

Айтрекинг как инструмент медицинской диагностики

Евгений Ю. Шелепин^{1*}, Ксения А. Скуратова¹,
Полина А. Лехницкая², Константин Ю. Шелепин¹

¹ Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Российская Федерация

*Почта ответственного автора: ShelepinEY@infran.ru

Аннотация

Введение. Переход к персонализированной, предиктивной и профилактической медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям сбережения здоровья является одним из приоритетов научно-технологического развития в ближайшее десятилетие. Данному приоритету отвечает возможность использования айтрекинга для медицинской диагностики. **Айтрекинг как инструмент медицинской диагностики.** При использовании айтрекинга выявление заболеваний основано на основных видах движений глаз: фиксации, саккад и нистагма. Однако не до конца валидированы протоколы, позволяющие комплексно оценивать состояние пациента. Целью предстоящего обзора является попытка рассмотреть исследования баз данных Scopus, Web of Science, РИНЦ касательно применения айтрекинга в качестве дополнения к диагностике заболеваний и расстройств, обозначить возможные траектории развития данного метода в области медицины. В статье приведены примеры использования айтрекинга при деменции, легких когнитивных нарушениях, болезни Альцгеймера, шизофрении, шизотипическом и бредовом расстройстве, расстройстве настроения, синдроме дефицита внимания, последствиях перенесенного инсульта, травм головы. **Обсуждение результатов.** Айтрекинг отличается объективностью, кратким и бесстрессовым наблюдением за пациентом, возможности упрощения предъявляемых задач при высокой точности диагностики, нахождении симулированного расстройства, дополнении

существующих тестов, поиске латентных признаков, более высокой чувствительности по сравнению с некоторыми нейропсихологическими тестами, возможности динамического переключения между задачами. В качестве перспективы разработки диагностических протоколов на основе айтрекинга возможно: использование существующих парадигм проведения айтрекинговых исследований, комбинация новых парадигм с существующими нейропсихологическими тестами и методиками, наследование базовых принципов обследования состояния пациента, построение моделей анализа данных. Необходима валидация на более широкой выборке и уточнение перечня стимулов.

Ключевые слова

айтрекинг, высокотехнологичное здравоохранение, диагностика, психиатрические расстройства, неврологические нарушения, машинное обучение, движения глаз

Финансирование

работа поддержана грантом на создание и развитие НЦМУ «Павловский центр «Интегративная физиология – медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям стрессоустойчивости» и при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (№075-15-2022-303 от 21.04.2022 г.)

Для цитирования

Шелепин, Е.Ю., Скуратова, К.А., Лехницкая, П.А., Шелепин, К.Ю. (2024). Айтрекинг как инструмент медицинской диагностики. *Российский психологический журнал*, 21(4), 168–194. <https://doi.org/10.21702/rpj.2024.4.9>

Введение

Конкурентоспособность национальных экономик определяется условиями, когда высокий темп освоения новых знаний и создания наукоемкой продукции на собственной технологической основе является ключевым фактором. Одним из приоритетов научно-технологического развития в ближайшее десятилетие следует считать переход к персонализированной, предиктивной и профилактической медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям сбережения здоровья. Реакцией на большие вызовы должно стать своевременное создание наукоемких технологий и продукции, отвечающих национальным интересам Российской Федерации и необходимых для существенного повышения качества жизни населения (Указ Президента Российской Федерации «О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», 28 февраля 2024 года, №145).

Переход к «цифровому здравоохранению», вероятно, станет определяющей «чертой десятилетия» для данной отрасли. Цифровые технологические инновации, робототехника, интернет вещей, искусственный интеллект и ряд других факторов привели к расширению масштабов применения различных цифровых устройств специалистами в области здравоохранения, а также работниками больниц и клиник. В отрасли вследствие цифровизации ожидаются и институциональные сдвиги: появятся новые типы медико-биологических компаний, которые будут лоббировать трансформацию юридических норм и правил, преобразование институционального ландшафта в отношении прав, способов использования и коммерциализации цифровых технологий в системе здравоохранения (Доан, Крестьянинова, & Плотников, 2023; Заболотная, Гатилова, & Заболотный, 2020; Бондаренко, & Гузенко, 2021; Rieke et al., 2020; Guo et al., 2020).

Айтрекинг как инструмент медицинской диагностики

Использование айтрекинга в медицинской практике – еще одно перспективное направление развития, которое сочетается с текущими тенденциями развития здравоохранения и размыванием дисциплинарных и отраслевых границ в научных исследованиях и разработках. Прочно закрепившийся в области экспериментальной психологии и берущий начало от исследования физиологии зрительного анализатора, айтрекинг (от англ. «eye tracking» – отслеживание глаз) – метод регистрации взора человека, позволяющий рассчитывать показатели макро- и микродвижений глаз. Движения глаз отражают мыслительные процессы человека, определяющие целенаправленную деятельность человека. Регистрация движения глаз позволяет точно определить, какие объекты привлекают взгляд наблюдателя, в каком порядке и как часто. Развитие технологии записи движения глаз и их обработки делают возможным применение айтрекинга в разных сферах деятельности: нейромаркетинге, спорте, образовании, психодиагностики и др. Это подтверждается успешным применением айтрекинга для изучения психологических процессов и состояний человека, а также активным патентованием методов регистрации глазодвигательных реакций как части комплексной оценки личности в различных сферах деятельности (Огнев & Лихачева, 2015). Данный метод улучшает диагностику и ускоряет выявление заболеваний, чем обеспечивает более оперативное лечение.

В клинической практике контроль движения глаз ведется давно. Точные клинические измерения были проведены уже в середине XX века. В работах А. Р. Лурия, А. Карпова и А. Л. Ярбуса впервые были выделены две формы апраксии взора, а именно затылочно-теменная, при которой в первую очередь страдают высшие собственно зрительные функции, и лобная, при которой нарушается планирование и организация движений глаз (Karpov, Luria, & Yarbus, 1968; Luria, Karpov & Yarbus, 1966; Карпов, 1975).

Важность этих пионерских работ отмечает в своем прошлогоднем обзоре Марим Пухальской с соавторами (Pačhalska, Buczaj, Korowski, Pесyna, Maksym, Buczaj, & Rasmus, 2023). При этом отмечается, что, хотя исторически отслеживание движений глаз использовалось больше в области психологии когнитивных процессов, айтрекинг обладает потенциалом для исследования двигательных расстройств и измерения когнитивных процессов при нейродегенерации. Методы середины XX века давали возможность проводить единичные исследования, но не смогли получить массового распространения из-за трудоемкости регистрации и обработки данных. Современные технологии удобны в применении, надежны, безопасны, точны и могут быть применены в широкомасштабных клинических исследованиях. Подробное описание современных методов регистрации движений глаз в области психологии дано в обзоре В. А. Барабанщикова и А. В. Жегалло (Барабанщиков, & Жегалло, 2014).

В настоящее время в медицинской практике возможно проводить широкомасштабные исследования движения глаз при самых различных когнитивно-эмоциональных нарушениях. Возможно выявление заболеваний за счет контроля основных видов движений глаз, а именно фиксаций, саккад, тремора и нистагма. Для генерации саккад команды приходят на верхние бугры четверохолмия, затем на ядра глазодвигательных нервов, которые непосредственно иннервируют глазные мышцы. Команды для движения глаз генерируют нейронные сети теменных полей глаза (parietal eye fields – PEF), лобного поля глаза (the frontal eye field – FEF), дополнительного поля глаза (supplementary eye field – SEF), и дорсолатеральной префронтальной коры (the dorsolateral prefrontal cortex – DLPFC). Произвольные просаккады (voluntary pro-saccades) в основном находятся под контролем FEF, тогда как рефлекторные саккады (reflexive saccades) генерируются через нейроны PEF. Некоторые саккадические задачи, такие как антисаккады, добавляют когнитивные уровни к глазодвигательному паттерну и более непосредственно задействуют DLPFC и PEF.

Плавное прослеживание и фиксация глаз первоначально обрабатываются экстрастриарными кортикальными областями (extrastriatal cortical regions), включая V5 и медиальную верхнюю височную зрительную область, соединяясь с заднетеменной корой, FEF и SEF, а затем проецируются вниз на ядра моста и мозжечок (Russell, Greaves, Convery, Bocchetta, Warren, Kaski, & Rohrer, 2021).

Для оценки глазодвигательной активности на поведенческом уровне используются следующие тесты:

1. Тест измерения стабильности фиксации

Направлен на оценку способности поддерживать взгляд на неподвижной цели, способности следить за плавно движущейся целью, способности поддерживать стабильность фиксации при чтении. Зависимые переменные: количество морганий, количество и амплитуда саккад, средняя продолжительность фиксации, частота микросаккад, стабильность между фиксациями и внутри фиксаций.

2. Тесты оценки саккад

Эта категория включает несколько тестов, основанных на саккадических движениях глаз:

- Тест на просаккады: измеряет способность быстро и точно перемещать глаза к внезапно появляющейся цели.
- Тест на антисаккады: оценивает способность подавлять рефлективное смещение взгляда к новой цели и вместо этого перемещать взгляд в противоположном направлении.
- Тест на предиктивные саккады: оценивает способность предвидеть и перемещать глаза туда, где появится цель, на основе выученных шаблонов.
- Тест на запомненные саккады: тестирует способность перемещать глаза к местоположению цели после задержки, требуя запоминания положения цели.

