 79. The mean SctO<sub>2</sub> values were  $69.26 \pm 6.96\%$  compared to the left FLP and  $70.25 \pm 7.58\%$  compared to the right FLP ( $p = 0.40$ ). Overall analysis of the eye tracking data revealed the following eye tracking parameter values: LVAV  $0.327 \pm 0.263$  rad/sec; LHAV  $0.201 \pm 0.164$  rad/sec; RVAV  $0.361 \pm 0.269$  rad/sec; and RHAV  $0.197 \pm 0.124$  rad/sec. The estimated vertical vergence reactivity index (VVx) was  $0.80 \pm 0.12$ . The estimated horizontal vergence reactivity index (HVx) was  $0.82 \pm 0.11$ . VVx and HVx correlated with SctO<sub>2</sub> levels in the corresponding LPD ( $p=0.038$ ;  $r=0.235$ ;  $p=0.048$ ;  $r=0.218$ , respectively,  $p=0.035$ ;  $r=0.241$ ;  $p=0.039$ ;  $r=0.235$ , respectively). Conclusions. VVx and HVx correlate with SctO<sub>2</sub> level in FLP ( $p < 0.01$ ) in mTBI. No significant correlation was found between SctO<sub>2</sub> levels and vertical and horizontal angular velocities of the eyeballs. ET may help to quantify the severity of ocular movement disturbances after mTBI and to study the contribution of cerebral oxygenation impairment to this process.

**Keywords:** eye tracking, cerebral near-infrared spectroscopy, mild traumatic brain injury

**For citation:** Trofimov A.O., Eremina N.A., Trofimova K.A., Kalentev G.V., Bragin D.E., Sevryukov F.A. Comparison of oxygen status and eye tracking parameters in patients with mild isolated traumatic brain injury: a preliminary study. International Journal of Medicine and Psychology. 2025. 8 (1). P. 5 – 11.

The article was submitted: October 16, 2024; Approved after reviewing: December 15, 2024; Accepted for publication: February 10, 2025

## Введение

Несмотря на широкое внедрение в практику современных стандартов оказания медицинской помощи и постоянное обновление клинических рекомендаций легкая черепно-мозговая травма (ЛЧМТ), по-прежнему, сопровождается большим количеством последствий. В последние годы перспективы лечения ЛЧМТ были связаны с неинвазивным изучением нарушений путей волокон белого вещества [1]. Среди этих методов наименее изученными являются окулография или айтреккинг (АТ) [2]. Айтреккинг является перспективной технологией для оценки содружественных движений глазных яблок (т.н. окуломоторной синергии) [3]. Учитывая, что тракты глазодвигательного анализатора анатомически совпадают с другими мозговыми волокнами и трактами, АТ позволяет оценить их состояние при различной патологии мозга, в том числе при черепно-мозговой травме [4]. Ранее было показано, что оксигенация мозга при черепно-мозговой травме (ЧМТ) зависит от параметров перфузии [5]. Однако значение нарушений церебральной оксигенации в генезе глазодвигательных нарушений при легкой черепно-мозговой травме (ЛЧМТ), остается неясным.

Целью нашего исследования была оценка взаимосвязи между глазодвигательными синергиями и кислородным статусом мозга при ЛЧМТ с использованием одновременного сравнения параметров АТ и насыщения мозга кислородом.

## Материалы и методы исследований

В нерандомизированное одноцентровое ретроспективное исследование, которое было одобрено Локальным этическим комитетом Приволжского исследовательского медицинского университета и соответствовало стандартам Хельсинкской декларации были включены 77 пациентов (48 мужчин, 29 женщин, все правши) в остром периоде диффузной, изолированной ЛЧМТ, находившихся на лечении в Региональном травматологическом центре 1 уровня с 1.01.2022 по 15.05.2023 г. Все пациенты были госпитализированы в первые сутки после травмы. Причина травмы головы у всех пациентов было дорожно-транспортное происшествие. Информированное согласие было получено от каждого пациента. Диагноз ЛЧМТ основывался на текущих клинических рекомендациях ассоциации нейрохирургов РФ: потеря или изменение сознания, посттравматическая амнезия, вестибулярные расстройства и т.д. [6]. Средний возраст составил  $36,3 \pm 4,8$  года (диапазон 18-61 год). Медиана ШКГ составила 14,3, рост 172,3 см и вес 78,6 кг. Все пациенты не имели офтальмологических заболеваний или травм. Падений периферической сатура-

ции не было выявлено, поэтому кислородная поддержка пациентам не проводилась.

