



**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ТРЕКИНГА ДВИЖЕНИЯ ГЛАЗ  
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НЕВРОЛОГИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ  
(обзор литературы)**

Д.М. ШАНХОЕВА, Э.Ш. САМЕДОВА, П.П. ТРЕГУБ

*ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет им. Сеченова Минздрава  
России, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2, г. Москва, 119991, Россия*

**Аннотация. Введение.** Айтрекинг-технология записи и анализа глазодвигательной активности в реальном времени, основанная на системе машинного зрения. Это неинвазивный и объективный метод исследования функциональных нервных путей. Благодаря технологическому прогрессу и разработке экономичных и портативных айтрекеров, исследования айтрекинга становятся все более популярными. **Цель работы** – систематизация актуальных данных об использовании метода айтрекинга и устройствах для реализации этой технологии. **Результаты и их обсуждение.** Метод оценки движений глаз используется в различных сферах медицины, он особенно актуален для диагностики таких неврологических заболеваний, как болезнь Паркинсона, болезнь Альцгеймера, болезнь Хантингтона, рассеянный склероз и боковой амиотрофический склероз. Эти заболевания сопровождаются глазодвигательными нарушениями, такими как нарушения плавного слежения, саккад, фиксаций, нистагм и когнитивными расстройствами, например, исполнительной дисфункцией, когнитивным дефицитом, нарушением зрительной обработки, снижением памяти. В настоящее время для их диагностики и оценки прогрессирования заболевания используют тесты на бумаге и шкалы оценки неврологического дефицита, однако они не отличаются высокой точностью и объективностью. Метод айтрекинга облегчает диагностику у пациентов с тяжелыми речевыми и двигательными нарушениями. Отслеживание движений глаз выполняется с помощью видеоокулографии и других современных методов. Широко используются айтрекеры на базе шлемов виртуальной реальности, а также экранные айтрекеры и очки со встроенными камерами. **Выводы.** Интеграция тестов «с бумагой и карандашом» в метод айтрекинга, и его корреляция с точными инструментальными методами ускорит диагностику неврологических заболеваний и сделает ее более точной и доступной для пациентов с разными формами глазодвигательных и когнитивных дисфункций.

**Ключевые слова:** айтрекинг, неврологические заболевания, когнитивные нарушения, глазодвигательные нарушения, болезнь Паркинсона, болезнь Альцгеймера, боковой амиотрофический склероз, машинное зрение.

**USE OF EYE MOVEMENT TRACKING  
FOR THE DIAGNOSIS OF NEUROLOGICAL DISORDERS  
(literature review)**

D.M. SHANKHOEVA, E.SH. SAMEDOVA, P.P. TREGUB

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “First Moscow State Medical  
University named after Sechenov” of the Ministry of Health of Russia,  
8-2 Trubetskaya St., Moscow, 119991, Russia*

**Abstract. Introduction.** Eye-tracking is a real-time technology for recording and analysing the oculomotor activity based on a machine vision system. It is a non-invasive and objective method of functional nerve pathway research. Due to technological progress and the development of cost-effective and portable eye-trackers, eye-tracking studies are becoming increasingly popular. **Purpose of the study** is to systematise the current data on the use of the eye-tracking method and devices for the implementation of this technology. **Results and their discussion.** The method of eye movement assessment is used in various spheres of medicine, it is especially relevant for the diagnosis of such neurological diseases as Parkinson’s disease, Alzheimer’s disease, Huntington’s disease, multiple sclerosis and amyotrophic lateral sclerosis. These diseases are accompanied by oculomotor disturbances such as smooth tracking, saccades, fixations, nystagmus and cognitive disorders such as executive dysfunction, cognitive deficits, impaired visual processing, and memory decline. Currently, paper-based tests and neurological deficit rating scales are used to diagnose them and assess disease progression, but they are not highly accurate or objective. The eye-tracking method facilitates diagnosis in patients with severe speech and motor disorders. Eye movement tracking is performed using video oculography and other modern methods. Eyetrackers based on virtual reality helmets are widely used, as well as on-screen eyetrackers and

glasses with built-in cameras. **Conclusions.** The integration of “paper-and-pencil” tests into the eye-tracking method, and its correlation with accurate instrumental methods will accelerate the diagnosis of neurological diseases and make it more accurate and accessible for patients with various forms of oculomotor and cognitive dysfunction.

Keywords: eye-tracking, neurological diseases, cognitive disorders, oculomotor disorders, Parkinson’s disease, Alzheimer’s disease, amyotrophic lateral sclerosis, machine vision.