Зависимые переменные: латентность, амплитуда, направление, пиковая скорость, точность и корректирующие саккады.

3. Тесты на плавное прослеживание

Включают различные методы для оценки того, насколько хорошо глаза могут следовать за движущимися объектами:

- Тест на постоянную скорость: использует цель, движущуюся туда-сюда по прямой линии с постоянной скоростью.
- Синусоидальный тест: цель движется плавным, волнообразным образом, изменяя скорость.
- Тест прыжок-движение: цель внезапно движется (прыжок) и затем продолжает движение с постоянной скоростью, полезно для оценки начала прослеживания.
- Зависимые переменные: коэффициент скорости, среднеквадратичная ошибка (RMSE), логарифм отношения сигнал/шум, количество и тип саккад (саккады «догоняющие», «отстающие», «антиципаторные»), и начало/ускорение/скорость прослеживания.

4. Чтение и выработка профессионального навыка

Определение влияния опыта работы на навык визуальной обработки текстовой информации: с ростом профессиональных навыков анализа текстовой информации наблюдаются более оптимизированные стратегии движения глаз, позволяющие эффективно выполнять задачи с минимальными усилиями (Skuratova et al., 2022). Зависимые переменные: количество фиксации, длина пути сканирования, амплитуда и скорость саккад.

5. Оценка врачебного опыта

Качественное восприятие зрительных образов также зависит от текущего профессионального опыта (рисунок 1). Это связано с обучением распознавания малоинформативных низкочастотных изображений, представляемых периферией поля зрения для управления переводом взгляда (Скуратова, Шелепин, & Яровая, 2021).

Рисунок 1

Траектории движений глаз и точки фиксации при восприятии врачами лица пациента в зависимости от их опыта до одного года (а), до 7 лет (б), до 10 лет (в), до 21 года (г) (Скуратова, Шелепин, & Яровая, 2021).



6. Нистагм

Несмотря на важность данного клинического показателя, нистагм не рассмотрен в текущем обзоре, так как требует отдельного подробного обсуждения: неврологи качественно (визуально) оценивают его состояние.

Несмотря на явный потенциал айтрекинга как метода медицинской диагностики, применение айтрекинга в медицинской практике и психодиагностике в данный момент остается ограниченным: еще не до конца валидированы протоколы, позволяющие комплексно оценивать состояние пациента.

Целью предстоящего обзора является попытка продемонстрировать опыт применения айтрекинга в качестве дополнения к диагностике заболеваний и расстройств, обозначить возможные траектории развития данного метода в области медицины. В статье приведены примеры использования айтрекинга при различных неврологических, психических расстройствах, обзор структурирован согласно классификации МКБ–10.

Обсуждение результатов

1. Класс V Психические расстройства и расстройства поведения

1.1 Органические, включая симптоматические, психические расстройства (F00–F09)

В блоке, связанном с деменцией, находятся психические расстройства с явными этиологическими факторами: болезни головного мозга, травма головного мозга или инсульт, ведущие к церебральной дисфункции. Деменция – синдром, обусловленный поражением головного мозга, при котором нарушаются такие высшие корковые функции, как память, мышление, ориентация, понимание, счет, способность к обучению, речь и суждения. Этот синдром отмечается при болезни Альцгеймера, при цереброваскулярных болезнях и при других состояниях, первично или вторично поражающих головной мозг (по: Международная классификация болезней 10 пересмотра (МКБ-10). URL: <http://mkb-10.com/index.php?pid=4048>).

В рубрику легкого когнитивного расстройства включены смешанные состояния, причинно связанные с мозговыми нарушениями, обусловленными первичной болезнью головного мозга, системным заболеванием, вторично поражающим головной мозг, воздействием экзогенных токсичных веществ или гормонов, эндокринными расстройствами или другими соматическими заболеваниями, исключена деменция. Болезнь Альцгеймера – первичное дегенеративное церебральное заболевание неизвестной этиологии, проявляется специфическими нейрхимическими, нейроморфологическими психопатологическими признаками (по: Международная классификация болезней 10 пересмотра (МКБ-10). URL: <http://mkb-10.com/index.php?pid=4048>).

Увеличение микросаккад, связанное с саккадическим вторжением, сначала уводящие глаз от зрительной цели, затем возвращающиеся корректирующим образом

чаще встречается при заболеваниях ствола мозга и мозжечка, корковых нарушений, таких как болезнь Альцгеймера (Nakamagoe et al., 2019). Пациентам с лобно-височной деменцией трудно поддерживать фиксацию в течение долгого времени, что может объясняться проблемой с торможением саккад, особенно с учетом корреляции с орбитофронтальной корой. Система плавного преследования глаз (the smooth pursuit eye movement system) также уязвима к церебральной дисфункции, морфологические нарушения обнаруживаются в зрительной коре у пациентов с идиопатической деменцией (Hutton, Nagel, & Loewenson, 1984).

1.1.1 Деменция (F03 Деменция неуточненная)

Для оценки когнитивных функций при деменции использовались следующие стимулы: исследование сцены с социальным и несоциальным контекстом, отсутствующими элементами и социальными сценами; семантическая обработка через предложения с совпадающим или несовпадающим смыслом; узнавание пар изображений (группа контроля: $n = 432$, деменция: $n = 30$). Далее был применен метод глубокого обучения для классификации и интерпретации когнитивной активности и состояния деменции на основе необработанных параметров отслеживания глаз (x, y координата взора, средний размер зрачка). Полученные результаты показывают, что методы обучения без учителя могут дополнить когнитивную оценку для быстрого и бесстрессового наблюдения за пациентами на разных стадиях заболевания, при этом отмечается необходимость проведения дополнительных исследований (Mengoudi et al., 2020).

В исследовании Russell, Greaves, Convery, Nicholas, Warren, Kaski, & Rohrer (2021) первоначально предъявляли задание на просаккаду для оценки основных глазодвигательных функций и, следовательно, способности участника выполнять задачи по распознаванию эмоций (пациенты с лобно-височной деменцией: $n = 18$, контрольная группа: $n = 22$). Были разработаны две задачи для оценки распознавания простых и сложных эмоций. В углах экрана показывались фотографии людей с разными эмоциями, в центре – наименование эмоции. Хотя на задаче просаккад не было найдено статистически значимых различий, контрольная группа тратила значительно больше времени на просмотр целевого изображения после предъявления наименования, чем группа пациентов с деменцией. Контрольная группа также тратила значительно меньше времени на просмотр похожих и отвлекающих изображений после предъявления наименования эмоции. Авторы отмечают, для лучшего понимания воспроизводимости и надежности задачи потребуются дальнейшие исследования в более крупной контрольной группе (Russell, Greaves, Convery, Nicholas, Warren, Kaski, & Rohrer, 2021).

В исследовании (Córdoba et al., 2023) представлен диагностический биомаркер болезни Альцгеймера (БА) и поведенческого варианта лобно-височной деменции (умеренная БА: $n = 38$, деменция: $n = 24$, контрольная группа: $n = 39$). Были найдены различия в парадигмах саккад, фиксации и плавного слежения. Точность и площадь под кривой (AUC) превышают 95%.

1.1.2 Легкие когнитивные нарушения (F06.7 Легкое когнитивное расстройство), Болезнь Альцгеймера (G30)

Для исследования данных патологических состояний предлагались задачи на память (кодирование), с отслеживанием движущейся монеты и отдельным отслеживанием падающей капли воды (без инструкции), на дедуктивное рассуждение, просмотр пейзажной фотографии, зрительную рабочую память (запоминание и воспроизведение), внимание и счет, зрительно-пространственную функцию. В качестве зависимых переменных для классификатора машинного обучения были взяты процент продолжительности фиксации на каждой области интересов, х,у координаты взора. Полученная модель различила когнитивные функции у субъектов контрольной группы, БА и легких когнитивных нарушений, наиболее показательными оказались задачи на память и дедуктивного рассуждения (пациенты с легкими когнитивными нарушениями: n = 52, пациенты с болезнью Альцгеймера: n = 70, контрольная группа: n = 52). Между тем, некоторые задачи можно опустить для дальнейшего упрощения, сохранив при этом хорошую производительность теста (Tadokoro et al., 2021).

В исследовании (Polden, & Crawford, 2021) изучалась задача визуального отвлечения. Подавление недавнего отвлекающего эффекта (IRD) означает подавление саккадического движения глаз в направлении цели, которая находится в месте расположения предыдущего отвлекающего фактора. В двух исследованиях сравнивали IRD в большой межкультурной выборке, состоящей из молодых (n = 75), пожилых участников из Европы (n = 119), пожилых испытуемых из Южной Азии (n = 83), испытуемых с деменцией вследствие болезни Альцгеймера (n = 65) и участников с легкими когнитивными нарушениями (n = 91). Значительно более длительное время саккадической реакции в испытаниях «мишень-дистрактор» по сравнению с испытаниями «мишень-мишень» было очевидно во всех группах из разных стран и всех возрастов. Важно отметить, что IRD также сохранялся у участников с болезнью Альцгеймера и легкими когнитивными нарушениями, демонстрируя, что IRD устойчив в разных культурах, возрастных группах и клинических популяциях.