Окуломоторные синергии непрерывно регистрировались с частотой 20 Гц в программном приложении мобильной системы отслеживания глаз (EyeTracker, BVG Software Group LLC, Нидерланды) планшета iPad Pro 2020. Во время проведения отслеживания движений глазных яблок освещение в комнате и другие электронные устройства были выключены.

Протокол включал процедуру калибровки, когда экран планшета был черным в течение 10 с, чтобы дать возможность участнику адаптироваться к исследованию. Затемнение помещения не требовалось. Разметка лица исследуемого на экране проводилась исследователем (ТАО) согласно калибровочных линий и в дальнейшем удерживалась айтреккером автоматически.

Круглый маркер (диаметром 0,3 см) перемещался по экрану случайным образом с разной скоростью, что позволяло отслеживать саккады и плавные проследования. Цвет круга менялся с белого на красный каждые 2 с, чтобы пациент мог удерживать внимание на центре круга [6].

Кадры низкого качества (с нераспознанными зрачками, с некорректируемыми смещениями лица, содержащие мигание и т.д.) исключались из расчета либо вручную, либо с помощью функции сетевого уточнения. После окончания исследования анализировались серии из 300 лучших последовательных кадров. Общая продолжительность процедуры составляла 30 с.

Автоматически айтреккером рассчитывались следующие параметры: левая вертикальная угловая скорость (ЛВУС); правая вертикальная угловая скорость (ПВУС), левая горизонтальная угловая скорость (ЛГУС) и правая горизонтальная угловая скорость (ПГУС).

Индексы вертикальной и горизонтальной вергенции глаз (vergence reactivity index – Vx) рассчитывались как коэффициент корреляции Пирсона между соответствующими угловыми скоростями правого и левого глаза.

Церебральная инфракрасная спектроскопия выполнялась одновременно с АТ при помощи пространственно-разрешенного абсолютного церебрального оксиметра Fore-Sight 2030 (CAS Medical Systems Inc., США). Она включала определение значений сатурации кислорода в мозге (SctO<sub>2</sub>) в области полюсов лобной доли (ПЛД) с помощью стандартных накожных оптодов. Усреднение значения церебральной спектроскопии производилось автоматически по принципу «секунда-за-секундой».

Нормальность распределения данных оценивалась с использованием критерия Колмогорова-Смирнова. Непрерывные переменные выражались как среднее значение  $\pm$  стандартное отклонение. Статистический анализ проводился с использованием методов непараметрической статистики корреляционного и регрессионного анализа. Уровень значимости был установлен  $p<0,05$ . Все анализы проводились с использованием пакета программного обеспечения Statistica 12.0 (TIBCO Inc., США).

### Результаты и обсуждения

Церебральная сатурация в ПЛД варьировалась в диапазоне от 61% до 89%. Средние значения SctO<sub>2</sub> составили  $69,26 \pm 6,96\%$  над левым ПЛД и  $70,25 \pm 7,58\%$  над правым ПЛД ( $p = 0,40$ ). Значения ниже ишемического порога (SctO<sub>2</sub> менее 60%)

не были выявлены ни у одного исследуемого. Общий анализ данных АТ выявил следующие значения параметров взгляда: ЛВУС –  $0,327 \pm 0,263$  рад/сек, ЛГУС –  $0,201 \pm 0,164$  рад/сек, ПВУС –  $0,361 \pm 0,269$  рад/сек и ПГУС –  $0,197 \pm 0,124$  рад/сек. Расчетный индекс реактивности вертикальной вергенции (VVx) составил  $0,80 \pm 0,12$ . Расчетный индекс реактивности горизонтальной вергенции (HVx) составил  $0,82 \pm 0,11$ .