**Введение.** Айтрекинг – это технология, используемая для определения ориентации оптической оси глазного яблока в пространстве. Айтрекинг отмечает информацию о взгляде в форме саккад, при которых глаз быстро переходит от одного объекта к другому, плавного слежения, позволяющего отслеживать движущиеся объекты, рефлексорных движений глаз, которые стабилизируют зрение, и конвергентных движений, которые координируют работу обоих глаз для обеспечения бинокулярной фиксации на разной глубине, также отслеживаются фиксации и размеры зрачка [1]. Фиксации возникают, когда человек фокусирует свое внимание на точке в пространстве (обычно на экране) в течение определенного времени. Количество, частота и продолжительность фиксации измеряются, чтобы отразить время фиксации внимания [2]. Существует несколько классов микроскопических движений глаз, связанных с фиксацией, наиболее изученными из которых являются микросаккады, микротремор и дрейф [75]. Саккады же представляют собой быстрые движения глаз, позволяющие сканировать зрительную сцену. Анализ угла саккады и направлений сканирования помогает различать как стимулированные, так и самостоятельные изменения исполнительных функций, в том числе внимания [3]. Наличие нистагма при глазодвигательном исследовании обычно является отклонением от нормы [75]. Нистагм делят на изолированный врожденный, маятниковый и свободный латентный [76] (рис. 1).

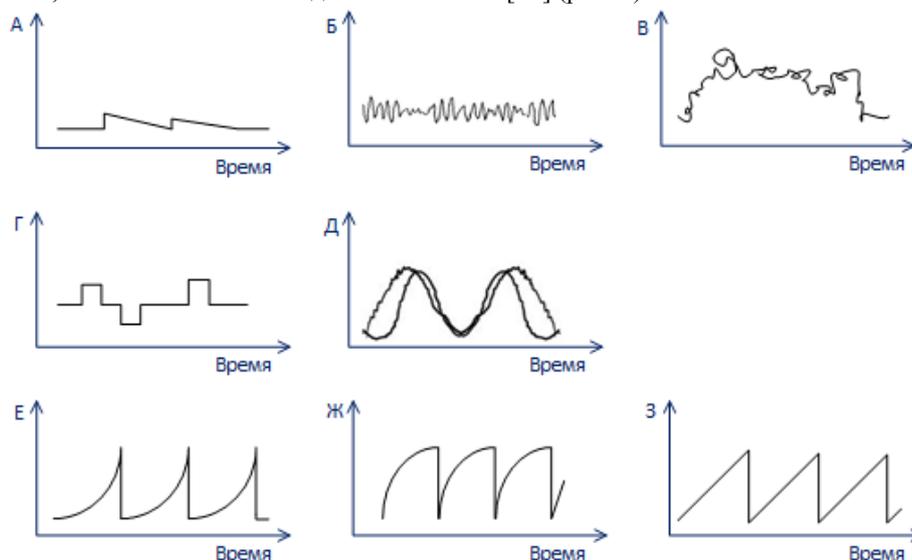


Рис. Основные глазодвигательные параметры

Примечание: А, Б, В – фиксации (А – микросаккады, Б – микротремор, В – дрейф), Г – саккады, Д – нарушение плавного преследования, Е – изолированный нистагм, Ж – свободный латентный нистагм, З – маятниковый нистагм

Технология отслеживания взгляда применяется в разных сферах медицины. Известно о его использовании в оценке рабочей нагрузки в хирургии [5], успешности эстетического лечения пациентов с челюстно-лицевыми патологиями на основе зрительного восприятия людей со стороны [6] и в качестве инструмента для выявления ошибок в распознавании полипов толстой кишки при эндоскопическом исследовании. Айтрекинг используется для выявления определенных визуальных паттернов, связанных с более высокой частотой обнаружения полипов [7]. Успешная идентификация полипов зависит от многих факторов, и одним из этих факторов являются стратегии визуального поиска. Анализ взгляда показал, что повышенная концентрация внимания на периферии эндоскопического монитора и просвете кишечника связан с более высокой частотой обнаружения поражений органа [83,84]. Айтрекинг активно применяется для оценки потребления алкоголя путем отслеживания глазодвигательных нарушений, связанных со снижением функционирования мозжечка при алкогольной интоксикации, и исполнительных дисфункций [8]. Особенно важным является его применение в диагностике неврологических расстройств, таких как миастения Гравис [9], аутизм [10], черепно-мозговая травма [11], инсульт, болезнь Паркинсона, болезнь Альцгеймера, болезнь Хантингтона, билатеральный амиотрофический склероз, эпилепсия,

рассеянный склероз [12]. При этих заболеваниях с помощью технологии айтрекинга исследуются глазодвигательные и когнитивные нарушения [13].