Для исследования зрительного внимания во время испытания способности к пространственной ориентации и навигации при Болезни Альцгеймера, было предложено найти путь к определенному месту в VR-симуляции, перемещаясь по окружающей среде с помощью джойстика (n = 15, БА: n = 7, контрольная группа: n = 8). Были найдены различия в проценте фиксаций на визуальных подсказках, которые отражают трудности у пациентов с БА с выбором соответствующей информации для поиска пути по сравнению с контрольной группой, обращение внимания на нерелевантную информацию. Авторы отмечают необходимость дальнейших исследований, расширения выборки (Davis & Sikorskii, 2020).

1.2 Шизофрения, шизотипические и бредовые расстройства (F20–F29)

Шизофрения характеризуется искажениями мышления, восприятия и аффектом, часто при сохранном ясном сознании и интеллекте (хотя со временем возможно снижение когнитивных способностей) (по: Международная классификация болезней 10 пересмотра (МКБ-10). URL: <http://mkb-10.com/index.php?pid=4048>). У пациентов с шизофренией часто нарушаются плавные движения глаз (smooth eye movements) во время визуального слежения за целью. Но возможно этот эффект – результат фармакологических воздействий, а не отражение особенности управления глазодвигательной системы при данном заболевании. Задача «на зрительное слежение» вызывает особые трудности, что может быть вызвано дисфункцией в областях зрительно-двигательной системы (средневисочная область – middle temporal area и медиальная верхняя височная область – medial superior temporal area) (Lencer et al., 2005). На корковом уровне обработка сигналов самодвижения происходит в дорсальном зрительном пути (dorsal visual pathway) (Bremmer et al., 2000). Наблюдаются нарушения и в вентральной интрапаретальной области (ventral intraparietal area), которые также могут влиять на дисфункцию движений глаз (Ales et al., 2021).

1.2.1 Шизофрения (F20)

При шизофрении айтрекинг может выступать как метод выявления симуляций в психиатрической практике. Так, в контрольной группе (n = 43) было предложено симулировать паттерны движений глаз, продемонстрированные группой пациентов с шизофренией (n = 40) на трех задачах: плавного преследования, просаккады (служила базовой мерой) и анти-саккады. Исследованными зависимыми переменными были средняя задержка саккады, стандартное отклонение задержки, амплитуда, пиковая скорость, количество успешных попыток и процент ошибок. Анализ данных показал, что движения глаз участников эксперимента, которым было поручено симулировать, (а) лишь частично отличались от движений глаз у контрольной группы и (б) не очень напоминали движения глаз пациентов с шизофренией, о которых сообщалось в ранее опубликованных статьях. В совокупности эти результаты позволяют предположить, что исследование движений глаз действительно может помочь выявить симулированную шизофрению (Ales et al., 2021).

В другом исследовании в качестве зависимых переменных было взято количество фиксаций (NEF), среднее значение длины сканирования (MESL) в задаче удержания; показатель когнитивного поиска (CSS), показывающий частоту фокусировки на областях интересов фигуры для дальнейшего распознавания фигуры в задаче сравнения; и показатель ответного поиска (responsive search score – RSS), отражающий частоту фиксации взгляда на каждой части фигуры в ответ на вопросы в задаче сравнения. RSS пациентов с шизофренией (n = 145) значительно ниже, чем

у пациентов с депрессией ($n = 116$) или контрольной группы ($n = 124$), при этом не найдено статистически значимых различий в RSS для пациентов с депрессией и контрольной группы. Дискриминантная функция показала чувствительность 89,0% и специфичность 86,7% (Kojima et al., 2001).

Целью исследования (Li et al., 2024) является сравнение экологически обоснованных показателей (Кембриджский проспективный тест памяти, CAMPROMPT) и лабораторных показателей (парадигма отслеживания глаз) при оценке проспективной памяти (ПМ) у людей с расстройствами шизофренического спектра (SSD). Особенности ПМ оценивались с помощью общего времени фиксации и общего количества фиксаций на словах-дистракторах. В центре экрана появлялся рисунок, далее предъявлялись четыре разные лексемы, затем было предложено определить, соответствует ли одно из слов объекту на ранее показанном изображении. Пациенты с SSD ($n = 32$) продемонстрировали меньшее количество общих фиксаций слов-дистракторов и более низкую точность ПМ по сравнению с контрольной группой ($n = 32$). Лабораторная парадигма отслеживания глаз имеет преимущества перед экологически обоснованными измерениями в выявлении ошибок обнаружения сигналов, что делает ее более чувствительным инструментом для выявления дефицита ПМ у пациентов с SSD.

1.3 Расстройства настроения [аффективные расстройства], атипические и бредовые расстройства (F30–F39)

В легких, средних или тяжелых случаях депрессивных эпизодов у пациентов отмечаются пониженное настроение, уменьшение энергичности и падение активности. Снижена способность радоваться, получать удовольствие, интересоваться, сосредоточиваться, наблюдается выраженная усталость. Блок расстройств настроения включает расстройства, при которых основным нарушением является изменение эмоций и настроения в сторону депрессии (с тревогой или без нее) или в сторону приподнятости (гипомании) (по: Международная классификация болезней 10 пересмотра (МКБ-10). URL: <http://mkb-10.com/index.php?pid=4048>).

Психопатология депрессии связана с изменениями в префронтальной и орбитофронтальной коре. У пациентов сохранено восприятие визуальной информации, но есть изменения в процессах сенсомоторной интеграции (Fabisch et al., 2009). Дефицит просаккад может быть связан с функциональными изменениями, затрагивающими корковые структуры, такие как фронтальные зрительные поля (frontal eye fields – FEF) и верхний бугорок (Schall, 2004). Нарушение глубоких областей FEF также может быть причиной дефицита системы зрительного слежения (Rosano et al., 2002). Немеланхолическим депрессивным пациентам характерно увеличение пиковой скорости саккад. Мозжечок и базальные ганглии – структуры мозга, непосредственно участвующие в выполнении саккады,

основанной на памяти (memory-guided saccade) (Dreher & Grafman, 2002). Все эти структуры взаимодействуют с другими регионами, такими как дорсолатеральная префронтальная кора (Dorsolateral prefrontal cortex – DLPFC (Pierrot-Deseilligny, & Burke, 2005). DLPFC, по-видимому, участвует в ингибировании саккад, генерируемых верхними холмиками (Kaufman, Pratt, Levine, & Black, 2010). Дефицит торможения движений глаз, наблюдаемый при большой депрессии, может быть связан с ранее описанным дефицитом активации (вентролатеральной) префронтальной коры и импульсивностью у пациентов с большой депрессией (Carvalho et al, 2015).

1.3.1 Большое депрессивное расстройство (F32.2 Депрессивный эпизод тяжелой степени без психотических симптомов), биполярная депрессия (F31), биполярная мания (F31)

Исследование (Wang, Lyu, Tian, Lang, Wang, St Clair, & Zhao, 2022) состояло из следующих этапов: задача на свободный просмотр, задача на стабильность фиксации и задача плавного преследования (контрольная группа: n = 104, пациенты с большим депрессивным расстройством: n = 48, пациенты с биполярным расстройством: n = 57; соответствующий диагноз был поставлен психиатрами на основе DSM-IV). При аффективном расстройстве в задаче свободного просмотра была выявлена меньшая амплитуда саккад, в задаче на стабильность фиксации и плавное прослеживание – большее количество фиксаций и саккад, более короткая продолжительность фиксации, большая продолжительность саккад при выполнении задач на стабильность фиксации и плавное прослеживание. Авторы приходят к выводу, что пациенты с большой депрессией, биполярной депрессией и биполярной манией имеют сходную дисфункцию движения глаз при свободном просмотре, стабильности фиксации и плавном выполнении задач.

Мета-анализ (пациенты с депрессией: n = 474, контрольная группа: n = 693) (Huang et al., 2023) показал, что:

1. на положительных эмоциональных стимулах продолжительность фиксации значительно ниже; для негативных стимулов, продолжительность фиксации была выше.
2. количество фиксаций на положительных эмоциональных стимулах также ниже, количество фиксаций на отрицательных эмоциональных стимулах, напротив, выше;
3. возраст влияет на продолжительность фиксации положительных эмоциональных стимулов. В случае с негативными эмоциональными стимулами, на продолжительность фиксации влияли возраст и тип негативной эмоциональной картины (печальная, дисфорическая, угроза, гнев).

В исследовании (Rantanen et al., 2021) (униполярная депрессия: n=16, контрольная группа: n=16) использовалась задача свободного просмотра визуально совпадающих

межличностно агрессивных и нейтральных картинок, предъявляющихся парами. Когда участники могли предвидеть валентность стимула, при депрессии продемонстрировано ранее смещение внимания в сторону межличностно агрессивных изображений. Результаты демонстрируют как раннюю склонность внимания к межличностной агрессии, которая может быть при депрессии, так и более позднее внимание к избеганию агрессии. Ранняя предвзятость в обработке информации, связанная с депрессией, может оказывать дезадаптивное воздействие на то, как люди в депрессии воспринимают и функционируют в социальном взаимодействии и, следовательно, могут поддерживать депрессивное настроение.