Количественный анализ индексов вертикальной и горизонтальной глазной вергенции показал, что HVx и VVx коррелировали с уровнями церебральной сатурации в обеих ПЛД ( $p=0,036$ ;  $r=0,232$ ;  $p=0,047$ ;  $r=0,212$  соответственно, и  $p=0,033$ ;  $r=0,247$ ;  $p=0,037$ ;  $r=0,233$  соответственно) (рис. 1-2).

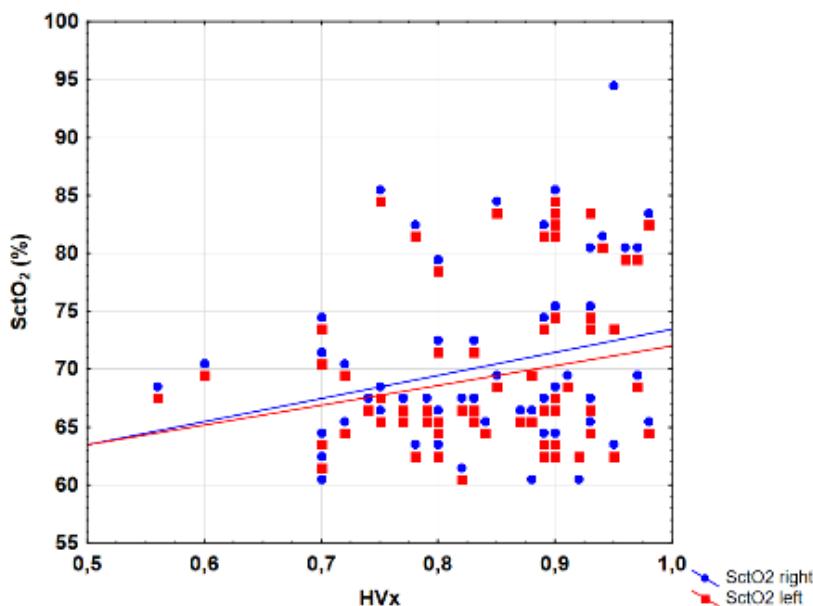


Рис. 1. Корреляция уровней церебральной оксигенации (SctO<sub>2</sub>) и индекса реактивности горизонтальной вергенции (HVx) на левой (красные квадраты) и правой стороне (голубые кружки) у пациентов с ЛЧМТ ( $r=0,232$ ,  $p=0,036$ ; и  $r=0,212$ ,  $p=0,047$ , соответственно).

Fig. 1. Correlation of cerebral oxygenation levels (SctO<sub>2</sub>) and horizontal vergence reactivity index (HVx) on the left (red squares) and right sides (blue circles) in patients with MTBI ( $r=0.232$ ,  $p=0.036$ ; and  $r=0.212$ ,  $p=0.047$ , respectively).

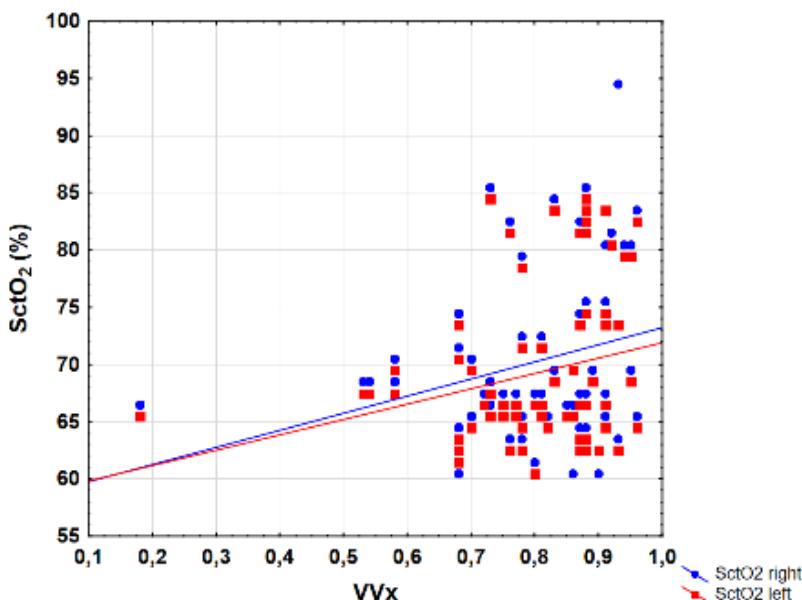


Рис. 2. Корреляция уровней церебральной оксигенации ( $SctO_2$ ) и индекса реактивности вертикальной vergенции (VVx) на левой (красные квадраты) и правой стороне (голубые кружки) у пациентов с ЛЧМТ ( $r=0,247$ ,  $p=0,033$ ; и  $r=0,233$ ,  $p=0,037$ , соответственно).