Исследования трекинга глаз набирают популярность за счет быстрого технологического прогресса, а также разработки экономичных и портативных айтрекеров [14].

В клинической практике трекинг глаз может существенно облегчить дифференциальную диагностику. Текущий обзор ориентирован на систематизацию актуальных данных об использовании этого метода при диагностике неврологических заболеваний.

**Айтрекинг в диагностике глазодвигательных нарушений при неврологических заболеваниях.** Глазодвигательные нарушения являются симптомом многих неврологических заболеваний [15]. Следовательно, для ранней диагностики неврологических расстройств необходимо уделять большое внимание оценке глазодвигательных функций при осмотре.

Различные окуломоторные нарушения возникают при преимущественной локализации очагов поражения в мозжечке и стволе головного мозга [15]. Так, среди нарушений моторики, характерных для патологии нервной системы, чаще наблюдаются нистагм, нарушения саккад и плавного преследования. Причиной появления изолированного горизонтального установочного нистагма является поражение подъязычного ядра, характерный признак рассеянного склероза, а вертикального нистагма – повреждение в интерстициальном ядре Кахала, например, при кровоизлиянии в среднем мозге. При комбинированном нистагме очаг дефекта локализуется в флоккулозе или парафлоккулозе, как и при нарушении плавного слежения. Изменения в понтомезенцифальной области приводят к появлению маятникообразного нистагма. Нарушения саккадических движений вызваны изменениями в разных структурах мозжечка и ствола мозга. Вертикальный надъядерный паралич зрения связан с поражением рострального интерстициального ядра медиального продольного пучка, горизонтальный надъядерный паралич зрения наблюдается при повреждении парамедианной ретикулярной формации моста. При гиперметрических саккадах задействованы ядра шатра мозжечка, при гипометрических – окуломоторная область червя мозжечка. Эти симптомы особенно характерны для рассеянного склероза, спиноцеребеллярной атаксии и различных мозжечковых дегенераций [15].

При болезни Паркинсона повреждаются нейроны экстрапирамидной системы, в первую очередь в чёрной субстанции и полосатом теле (участках мозга, ответственных за двигательные функции и тонус скелетных мышц). При этом из-за развивающейся дофаминергической дисфункции снижается чувствительность системы вознаграждения мозга. С этим связывают нарушения саккадических движений глаз [16].

Микросаккады, мелкие быстрые горизонтальные движения глаз, прерывающие период фиксации, возникают чаще всего при болезни Альцгеймера [17]. В Мешхедском университете с параллельным использованием ЭЭГ и айтрекинга исследовались характеристики движения глаз при выполнении задач на фиксации у пациентов с легкой степенью болезни Альцгеймера. Ученые выявили, что у пациентов с болезнью Альцгеймера общая продолжительность фиксации была значительно меньше, а частота фиксации выше в сравнении с контрольной группой [18].

Ученые Института неврологии в Лондоне утверждают, что при болезни Хантингтона стоит уделить большее внимание повреждению мозжечка. Они провели исследование с участием 22 пациентов с болезнью Хантингтона, у которых были выявлены двигательные расстройства, в том числе нарушения саккад. При этом на результатах их МРТ были выявлены морфологические и диффузные аномалии мозжечка [19].

В исследовании больных с *боковым амиотрофическим склерозом* (БАС) у 11 из 18 пациентов (61%) было обнаружено нарушение следящего движения глаз. При этом у некоторых испытуемых на аутопсии была выявлена дегенерация нейронов черной субстанции и демиелинизация внутренней капсулы. Можно предположить, что дефект следящего движения является признаком поражения экстрапирамидных или супратенториальных структур [32].

Около 60–75% пациентов с *миастенией гравис* (МГ) имеют неспецифические глазные симптомы. Если вовремя не распознать эти симптомы, диагностика МГ может задержаться на срок до 5 лет и более, что приводит к снижению вероятности ремиссии и увеличению риска заболеваемости [9]. В неврологической клинике Университета Катании с 2019 по 2021 год проводили исследование на 14 пациентах с МГ, у которых изначально не было клинических признаков глазодвигательных дисфункций [20]. Результаты показали, что у пациентов с МГ саккады медленнее с более длительными латентными периодами, в отличие от людей с контрольной группы.