В исследовании (Barsznica et al., 2021) описаны глазодвигательные функции у пожилых пациентов с депрессией и суицидальным поведением (СП) на основе задачи просаккады и антисаккады. У пациентов с СП наблюдалось меньшее количество исправленных ошибок антисаккады, большее время на их корректировку, чем у пациентов без СП. Эти предварительные результаты свидетельствуют о более высокой когнитивной негибкости у суицидальных пациентов по сравнению с теми, кто не склонен к суициду. Подобная негибкость может объяснить трудности пожилых людей с депрессией в поиске решения проблемы суицидальных мыслей, чтобы адекватно реагировать на стрессовую среду.

1.4 Расстройства психологического развития (F80–F89) + эмоциональные расстройства и расстройства поведения, начинающиеся обычно в детском и подростковом возрасте (F90–F98)

Группа детских расстройств с ранним началом, характеризующихся неорганизованной активностью, отсутствием упорства и склонностью к перескакиванию с одного дела на другое, социальные отношения могут быть нарушены, а познавательные функции недостаточны (по: Международная классификация болезней 10 пересмотра (МКБ-10). URL: <http://mkb-10.com/index.php?pid=4048>). Детский аутизм здесь – тип общего нарушения развития, который определяется наличием: а) аномалий и задержек в развитии, проявляющихся у ребенка в возрасте до трех лет; б) психопатологических изменений во всех трех сферах: эквивалентных социальных взаимодействиях, функциях общения и поведения, которое ограничено, стереотипно и монотонно; в) возможными неспецифическими проблемами⁵.

Пациенты с РАС демонстрируют снижение точности саккадических движений глаз, значение которой вариабельно в разных исследованиях. Повышенная вариабельность результатов предполагает дефицит функций, снижающих вариабельность мозжечка (cerebellar variability-reducing functions), что приводит к снижению способности к компенсаторным корректировкам для обеспечения последовательного и точного выполнения саккад. Заниженная пиковая скорость саккад и их повышенная продолжительность может быть связана со снижением

возбуждающей активности *pontine brainstem burst cell* и/или повышенную ингибирующую активность *omnipause cell*, что изменяет показатели саккадических движений глаз. Снижение способности последовательно модулировать амплитуду саккадических движений глаз может негативно повлиять на ранний социальный опыт, и тем самым оказать влияние на социальное и когнитивное развитие (Oldham, Meehan III & Howell, 2021). С другой стороны, при РАС механизмы, лежащие в основе способности направлять взгляд на конкретный стимул (социальный или несоциальный) и, следовательно, захват внимания, также нетипичны. [Они?] возникают из-за дисфункций в ряде областей мозга, включая миндалевидное тело, лобные поля глаза (FEF), височно-теменной узел (temporal parietal junction), островок и дорсально-латеральную префронтальную кору. В настоящий момент предпринимаются попытки разработать корковый механизм восприятия лиц при РАС, однако литература по исследованиям движения глаз при РАС свидетельствует об отсутствии последовательности в подходах к сбору, анализу и последующей интерпретации данных (Paragiannopoulou et al., 2014).

При СДВГ наблюдаются структурные/функциональные нарушения базальных ганглиев-таламо-кортикального контура, проецирующиеся на лобную кору; лобно-стриарной сети. Проблемы с интерпретацией аномальных саккад заключаются в том, что производительность саккад резко меняется с возрастом, вовлечение лобного поля глаза (FEF) для контроля саккад было выявлено только в исследованиях эффектов поражений у взрослых пациентов. Гипофункция дофаминергических нейронов вентрального полосатого тела вызывает сбой двигательного торможения и может вовлекаться в дисфункцию лимбической области префронтальной коры, т. е. орбитофронтальной коры, передней поясной извилины, особенно при гипофункции восходящего выхода базальных ганглиев. Эти механизмы могут объяснить более высокую отвлекаемость, наблюдаемую у пожилых пациентов с СДВГ (Goto et al., 2010).

1.4.1 Синдром дефицита внимания (СДВГ) – F90.0. Нарушение активности и внимания

Исследование A. Lev et al. (Lev, Braw, Elbaum, Wagner & Rassovsky, 2022) направлено на оценку возможности интеграции айттрекинга с МОХО-dCPT, тестом, связанным с оценкой когнитивных функций у пациентов с подозрением на СДВГ или подтвержденным синдромом (пациенты с СДВГ: n = 35, контрольная группа: n = 35). МОХО-dCPT состоит из восьми блоков, каждый блок состоит из заданий, в которых в центре экрана отображается сетка стимулов (целевых или нецелевых). На основе результатов МОХО-dCPT рассчитываются четыре индекса эффективности: внимание, своевременность, импульсивность и гиперактивность. В исследовании также использовалась анкета из 18 пунктов для самоотчета о симптомах СДВГ у взрослых, подробно описанная в DSM-5 (American Psychiatric Association, 2013). Авторы рассматривали продолжительность взгляда на области интересов: стимул

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

с задачей (в центре экрана), периферия (область вокруг стимула с задачей), область за экраном. С помощью измерения направления взгляда было обнаружено, что пациенты с СДВГ проводят больше времени, глядя на нерелевантные области как на экране, так и за его пределами, чем участники исследования из контрольной группы. В соответствии с отвлекаемостью, характерной для СДВГ, трудность в подавлении спонтанных движений глаз в сторону дистракторов МОХО-dCPT, по-видимому, является причиной групповых различий. С клинической точки зрения, шкала, сочетающая измерения движения глаз и обычные индексы, показала способность к распознаванию СДВГ, однако необходимы дальнейшие исследования для подтверждения результатов и устранения ограничений исследования.

Дети с расстройствами аутистического спектра (РАС) имеют дефицит сенсорно-перцептивной обработки, который ослабляет их способность концентрировать внимание и воспринимать социальные стимулы в повседневной жизни. Поскольку повседневные социальные эпизоды состоят из тонких динамических изменений социальной информации, любая неспособность уделить внимание или обработать тонкие человеческие невербальные сигналы, такие как выражение лица, позы и жесты, может привести к неуместному социальному взаимодействию. В исследовании (Tsang & Chu, 2018) с использованием схемы сравнения единичных случаев собраны данные отслеживания глаз во время просмотра видео с социальным сценарием трех участников: ребенка с расстройством аутистического спектра (РАС), ребенка с сопутствующим синдромом дефицита внимания и гиперактивности (СДВГ) и нейротипического контроля. Продолжительность первой фиксации (на 500 мс целевой области интереса) была больше у нейротипического ребенка (150 мс), чем у детей с РАС и РАС-СДВГ (оба 110 мс). Общая продолжительность фиксации (на целевую УОИ в 500 мс) была короче у ребенка с РАС-СДВГ (120 мс), чем у нейротипического ребенка (170 мс) и ребенка с РАС (180 мс). Общее количество импульсов фиксации (на целевую УОИ в 500 мс) было самым большим для ребенка с РАС (4,62), вторым для нейротипического ребенка (4,09) и самым коротким для ребенка с РАС-СДВГ (3,19). График пути сканирования фиксирует визуальное сканирование нескольких АОИ в социальной сцене.

Целью исследования (Sweere et al., 2022) было изучение отвлекаемости, количественно определяемой путем регистрации и анализа движений глаз, не связанных с выполнением задачи, у детей с СДВГ и без, а также у детей с неврологическими расстройствами и без них ($n = 141$). Участники с СДВГ и участники с неврологическими расстройствами тратили меньше времени на фиксацию на целевых стимулах по сравнению со своими сверстниками без СДВГ или их сверстниками без неврологических расстройств. Участники с СДВГ и без него имели одинаковую латентность нажатия. Участники с неврологическими расстройствами имели большую латентность нажатия по сравнению с их типично развивающимися сверстниками. Продолжительность фиксации цели демонстрирует значительную связь с проблемами внимания, о которых сообщают родители. Авторы приходят к

выводу, что отслеживание глаз во время отвлекающей задачи дает потенциально достоверную клиническую информацию, которая может способствовать оценке дисфункциональных процессов внимания. Рекомендуется провести дальнейшее исследование обоснованности и надежности этой парадигмы.

Целью работы (Oliveira, Franco, Revers, Silva, Portolese, Brentani, & Nunes, 2021) было изучение модели визуального внимания (Visual attention model – (VAM) для диагностики РАС и СДВГ (пациенты с СДВГ: $n = 30$, пациенты с РАС: $n = 76$). Три видеоролика с движениями людей и три видео с движениями геометрических фигур были объединены в девять видео, отображаемых последовательно, общей продолжительностью 54 с. Порядок и положение кадров с движениями людей и фигур менялись на протяжении всего видео. Для обучения модели использовалась карта фиксации. В результате была получена модель для диагностики РАС и СДВГ на основе использования видео в качестве стимула со средней точностью 90%, полнотой 69% и специфичностью 93%.