Fig. 2. Correlation of cerebral oxygenation levels ( $SctO_2$ ) and vertical vergence reactivity index (VVx) on the left (red squares) and right sides (blue circles) in patients with MTBI ( $r=0.247$ ,  $p=0.033$ ; and  $r=0.233$ ,  $p=0.037$ , respectively).

Как отмечалось ранее, АТ позволяет обнаружить и количественно оценить нарушения глазодвигательных синергий, что делает АТ перспективным инструментом для скрининговой диагностики ЛЧМТ [7].

Предыдущие исследования показали, что когнитивные тесты (например, SCAT-5) являются очень полезным инструментом для диагностики сотрясения мозга, поскольку он включает в себя физикальное обследование, оценку сознания с использованием ШКГ и ряд когнитивных и сенсомоторных тестов. Однако тест SCAT-5 довольно громоздкий и сложный. Кроме того, его нельзя использовать для оценки нарушений зрения [8].

Целью нашего исследования было оценить связь между глазодвигательными синергиями и кислородным статусом мозга при ЛЧМТ с помощью одновременного сравнения параметров АТ и насыщения мозга кислородом, оцененным при помощи церебральной инфракрасной спектроскопии.

Мы показали, что у пациентов с ЛЧМТ без очаговых повреждений мозга индексы вертикальной и горизонтальной глазной vergенции были значимо связаны с уровнями насыщения ткани мозга кислородом в обоих ПЛД.

По нашему мнению, одной из возможных причин выявленных нарушений глазодвигательных синергий при ЛЧМТ является развитие относительной гипоксии мозга вследствие нарушения церебральной ауторегуляции, что подтверждается

предыдущими исследованиями [9]. В то же время механизмы, лежащие в основе ауторегуляторной дисфункции, остаются малоизученными. Как было показано ранее, нарушения ауторегуляции при ЛЧМТ выражены меньше, чем при тяжелой ЧМТ. Возможно поэтому, несмотря на значимость корреляционных связей между VRx и  $SctO_2$ , их сила оказалась относительно слаба и не превысила 0,25 [10].

Для подтверждения нашего предположения необходимо оценить значимость и силу корреляции между VRx и церебральной сатурацией при тяжелой ЧМТ, что требует дополнительных исследований.

На основе полученных данных можно предположить, что лучшие уровни церебральной оксигенации коррелируют с наилучшим состоянием окуломоторных синергий, и наоборот, падение церебральной оксигенации приводит к нарушениям глазной vergенции. В качестве доказательства следует также отметить, что аналогичные изменения значений АТ недавно наблюдались у пациентов с COVID-19, что подтверждает наши предположения о прямой связи между глазодвигательной дисфункцией и гипоксией мозга [11]. Кроме того, недавние исследования АТ у пилотов авиации показали, что этот инструмент может быть использован для диагностики гипоксии мозга, что открывает многообещающие перспективы для его ис-

пользования при его повреждениях [12]. Вместе с тем, необходимы дальнейшие исследования.

Наше исследование имело несколько ограничений. Во-первых, серьезным ограничением нашего исследования является относительно небольшой размер когорты (77 пациентов). Во-вторых, мы не проводили лонгитюдных и повторных оценок АТ и SctO<sub>2</sub> у пациентов с ЛЧМТ, поэтому характер глазодвигательных нарушений в разные моменты времени и то, как эти дисфункции развивались остались вне фокуса исследования.