Несмотря на то, что врожденные нарушения метаболизма у взрослых до сих пор практически не изучены, аномалии движений глаз при этих патологиях довольно распространены и часто являются первыми признаками заболевания. Важно обнаружить глазодвигательные нарушения на начальных стадиях, поскольку раннее лечение может предотвратить или уменьшить дальнейшее повреждение головного мозга. Нарушения движения глаз можно разделить на центральные и периферические. Центральные формы часто наблюдаются при лизосомальных нарушениях накопления, таких как болезнь Ниманна-

Пика типа С, болезнь Гоше, болезнь Тея-Сакса, болезнь Сандгоффа и других. Периферические же формы являются ключевым признаком митохондриальных заболеваний, при которых глазодвигательные расстройства связаны с накоплением промежуточных метаболитов в нейронах вследствие дефицита ферментов [13].

Рассеянный склероз – это хроническое нейродегенеративное заболевание центральной нервной системы, которое является основной причиной нетравматической инвалидности у молодых людей во многих странах мира [89]. У большинства людей с рассеянным склерозом наблюдаются эфферентные зрительные дисфункции – от нарушений фиксации до смещения межзрачкового пространства [22]. Глазодвигательные нарушения выступают потенциальными биомаркерами прогрессирования заболевания, и их оценка может ускорить и облегчить лечение. При рассеянном склерозе окуломоторные изменения, такие как нистагм, нарушения фиксации, плавного следования, вестибуло-окулярного рефлекса, могут оставаться незамеченными, поскольку при систематическом обследовании метод отслеживания движения глаз не применяется на постоянной основе [89]. Технология отслеживания движений глаз позволяет обнаружить незначительную дисфункцию мозжечка у пациентов без атаксии [23]. Даже у очень молодых людей с дебютом рассеянного склероза в педиатрическом возрасте и без видимых нарушений при осмотре латентные саккадические движения могут свидетельствовать о потенциальной заболеваемости рассеянным склерозом [24].

Многие неврологические расстройства характеризуются глазодвигательными нарушениями на ранних стадиях, что делает метод айтрекинга особенно актуальным для их диагностики.

**Айтрекинг в диагностике когнитивных нарушений.** В последнее время все больше исследователей говорят о том, что показатели отслеживания взгляда не только передают основные глазодвигательные характеристики, но и отражают когнитивную функцию и позволяют спрогнозировать конкретные когнитивные нарушения [12].

Движение глаз напрямую не отражает показатели функции мозга, однако оно является дополнительным параметром в оценке связи между мозгом и поведением и представляют надежную информацию о процессах более высокого порядка, которые можно измерить по положению глаз, продолжительности фиксации, размеру зрачков. По этим параметрам можно судить о нейронных механизмах обучения, памяти, внимания, а также других когнитивных функциях [25].

Трекинг глаз является действенным методом для изучения когнитивных функций у младенцев [26], здоровых взрослых и людей с неврологическими расстройствами [27, 28].

Было обнаружено, что при выполнении таких глазодвигательных задач, как фиксации и плавное слежение, активируются многочисленные области мозга, включая лобно-островковую кору, переднюю поясную извилину, дополнительную двигательную область, верхние бугорки и таламус [29], непосредственно за продолжительность фиксации отвечает дорсолатеральная префронтальная кора [30]. Исполнительная функция осуществляется множеством корковых и подкорковых областей, которые активируются при саккадах, плавном преследовании, зрительном поиске и социальных действиях.

Многие неврологические расстройства сопровождаются когнитивными нарушениями, которые требуют ранней когнитивной оценки и длительного клинического наблюдения [31].

Задачи на отслеживание глаз, в том числе и саккадические, используются в качестве дополнительного метода при оценке когнитивной функции [44]. Данные отслеживания движений глаз подтвердили, что исполнительная дисфункция часто встречается при болезни Паркинсона и боковом амиотрофическом склерозе, тогда как болезнь Альцгеймера и рассеянный склероз характеризуются преимущественно дефицитом внимания [12]. Исследования когнитивных функций при эпилепсии с использованием технологии отслеживания взгляда пока находятся на ранних стадиях [73].