В исследовании (Kong et al., 2022) анализировались модели взгляда детей 1,5–3 лет ($n = 95$) и 3–5 лет ($n = 74$) с РАС и без него во время просмотра видеоклипов и неподвижных изображений. Процент времени фиксации у детей с РАС значительно снизился по сравнению с таковым у детей нормы почти во всех областях интереса, за исключением движущейся игрушки (вертолета). Машинный анализ опорных векторов показал, что классификатор может отличать РАС от нормы у малышей с точностью 80% и отличать РАС от нормы у дошкольников с точностью 71%.

Исследование (Vacas et al., 2021) было направлено на сравнение паттернов визуального внимания к социальным и несоциальным изображениям у детей с РАС и соответствующих представителей контрольной группы ($n = 36$), с оценкой роли эмоций в лицевых стимулах и типа конкурирующего объекта. Было разработано парное задание на предпочтение, сочетающее счастливые, злые и нейтральные лица с двумя типами объектов (связанными или не связанными с сопутствующими ограниченными интересами с аутизмом). В качестве зависимых переменных рассматривались три индекса: расстановка приоритетов (ориентация внимания), предпочтение и продолжительность (устойчивое внимание). Результаты показали, что обе группы имели сходные визуальные паттерны с лицами (приоритизация, большее внимание и более длительное посещение лиц в сочетании с объектами, не связанными с их сопутствующими ограниченными интересами); однако группа с РАС обращала внимание на лица значительно меньше, чем контрольная группа. У детей с РАС наблюдалась эмоциональная предвзятость (поздняя ориентация на сердитые лица и типичное предпочтение счастливых лиц). Наконец, объекты, связанные с их сопутствующими ограниченными интересами, привлекли внимание в обеих группах, что значительно снизило социальное внимание у детей с РАС. Атипичное социальное внимание присутствует у детей с РАС независимо от конкурирующего несоциального объекта.

2. Класс IX. Болезни системы кровообращения

Инсульт – острое нарушение кровообращения в головном мозге, сопровождающееся гибелью тканей и нарушением функций нервной системы. Последствия инсульта включает состояния, уточненные как таковые, как остаточные явления или как состояния, которые существуют в течение года или более с момента возникновения причинного состояния (по: Международная классификация болезней 10 пересмотра (МКБ-10). URL: <http://mkb-10.com/index.php?pid=4048>).

Расширение зрачков контролируется как симпатической, так и парасимпатической нервной системой в ответ не только на изменения света, но и на когнитивные процессы, включающие внимание, память, речь, принятие решений и эмоциональную обработку. Получение, обработка и распознавание эмоциональной информации по лицу человека включает в себя сложную сеть периферийных и центральных систем. Помимо зрительной коры и кортикальных ассоциативных областей, которые обычно участвуют в обработке зрительной информации, при изображении человеческого лица задействуются и другие области мозга, такие как веретенообразная область лица в вентральных височных долях (the fusiform face area in the ventral temporal lobes). Другие структуры, такие как нижняя затылочная извилина, верхняя височная борозда и миндалевидное тело, также участвуют в декодировании эмоциональной информации. Распределенная природа этих цепей мозга особенно уязвима как к очаговым, так и к диффузным повреждениям, например, полученным в результате цереброваскулярных и травматических катастроф, что подтверждается высокой частотой нарушений способности различать эмоции после травмы головного мозга (Maza, Moliner, Ferri & Llorens, 2020).

Отсутствие патологического смещения вправо при свободном просмотре сцены может зависеть от целостности второй ветви правого верхнего продольного пучка (SLF II), тракта белого вещества, соединяющего области коры, критически важные для зрительного внимания, и повреждение которого тесно связано с возникновением пренебрежения (Kaufmann et al., 2020).

2.1 Инсульт (Последствия цереброваскулярных болезней (I69))

Пространственное пренебрежение (spatial neglect) связано с неспособностью наблюдать противоположную часть полупространства и реагировать на нее и является негативным предиктором функциональных последствий перенесенного инсульта (Ales et al., 2021). Целью исследования было проверить чувствительность измерения движений глаз во время свободного визуального исследования (Free Visual Exploration – FVE) (пациенты, перенесшие инсульт: $n = 78$, контрольная группа: $n = 40$). На экране было представлено 12 изображений природы или городских общественных мест и 12 их зеркальных версий (отраженных по вертикальной оси). Инструкция заключалась в свободном исследовании изображения. Рассматривались

направление первой фиксации влево или вправо, средняя продолжительность взгляда. Пациенты с пренебрежением продемонстрировали сдвиг вправо в свободном визуальном исследовании. FVE правильно выявил игнорирование у 85% пациентов со значением AUC 0,922 в ROC-анализе. Традиционные нейропсихологические тесты «на бумаге», рассматриваемые отдельно или в комбинации, показали неоднородные результаты и значительно реже выявляли пренебрежение (21,74%–68,75%). Айтрекинг оказался более чувствительным в выявлении пренебрежения в повседневном поведении, чем нейропсихологические тесты (Kaufmann et al., 2020).

В исследовании (Maza, Moliner, Ferri & Llorens, 2020) изучались точность, распределение ответов, визуальное поведение и расширение зрачков у людей, перенесших инсульт, при определении эмоциональных выражений лица (ишемический инсульт: $n = 18$, геморрагический инсульт: $n = 22$, контрольная группа: $n = 65$). Результаты авторов подтвердили ухудшение работоспособности после инсульта и показали снижение внимания к глазам. Зависимость визуального поведения от производительности, хотя и не является определяющей, может указывать на то, что измененное визуальное поведение может быть фактором, отрицательно влияющим на распознавание эмоций по выражению лица.

Нистагм, вызванный взглядом (Gaze-evoked nystagmus, GEN), является центральным признаком острого вестибулярного синдрома (Acute Vestibular Syndrome, AVS); однако различение патологической и физиологической GEN является сложной задачей. У контрольной группы с GEN константа времени центростремительного дрейфа была >18 с. Айтрекинг выявил патологическую GEN (константа времени ≤ 18 с) у 33% пациентов с вестибулярными инсультами. Результаты были эквивалентны осмотру специалиста. Автоматизированная количественная оценка GEN была специфичной и точно идентифицировала пациентов в отделениях неотложной помощи с AVS, вызванным инсультом (Mantokoudis, Korda, Zee, Zamaro, Sauter, Wagner, & Caversaccio, 2021).

3. Класс VI. Болезни нервной системы

Рассеянный склероз – это аутоиммунное заболевание, его причиной является нарушение работы иммунной системы организма. К Болезни Паркинсона относят двигательные нарушения в результате гибели нейронов черной субстанции головного мозга.

При рассеянном склерозе воспалительные демиелинизирующие поражения в различных областях головного мозга приводят к широкому спектру глазодвигательных нарушений: чаще всего к статическому и динамическому смещению глаз (Serra, Chisari & Matta, 2018) в сочетании с дисметрическим саккадическим поведением (Serra, Derwenskus, Downey & Leigh, 2003). Кроме того, часто нарушаются фиксация (Mallery et al., 2018), плавное прослеживание (Lizak et al., 2016) и вестибулоокулярные реакции (Huugen et al., 1990). Большинство этих нарушений усугубляются наличием

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

межъядерной офтальмоплегии (INO). INO – нейроофтальмическое заболевание, встречающееся примерно у одного из трех пациентов с рассеянным склерозом (Jozefowicz-Korczynska, Łukomski & Pajor, 2008) и характеризующееся нарушением аддукции сопряженных боковых движений глаз. Наличие INO часто является решающим фактором для подтверждения диагноза рассеянного склероза, особенно если он двусторонний (Bolanos, Lozano & Cantu, 2004), но его субклинические проявления трудно выявить без количественных подходов (Matsumoto et al., 2011).

Фронтальные, дополнительные и теменные поля глаза, префронтальная и задняя теменная кора проецируются на структуры ствола мозга, контролирующие саккады через верхние холмики, таламус и базальные ганглии. Внутри этой стволово-теменно-височной и базально-ганглийно-лобной нейтральной сети существует двустороннее взаимодействие между произвольными движениями глаз и переключениями внимания, при этом первое осуществляет контроль снизу вверх на второе, а второе оказывает влияние сверху вниз на первое. Кроме того, важную роль в отборе информации при свободном зрительном сканировании и поиске играют фиксационные саккады, микросаккады, причем скорость увеличивается в зависимости от размера сканируемой сцены и уровня информативности. Аномальное зрительное сканирование не является редкостью при Болезни Паркинсона, дефицит увеличивается при усложнении зрительных образов (Matsumoto et al., 2011). При БП также наблюдаются аномалии саккад, вызванные корковыми и подкорковыми нейродегенеративными изменениями (Rascol et al., 1989). Повышенная латентность саккад, нарушение программирования и выполнения саккад, частота ошибок и снижение амплитуды саккад типичны для пациентов с идиопатической недеменционной болезнью Паркинсона (Beylergil et al., 2022).