Хотя была изучена когорта с низкой возрастной гетерогенностью (что было сильной стороной исследования), остается неизвестным, как изменится зрительное восприятие после ЛЧМТ в когортах более старшего возраста. Кроме того, даже несмотря на отсутствие указаний на предшествующее повреждение головного мозга, необходимо сравнить данные трекинга и нейровизуализации.

Наконец, имеющиеся данные о гендерных различиях в зрительном восприятии требуют уточнения на более крупной гендерно сбалансированной когорте. Таким образом, необходимы дальнейшие исследования, чтобы оценить роль кислородного статуса мозга в генезе нарушений глазодвигательных синергий при легкой черепно-мозговой травме.

## Выводы

VVx и HVx коррелируют с уровнем SctO<sub>2</sub> в ПЛД ( $p<0,01$ ) при ЛЧМТ. Не обнаружено значимой корреляции между уровнем SctO<sub>2</sub> и вертикальным и горизонтальным угловыми скоростями глазных яблок. АТ может помочь количественно оценить тяжесть нарушений содружественности движений глаз после ЛЧМТ, а также изучить вклад, который нарушения церебрального кислородного статуса вносят в этот процесс.

## Финансирование

Исследование поддержано грантом РНФ 24-45-00010, ДБ был поддержан грантом NIH R01 NS112808

## Список источников

1. Astafiev S.V., Shulman G.L., Metcalf N.V. et al. Abnormal White Matter Blood-Oxygen-Level-Dependent Signals in Chronic Mild Traumatic Brain Injury // Journal of neurotrauma. 2015. № 32 (16). P. 1254 – 1271.
2. Murray N.P., Claire-Marie Roberts M.H., Tyagi A. et al. Oculomotor Training for Poor Saccades Improves Functional Vision Scores and Neurobehavioral Symptoms // Archives of Rehabilitation Research and Clinical Translation. 2021. № 3:2. P. 100126.
3. Hunfalvay M., Roberts C., Murray N. et al. Horizontal and vertical self-paced saccades as a diagnostic marker of traumatic brain injury // Concussion (London, England). 2019. № 4 (1). P. CNC60.
4. Cifu D.X., Wares J.R., Hoke K.W. et al. Differential eye movements in mild traumatic brain injury versus normal controls // J. Head Trauma Rehabil. 2015. № 30 (1). P. 21 – 28.
5. Trofimov A.O., Kalentiev G., Voennov O. et al. Comparison of Cerebral Oxygen Saturation and Cerebral Perfusion Computed Tomography in Cerebral Blood Flow in Patients with Brain Injury // Advances in experimental medicine and biology. 2016. № 876. P. 145 – 149.
6. Клинические рекомендации “Сотрясение головного мозга”. 2022. <https://ruans.org/Text/Guidelines/concussion-2022.pdf>
7. Contreras R., Ghajar J., Bahar S. et al. Effect of cognitive load on eye-target synchronization during smooth pursuit eye movement // Brain Res. 2011. № 1398 (29). P. 55 – 63.
8. Sussman E., Ho A., Pendharkar A., Ghajar J. Clinical evaluation of concussion: the evolving role of oculomotor assessments // Neurosurg. Focus. 2016. № 40 (4). P. E7.
9. Piper C., Fortune B., Cull G. et al. Basal blood flow and autoregulation changes in the optic nerve of rhesus monkeys with idiopathic bilateral optic atrophy // Investigative ophthalmology & visual science. 2013. № 54 (1). P. 714 – 721.
10. Wetzel P., Lindblad A., Mulatya C. et al. Eye tracker outcomes in a randomized trial of 40 sessions of hyperbaric oxygen or sham in participants with persistent post concussive symptoms // Undersea & hyperbaric medicine Journal of the Undersea and Hyperbaric Medical Society. 2019. Inc. № 46 (3). P. 299 – 311.
11. Wagner M., den Boer M., Jansen S. et al. Video-based reflection on neonatal interventions during COVID-19 using eye-tracking glasses: an observational study // Archives of disease in childhood. Fetal and neonatal edition. 2022. № 107 (2). P. 156 – 160.
12. Peißl S., Wickens D., Baruah R. (2018) Eye-Tracking Measures in Aviation: A Selective Literature Review // The International Journal of Aerospace Psychology. 2028. № 28 (3-4). P. 98 – 112.