3.1 Демиелинизирующие болезни центральной нервной системы (G35–G37) + экстрапирамидные и другие двигательные нарушения (G20–G26)

3.1.1 Рассеянный склероз (G35) и болезнь Паркинсона (G20)

SONDA (Standardized Oculomotor and Neurological Disorder Assessment) тест основан на анализе отслеживания движения глаз, записанного во время короткой и интуитивно понятной задачи непрерывного отслеживания. Зрительный стимул представлен гауссовым пятном повышенной яркости, движущимся по траектории случайного блуждания на однотонном сером фоне (~140 кд/м²). Было два условия предъявления стимула: в условии плавного отслеживания стимул двигался непрерывно по пути случайного блуждания, а в условии саккадического отслеживания к траектории добавлялось дополнительное позиционное смещение в случайное место на экране, которое происходило каждые 2 с. С помощью подхода SONDA, представленного в исследовании Grillini et al. (2020), при рассеянном склерозе

было обнаружено сохранение плавных реакций преследования и две аномальные особенности в состоянии саккадического преследования, но у этого вывода есть ограничение в размере выборки (пациенты с болезнью Паркинсона: $n = 9$, пациенты с рассеянным склерозом: $n = 12$, контрольная группа: $n = 50$). При БП в запущенных случаях следует ожидать более медленные саккады. Одним из характерных глагодвигательных нарушений при БП является нарушение самогенерируемых саккад при относительной сохранности зрительно-управляемых саккад, которые ухудшаются по мере прогрессирования заболевания. Большинство ошибок совершается, когда пациентам с БП приходится переключаться между инструкциями (например, переключением между про- и антисаккадами) (Grillini, Renken, Vrijling, Neutink, & Cornelissen, 2020).

В исследовании (Brien, Riek, Yep, Huang, Coe, & Areshenkoff, 2023) пациентам с Болезнью Паркинсона ($n = 121$: 45 когнитивно сохранных/45 МСI/20 деменции/11 других) и контрольной группе ($n = 106$) была дана задача про/антисаккады. По параметрам саккад, зрачков и моргания классификатор достиг чувствительности 83% и специфичности 78%. Оценки уверенности предсказывали показатели моторики и когнитивных функций БП. Полученная модель может использоваться в качестве дополнительного инструмента скрининга в клинике.

Были также измерены движения глаз, горизонтальные и вертикальные векторы углового положения правого и левого глаза с помощью видеоокулографии высокого разрешения в когорте пациентов с болезнью Паркинсона, которые просматривали пустую сцену и изображения с реальной сценой. Последнее было связано с задачей поиска объекта среди других объектов в ожидаемом и неожиданном месте. Группе людей с болезнью Паркинсона потребовалось больше времени, чтобы найти объект. Окончательное время ответа было сопоставимым как у пациентов с болезнью Паркинсона, так и у контрольной группы (пациенты с Болезнью Паркинсона: $n = 13$, контрольная группа: $n = 7$). Продолжительность фиксации была сопоставима в двух группах, но наблюдалась тенденция к снижению для стимулов, располагающихся в нетипичных местах. Участники с болезнью Паркинсона совершали больше фиксационных саккад со значительно большей амплитудой и меньше нефиксационных саккад со значительно меньшей амплитудой во время просмотра пустой сцены. Однако общая область сканирования пустой сцены не была затронута болезнью Паркинсона. Участники с болезнью Паркинсона при зрительном поиске целевого объекта совершали меньше нефиксационных саккад с амплитудой, сравнимой со здоровым контролем. Фиксационные саккады во время зрительного поиска были больше при болезни Паркинсона, особенно когда мишень была помещена в неожиданное место, но частота не изменилась (Beylergil, Kilbane, Shaikh & Ghasia, 2022).

4. Класс XIX Травмы, отравления и некоторые другие последствия воздействия внешних причин

4.1 Травмы головы

Сотрясение мозга является результатом биомеханического воздействия на голову, которое нарушает нормальное функционирование мозга (McCroory et al., 2009). Для сохранности зрения и вестибулоокулярных рефлексов необходима целостность многочисленных областей головного мозга (затылочная доля, теменная доля, лобное поле глаза, ствол мозга, а также соединяющих их путей) (Ciuffreda et al., 2007). Поскольку сотрясение мозга, вероятно, представляет собой диффузно-распределенную травму, нарушения зрения могут иметь высокую распространенность (Zahid et al., 2020).

4.1.1. Сотрясение мозга (S06.0)

Цель исследования (Oldham, Meehan III, & Howell, 2021) заключалась в том, чтобы (1) изучить взаимосвязь между симптомами, о которых сообщают пациенты, и нарушениями отслеживания движений глаз, связанными с сотрясением мозга, и (2) сравнить качество походки между (а) подростками с сотрясением мозга, у которых нормальное отслеживание глаз, (б) подростками с сотрясением мозга, у которых нарушено отслеживание движений глаз, и (с) участниками из контрольной группы (участники с сотрясением мозга: $n = 30$, группа контроля: $n = 30$). Была проведена оценка ВОХ (показатель расхождения зрачков), применена шкала симптомов после сотрясения мозга (PCSS), скорость ходьбы измерялась с помощью трехосных инерционных измерительных единиц. В группе с сотрясением мозга и нарушением отслеживания движений глаз наблюдалась более высокая общая тяжесть симптомов, а также худшая тяжесть симптомов по 5 профилям симптомов PCSS. В айтрекинговом исследовании участники смотрели короткое видео, которое перемещалось по экрану. Группа с сотрясением мозга и аномальной способностью отслеживать взгляд имела худшую общую тяжесть симптомов и более высокие баллы по каждому из 5 профилей симптомов, чем группы с нормальным отслеживанием глаз и здоровые контрольные группы. Кроме того, группа с аномальным отслеживанием глаз ходила с более медленной скоростью при выполнении одной и двух задач, хотя разница не была статистически значимой. Авторы приходят к выводу, что отслеживание глаз является клинически полезным инструментом для выявления зрительных и двигательных нарушений после сотрясения мозга, и говорят о необходимости дальнейших исследований, чтобы определить, может ли отслеживание глаз помочь клиницистам в наблюдении за людьми, подверженными риску длительного восстановления после сотрясения мозга.

Авторами (Zahid et al., 2020) автоматизированный алгоритм отслеживания глаз оценивается как биомаркер сотрясения мозга, определяемый его симптомами

и клиническими признаками недостаточности конвергенции и дисфункции аккомодации в педиатрической популяции (дети с сотрясением мозга: $n = 56$, контрольная группа: $n = 83$). Были получены показатели, сравнивающие скорость и сопряженность движений глаз с течением времени, которые сравнивались с корреляцией между показателями оценки острого сотрясения мозга (АСЕ), конвергенцией и дисфункцией аккомодации. Двенадцать показателей отслеживания глаз значительно различались у детей с сотрясением мозга и без него. Модель для классификации сотрясения мозга как диагностируемого по его симптомам, оцененным с использованием АСЕ, достигла площади под кривой (AUC) = 0,854 (чувствительность 71,9%, специфичность 84,4%, перекрестно подтвержденная AUC = 0,789). Модель отслеживания глаз, созданная для выявления инвалидности вблизи точки конвергенции (NPC), достигла специфичности 95,8% и чувствительности 57,1% при AUC = 0,810. Отслеживание глаз коррелировало с симптомами сотрясения мозга и выявило нарушения конвергенции и аккомодации, связанные с сотрясением мозга в педиатрической популяции. Была продемонстрирована полезность в качестве быстрого, объективного и неинвазивного метода диагностики сотрясения мозга.

Заключение

Движения глаз являются вероятно наилучшим способом оценки состояния механизмов головного мозга, определяющих целенаправленную деятельность человека. На основании измерения характеристик движения глаз можно измерить эффективность этой деятельности. Проведенный анализ показал, что в качестве преимуществ айтрекинга перед другими методами возможно выделить: объективность, выражающуюся в независимости от интерпретации сложного когнитивного состояния диагностом, кратком и бесстрессовом наблюдением за пациентами, возможности упрощения предъявляемых задач при высокой точности диагностики, нахождении симулированного расстройства, дополнении существующих тестов, поиске латентных признаков (особенно характерно для моделей на основе машинного обучения), более высокой чувствительности по сравнению с некоторыми нейропсихологическими тестами, возможности динамического переключения между задачами. К общим чертам построения исследований в области медицинской диагностики можно отнести:

- Использование существующих парадигм проведения айтрекинговых исследований;
- Комбинация новых парадигм с существующими нейропсихологическими тестами и методиками;
- Наследование базовых принципов обследования состояния пациента;
- Построение моделей анализа данных;
- Построение моделей целенаправленного поведения человека.

Айтрекинг как возможный метод медицинской диагностики обладает высоким потенциалом для дополнения и уточнения других методов исследования. В качестве дальнейшего направления развития данного метода необходимо валидировать протоколы на расширенной выборке, оценить достаточность стимульного материала для ожидаемой глазодвигательной реакции, рассмотреть возможность комбинирования с уже принятыми методами диагностики для получения дополнительной информации.

Литература

- Барабанщиков, В. А., Жегалло, А. В. (2014). Методы регистрации движений глаз в психологии: основы учебно-методического комплекса. *Экспериментальная психология*, 7(1), 132–137.
- Бондаренко, В. А., Гузенко, Н. В. (2021). Цифровизация сферы здравоохранения России: «умные технологии» в обеспечении качества жизни. *Bulletin of the South-Russian State Technical University (NPI) Series Socio-Economic Sciences*, 14(1), 103–113.
- Доан, Т. М., Крестьянинова, О. Г., Плотников, В. А. (2023). Цифровизация здравоохранения: перспективные инструменты. *Экономика и управление*, 29(2), 132–140.
- Заболотная, Н. В., Гатилова, И. Н., Заболотный, А. Т. (2020). Цифровизация здравоохранения: достижения и перспективы развития. *Экономика. Информатика*, 47(2), 380–389.
- Карпов, В. А. (1975). *О некоторых результатах исследования особенностей управления взором при синдромах поражения лобных систем мозга*. Б.Ф. Ломов, Н.Ю. Вергилес (ред.) В: *Моторные компоненты зрения*. Наука М.
- Огнев, А. С., Лихачева, Э. В. (2015). Валидность айтрекинга как инструмент психодиагностики. *Успехи современного естествознания*, 1-8, 1311–1314.
- Скуратова, К. А., Шелепин, Е. Ю., Яровая, Н. П. (2021). Оптический поиск и зрительный навык. *Оптический журнал*, 88(12), 28.
- Ales, F., Giromini, L., Warmelink, L., Polden, M., Wilcockson, T., Kelly, C. & Crawford, T. (2021). An eye tracking study on feigned schizophrenia. *Psychological Injury and Law*, 14(3), 213–226.
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders* (5th ed.).
- Barsznica, Y., Noiret, N., Lambert, B., Monnin, J., De Pinho, C., Hickel, J. & Chopard, G. (2021). Saccadic eye movements in elderly depressed patients with suicidal behaviors: an exploratory eye-tracking study. *Frontiers in psychology*, 12, 712347.
- Beylergil, S. B., Kilbane, C., Shaikh, A. G., & Ghasia, F. F. (2022). Eye movements in Parkinson's disease during visual search. *Journal of the Neurological Sciences*, 440, 120299.
- Bolanos, I., Lozano, D., & Cantu, C. (2004). Internuclear ophthalmoplegia: causes and long-term follow-up in 65 patients. *Acta Neurologica Scandinavica*, 110(3), 161–165.
- Bremmer, F., Duhamel, J. R., Hamed, S. B., & Graf, W. (2000). Stages of self-motion processing in primate posterior parietal cortex. *International Review of Neurobiology*, 44, 173–198.
- Brien, D. C., Riek, H. C., Yep, R., Huang, J., Coe, B., Areshenkoff, C. & ONDRI Investigators. (2023). Classification and staging of Parkinson's disease using video-based eye tracking. *Parkinsonism & Related Disorders*, 110, 105316.
- Carvalho, N., Laurent, E., Noiret, N., Chopard, G., Haffen, E., Bennabi, D., & Vandael, P. (2015). Eye movement in unipolar and bipolar depression: A systematic review of the literature. *Frontiers in psychology*, 6, 1809.
- Ciuffreda, K. J., Kapoor, N., Rutner, D., Suchoff, I. B., Han, M. E., & Craig, S. (2007). Occurrence of oculomotor dysfunctions in acquired brain injury: a retrospective analysis. *Optometry-Journal of the American Optometric Association*, 78(4), 155–161.

- Córdoba, A. C., Cena, C. E. G., Lage, C., & Juan, P. S. (2023). *Eye Tracking and Machine Learning Non-invasive Biomarker for Alzheimer's Disease and Frontotemporal Dementia Diagnosis*. In: Proceedings of the Latin American Congress on Automation and Robotics (pp. 113–122). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Davis, R., & Sikorskii, A. (2020). Eye tracking analysis of visual cues during wayfinding in early stage Alzheimer's disease. *Dementia and geriatric cognitive disorders*, 49(1), 91–97.
- Dreher, J. C., & Grafman, J. (2002). The roles of the cerebellum and basal ganglia in timing and error prediction. *European Journal of Neuroscience*, 16(8), 1609–1619.
- Fabisch, K., Fitz, W., Fabisch, H., Haas-Krammer, A., Klug, G., Zapotoczky, S., & Kapfhammer, H. P. (2009). Sinusoidal smooth pursuit eye tracking at different stimulus frequencies: position error and velocity error before catch-up saccades in schizophrenia and in major depressive disorder. *Australian & New Zealand Journal of Psychiatry*, 43(9), 855–865.
- Goto, Y., Hatakeyama, K., Kitama, T., Sato, Y., Kanemura, H., Aoyagi, K. & Aihara, M. (2010). Saccade eye movements as a quantitative measure of frontostriatal network in children with ADHD. *Brain and Development*, 32(5), 347–355.
- Grillini, A., Renken, R. J., Vrijling, A. C., Heutink, J., & Cornelissen, F. W. (2020). Eye movement evaluation in multiple sclerosis and Parkinson's disease using a standardized oculomotor and neuro-ophthalmic disorder assessment (SONDA). *Frontiers in Neurology*, 11, 971.
- Guo, C., Ashrafian, H., Ghafur, S., Fontana, G., Gardner, C., & Prime, M. (2020). Challenges for the evaluation of digital health solutions—A call for innovative evidence generation approaches. *NPJ Digital Medicine*, 3(1), 110.
- Heilman, K. M., Watson, R. T., Valenstein E. (1993). *Neglect and related disorders*. New York Oxford University Press.
- Huang, G., Li, Y., Zhu, H., Feng, H., Shen, X., & Chen, Z. (2023). Emotional stimulation processing characteristics in depression: Meta-analysis of eye tracking findings. *Frontiers in Psychology*, 13, 1089654.
- Hutton, J. T., Nagel, J. A., & Loewenson, R. B. (1984). Eye tracking dysfunction in Alzheimer-type dementia. *Neurology*, 34(1), 99–99.
- Huygen, P. L. M., Verhagen, W. I. M., Hommes, O. R., & Nicolaisen, M. G. M. (1990). Short vestibule-ocular reflex time constants associated with oculomotor pathology in multiple sclerosis. *Acta oto-laryngologica*, 109(1–2), 25–33.
- Jozefowicz-Korczynska, M., Łukomski, M., & Pajor, A. (2008). Identification of internuclear ophthalmoplegia signs in multiple sclerosis patients: saccade test analysis. *Journal of neurology*, 255, 1006–1011.
- Karpov, A. R. Luria, A. L., & Yarus, A. L. (1968) Disturbances of the structure of active perception in lesions of the posterior and anterior regions of the brain. *Neuropsychologia*, 6(2), 157–166.
- Kaufmann, B. C., Cazzoli, D., Pflugshaupt, T., Bohlhalter, S., Vanbellingen, T., Müri, R. M. & Nyffeler, T. (2020). Eyetracking during free visual exploration detects neglect more reliably than paper-pencil tests. *Cortex*, 129, 223–235.
- Kaufman, L. D., Pratt, J., Levine, B., & Black, S. E. (2010). Antisaccades: a probe into the dorsolateral prefrontal cortex in Alzheimer's disease. A critical review. *Journal of Alzheimer's Disease*, 19(3), 781–793.
- Kojima, T., Matsushima, E., Ohta, K., Toru, M., Han, Y. H., Shen, Y. C. & Prilipko, L. (2001). Stability of exploratory eye movements as a marker of schizophrenia—a WHO multi-center study. *Schizophrenia Research*, 52(3), 203–213.
- Kong, X. J., Wei, Z., Sun, B., Tu, Y., Huang, Y., Cheng, M., & Wan, G. (2022). Different eye tracking patterns in autism spectrum disorder in toddler and preschool children. *Frontiers in Psychiatry*, 13, 899521.