## References

1. Astafiev S.V., Shulman G.L., Metcalf N.V. et al. Abnormal White Matter Blood-Oxygen-Level-Dependent Signals in Chronic Mild Traumatic Brain Injury. *Journal of neurotrauma*. 2015. No. 32 (16). P. 1254 – 1271.
2. Murray N.P., Claire-Marie Roberts M.H., Tyagi A. et al. Oculomotor Training for Poor Saccades Im-proves Functional Vision Scores and Neurobehavioral Symptoms. *Archives of Rehabilitation Research and Clinical Translation*. 2021. No. 3:2. P. 100126.
3. Hunfalvay M., Roberts C., Murray N. et al. Horizontal and vertical self-paced saccades as a diagnostic marker of traumatic brain injury. *Concussion* (London, England). 2019. No. 4 (1). P. CNC60.
4. Cifu D.X., Wares J.R., Hoke K.W. et al. Differential eye movements in mild traumatic brain injury ver-sus normal controls. *J. Head Trauma Rehabil*. 2015. No. 30 (1). P. 21 – 28.
5. Trofimov A.O., Kalentiev G., Voennov O. et al. Comparison of Cerebral Oxygen Saturation and Cere-bral Perfusion Computed Tomography in Cerebral Blood Flow in Patients with Brain Injury. *Advances in experimental medicine and biology*. 2016. No. 876. P. 145 – 149.
6. Clinical recommendations “Concussion”. 2022. <https://ruans.org/Text/Guidelines/concussion-2022.pdf>
7. Contreras R., Ghajar J., Bahar S. et al. Effect of cognitive load on eye-target synchronization during smooth pursuit eye movement. *Brain Res*. 2011. No. 1398 (29). P. 55 – 63.
8. Sussman E., Ho A., Pendharkar A., Ghajar J. Clinical evaluation of concussion: the evolving role of oculomo-tor assessments. *Neurosurg. Focus*. 2016. No. 40 (4). P. E7.
9. Piper C., Fortune B., Cull G. et al. Basal blood flow and autoregulation changes in the optic nerve of rhesus monkeys with idiopathic bilateral optic atrophy. *Investigative ophthalmology & visual science*. 2013. No. 54 (1). P. 714 – 721.
10. Wetzel P., Lindblad A., Mulatya C. et al. Eye tracker outcomes in a randomized trial of 40 sessions of hyperbaric oxygen or sham in participants with persistent post concussive symptoms. *Undersea & hyper-baric medicine Journal of the Undersea and Hyperbaric Medical Society*. 2019. Inc. № 46 (3). P. 299 – 311.
11. Wagner M., den Boer M., Jansen S. et al. Video-based reflection on neonatal interventions during COVID-19 using eye-tracking glasses: an observational study. *Archives of disease in childhood. Fetal and neonatal edition*. 2022. No. 107 (2). P. 156 – 160.
12. Peißl S., Wickens D., Baruah R. (2018) Eye-Tracking Measures in Aviation: A Selective Literature Review. *The International Journal of Aerospace Psychology*. 2028. No. 28 (3-4). P. 98 – 112.

## Информация об авторах

**Трофимов А.О.**, Приволжский исследовательский медицинский университет, 603950, г. Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, 10/1,  
**Еремина Н.А.**, Клиника «Персона», г. Нижний Новгород,  
**Трофимова К.А.**, Приволжский исследовательский медицинский университет, 603950, г. Нижний Новго-род, пл. Минина и Пожарского, 10/1,  
**Калентев Г.В.**, Городская клиническая больница № 10, г. Нижний Новгород,  
**Брагин Д.Е.**, Медицинская Школа Университета Нью-Мексико, Альбукерке, США,  
**Севрюков Ф.А.**, доктор медицинских наук, профессор, Приволжский исследовательский медицинский уни-верситет, 603950, г. Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, 10/1, [fedor\\_sevryukov@mail.ru](mailto:fedor_sevryukov@mail.ru), ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5120-2620>

© Трофимов А.О., Еремина Н.А., Трофимова К.А., Калентев Г.В., Брагин Д.Е., Севрюков Ф.А., 2025