- Lencer, R., Nagel, M., Sprenger, A., Heide, W., & Binkofski, F. (2005). Reduced neuronal activity in the V5 complex underlies smooth-pursuit deficit in schizophrenia: evidence from an fMRI study. *Neuroimage*, 24(4), 1256–1259.
- Lev, A., Braw, Y., Elbaum, T., Wagner, M., & Rassovsky, Y. (2022). Eye tracking during a continuous performance test: Utility for assessing ADHD patients. *Journal of Attention Disorders*, 26(2), 245–255.
- Li, H., Wang, Q., Hou, W. P., Chen, D. Y., Ding, Y. S., Zhang, Z. F. & Wang, C. Y. (2024). Further clarification of cognitive processes of prospective memory in schizophrenia by comparing eye-tracking and ecologically-valid measurements. *Schizophrenia*, 10(1), 41.
- Lizak, N., Clough, M., Millist, L., Kalincik, T., White, O. B., & Fielding, J. (2016). Impairment of smooth pursuit as a marker of early multiple sclerosis. *Frontiers in Neurology*, 7, 228947.
- Luria, A. R., Karpov, B. A., & Yarus, A. L. (1966). Disturbances of active visual perception with lesions of frontal lobes. *Cortex*, 2(2), 202–212.
- Mallery, R. M., Poolman, P., Thurtell, M. J., Full, J. M., Ledolter, J., Kimbrough, D. & Kardou, R. H. (2018). Visual fixation instability in multiple sclerosis measured using SLO-OCT. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 59(1), 196–201.
- Mantokoudis, G., Korda, A., Zee, D. S., Zamaro, E., Sauter, T. C., Wagner, F., & Caversaccio, M. D. (2021). Bruns' nystagmus revisited: a sign of stroke in patients with the acute vestibular syndrome. *European Journal of Neurology*, 28(9), 2971–2979.
- Martinez, A., Hillyard, S. A., Dias, E. C., Hagler, D. J., Butler, P. D., Guilfoyle, D. N. & Javitt, D. C. (2008). Magnocellular pathway impairment in schizophrenia: evidence from functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience*, 28(30), 7492–7500.
- Matsumoto, H., Terao, Y., Furubayashi, T., Yugeta, A., Fukuda, H., Emoto, M. & Ugawa, Y. (2011). Small saccades restrict visual scanning area in Parkinson's disease. *Movement Disorders*, 26(9), 1619–1626.
- Maza, A., Moliner, B., Ferri, J., & Llorens, R. (2020). Visual behavior, pupil dilation, and ability to identify emotions from facial expressions after stroke. *Frontiers in Neurology*, 10, 484567.
- Mengoudi, K., Ravi, D., Yong, K. X., Primativo, S., Pavisic, I. M., Brotherhood, E., Alexander, D. C. (2020). Augmenting dementia cognitive assessment with instruction-less eye-tracking tests. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 24(11), 3066–3075.
- McCorry, P., Meeuwisse, W., Johnston, K., Dvorak, J., Aubry, M., Molloy, M., & Cantu, R. (2009). Consensus statement on Concussion in Sport. *South African Journal of Sports Medicine*, 21(2).
- Nakamagoe, K., Yamada, S., Kawakami, R., Koganezawa, T., & Tamaoka, A. (2019). Abnormal saccadic intrusions with Alzheimer's disease in darkness. *Current Alzheimer Research*, 16(4), 293–301.
- Oldham, J. R., Meehan III, W. P., & Howell, D. R. (2021). Impaired eye tracking is associated with symptom severity but not dynamic postural control in adolescents following concussion. *Journal of Sport and Health Science*, 10(2), 138–144.
- Oliveira, J. S., Franco, F. O., Revers, M. C., Silva, A. F., Portolese, J., Brentani, H., & Nunes, F. L. (2021). Computer-aided autism diagnosis based on visual attention models using eye tracking. *Scientific Reports*, 11(1), 10131.
- Papagiannopoulou, E. A., Chitty, K. M., Hermens, D. F., Hickie, I. B., & Lagopoulos, J. (2014). A systematic review and meta-analysis of eye-tracking studies in children with autism spectrum disorders. *Social Neuroscience*, 9(6), 610–632.
- Pierrot-Deseilligny, E., & Burke, D. (2005). *The circuitry of the human spinal cord: its role in motor control and movement disorders*. Cambridge university press.
- Polden, M., & Crawford, T. J. (2021). Active visual inhibition is preserved in the presence of a distracter: A cross-cultural, ageing and dementia study. *Cortex*, 142, 169–185.

- Rantanen, M., Hautala, J., Loberg, O., Nuorva, J., Hietanen, J. K., Nummenmaa, L., & Astikainen, P. (2021). Attentional bias towards interpersonal aggression in depression—An eye movement study. *Scandinavian Journal of Psychology*, *62*(5), 639–647.
- Rascol, O., Clanet, M., Montastruc, J. L., Simonetta, M., Soulier-Esteve, M. J., Doyon, B., & Rascol, A. (1989). Abnormal ocular movements in Parkinson's disease: evidence for involvement of dopaminergic systems. *Brain*, *112*(5), 1193–1214.
- Rieke, N., Hancox, J., Li, W., Milletari, F., Roth, H. R., Albarqouni, S., & Cardoso, M. J. (2020). The future of digital health with federated learning. *NPJ Digital Medicine*, *3*(1), 1–7.
- Rosano, C., Krisky, C. M., Welling, J. S., Eddy, W. F., Luna, B., Thulborn, K. R., & Sweeney, J. A. (2002). Pursuit and saccadic eye movement subregions in human frontal eye field: a high-resolution fMRI investigation. *Cerebral Cortex*, *12*(2), 107–15.
- Russell, L. L., Greaves, C. V., Convery, R. S., Bocchetta, M., Warren, J. D., Kaski, D., & Rohrer, J. D. (2021). Eye movements in frontotemporal dementia: Abnormalities of fixation, saccades and anti-saccades. *Alzheimer's & Dementia: Translational Research & Clinical Interventions*, *7*(1), e12218.
- Russell, L. L., Greaves, C. V., Convery, R. S., Nicholas, J., Warren, J. D., Kaski, D., & Rohrer, J. D. (2021). Novel instructionless eye tracking tasks identify emotion recognition deficits in frontotemporal dementia. *Alzheimer's Research & Therapy*, *13*, 1–11.
- Schall, J. D. (2004). On the role of frontal eye field in guiding attention and saccades. *Vision Research*, *44*(12), 1453–1467.
- Serra, A., Chisari, C. G., & Matta, M. (2018). Eye movement abnormalities in multiple sclerosis: pathogenesis, modeling, and treatment. *Frontiers in Neurology*, *9*, 313229.
- Serra, A., Derwenskus, J., Downey, D. L., & Leigh, R. J. (2003). Role of eye movement examination and subjective visual vertical in clinical evaluation of multiple sclerosis. *Journal of Neurology*, *250*, 569–575.
- Skuratova, K. A., Shelepin, E. Y., Malashin, R. O., & Shelepin, Y. E. (2022). Image analysis and error detection in source software code. *Journal of Optical Technology*, *89*(8), 476–483.
- Sweere, D. J., Pel, J. J., Kooiker, M. J., van Dijk, J. P., van Gemert, E. J., Hurks, P. P. & Hendriksen, J. G. (2022). Clinical utility of eye tracking in assessing distractibility in children with neurological disorders or ADHD: A cross-sectional study. *Brain Sciences*, *12*(10), 1369.
- Tadokoro, K., Yamashita, T., Fukui, Y., Nomura, E., Ohta, Y., Ueno, S., & Abe, K. (2021). Early detection of cognitive decline in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease with a novel eye tracking test. *Journal of The Neurological Sciences*, *427*, 117529.
- Tsang, V., & Chu, P. C. K. (2018). Comparing eye-tracking data of children with high-functioning ASD, comorbid ADHD, and of a control watching social videos. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (142), e58694.
- Vacas, J., Antolí, A., Sánchez-Raya, A., Pérez-Dueñas, C., & Cuadrado, F. (2021). Visual preference for social vs. non-social images in young children with autism spectrum disorders. An eye tracking study. *Plos One*, *16*(6), e0252795.
- Wang, Y., Lyu, H. L., Tian, X. H., Lang, B., Wang, X. Y., St Clair, D. & Zhao, J. (2022). The similar eye movement dysfunction between major depressive disorder, bipolar depression and bipolar mania. *The World Journal of Biological Psychiatry*, *23*(9), 689–702.
- Zahid, A. B., Hubbard, M. E., Lockyer, J., Podolak, O., Dammmavalam, V. M., Grady, M. & Master, C. L. (2020). Eye tracking as a biomarker for concussion in children. *Clinical Journal of Sport Medicine*, *30*(5), 433–443.

Поступила в редакцию: 19.06.2024

Поступила после рецензирования: 15.08.2024

Принята к публикации: 02.09.2024

Заявленный вклад авторов

Евгений Юрьевич Шелепин – работа с литературными источниками, написание и анализ текста статьи;

Ксения Андреевна Скуратова – работа с литературными источниками, написание и анализ текста статьи;

Полина Александровна Лехницкая – работа с литературными источниками, написание и анализ текста статьи;

Константин Юрьевич Шелепин – работа с литературными источниками, написание и анализ текста статьи.

Информация об авторах

Евгений Юрьевич Шелепин – научный сотрудник лаборатории психофизиологии речи, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии им. И. П. Павлова Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Scopus Author ID: 57224279100; SPIN-код РИНЦ: 5938-7368; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3124-5540>; e-mail: ShelepinEY@infran.ru

Ксения Андреевна Скуратова – младший научный сотрудник лаборатории физиологии зрения, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии им. И. П. Павлова Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Scopus Author ID: 57216979736; SPIN-код РИНЦ: 5940-0930; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8371-4348>; e-mail: kseksuratova@gmail.com

Полина Александровна Лехницкая – студент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Российская Федерация; Scopus Author ID: 58683671900; SPIN-код РИНЦ: 2796-3501; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3689-3213>; e-mail: lekhnitskaya.polina@gmail.com

Константин Юрьевич Шелепин – кандидат медицинских наук, научный сотрудник лаборатории психофизиологии речи, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии им. И. П. Павлова Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Scopus Author ID: 57148212900; SPIN-код РИНЦ: 4250-4127; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2218-9716>; e-mail: shelepink@yandex.ru

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.