**Боковой амиотрофический склероз (БАС)** – прогрессирующее паралитическое заболевание, характеризующееся дегенерацией мотонейронов, контролирующих произвольные мышцы [33]. Помимо двигательных нарушений, у пациентов с БАС часто наблюдаются поведенческие и когнитивные нарушения [34]. Такие пациенты чаще допускают антисаккадные ошибки из-за неспособности подавлять рефлекторные саккадические движения глаз [35] и среди них чаще встречаются ранние саккады [36]. У пациентов с БАС нарушено распознавание эмоций, много времени занимает размышление, что связано с худшей производительностью [12]. Для оценки БАС широко используются традиционные тесты «бумаги и карандаша» (например, *Edinburgh Cognitive and Behavioral ALS Screen (ECAS)*) [37], однако, при средних и тяжелых стадиях БАС пациенты теряют способность говорить или писать в результате атрофии мотонейронов, и традиционные шкалы уже не подходят для когнитивной оценки [12].

Методы отслеживания движения глаз были протестированы вместе с традиционными оценочными шкалами с учетом, что они смогут дополнить или даже заменить их при диагностике запущенных состояний заболевания. Келлер обнаружил, что, когда пациенты с БАС решали задачи ECAS, направляя взгляд на ответ, отображаемый на экране, время тестирования значительно сокращалось [37]. По результатам исследования, пациенты с БАС хуже справлялись с заданиями в исполнительной сфере, как и ожидалось на основании наших знаний о когнитивных нарушениях при этом заболевании.

Праудфут и Витюк разработали задачи на просаккаду и антисаккаду, в которых участникам предлагалось совершать саккады по направлению к цели (просаккада) или от нее (антисаккада), следя за их глазами. Оба исследования позволили выявить исполнительную дисфункцию при БАС из-за более высокой частоты антисаккадных ошибок и увеличения латентного периода саккад [36, 38]. Также было отмечено увеличение частоты антисаккадных ошибок по мере увеличения инвалидности. Хотя предыдущие исследования не связывали глазодвигательную дисфункцию с тяжестью заболевания [39].

У пациентов с БАС были обнаружены низкие показатели социальной активности в сочетании с задачами по распознаванию эмоций [35]. Полетти и др. адаптировали тест «Чтение мыслей по глазам» и обнаружили, что у пациентов с БАС было меньше правильных ответов, чем у здоровых людей из контрольной группы [40], что подчеркивает социальный когнитивный дефицит у пациентов с БАС. В аналогичном эксперименте, проведенном Жирарди, использовалось отслеживание взгляда во время решения задачи социального и эмоционального познания, в которой участников просили выбрать правильную эмоцию, показанную на изображении лица [41]. Группа пациентов с БАС выбрала меньше правильных ответов, в отличие от здоровых людей из контрольной группы, что подтверждает нарушения распознавания эмоций и исполнительных функций при БАС. Эти исследования доказывают, что отслеживание глаз может использоваться как быстрый и надежный метод когнитивной оценки у пациентов с бульбарной дисфункцией.

*Болезнь Паркинсона* (БП) – распространенное нейродегенеративное заболевание, поражающее базальные ганглии и вызывающее, помимо двигательной дисфункции, широкий спектр немоторных нарушений, включая расстройства настроения, сна, вегетативную дисфункцию, когнитивный дефицит, деменцию и нейропсихиатрические симптомы.

Шкалы оценки когнитивной функции, такие как *SCOPA-COG* (шкала для оценки когнитивных функций у пациентов с БП) [42], *MoCA* (*Монреальская шкала оценки когнитивных функций*), *FAB* (*батарея тестов для оценки лобной дисфункции*) [43] широко используются для выявления когнитивных нарушений при БП [44]. Учитывая низкую чувствительность традиционных шкал к распознаванию тонких когнитивных нарушений на ранних стадиях БП [45], внимание смещается в сторону продвинутых нейробиологических методов, таких как айтрекинг.

Саккадические задачи являются наиболее часто используемыми задачами слежения за взглядом при когнитивной оценке БП из-за характерной для этого заболевания экстраокулярной дистонии [46, 47]. Исполнительная дисфункция при БП коррелирует с высокой частотой антисаккадных ошибок и длительным временем реакции саккад [48]. Для исследования исполнительной дисфункции у пациентов с БП также использовался опросник Баррата [50]. Его результаты показали, что, хотя баллы за беглость речи не позволяли различить когнитивные различия между пациентами с ранней стадией болезни Паркинсона и здоровыми людьми из контрольной группы, просаккадическая латентность предсказывала нарушение исполнительных функций. Показатели отслеживания взгляда коррелируют с тяжестью заболевания. Это позволяет предположить, что измерение отслеживания глаз может предсказать прогрессирование заболевания у пациентов с БП с когнитивными нарушениями [49]. В Великобритании провели исследование с участием пациентов с болезнью Паркинсона, ранее не принимавших лекарства, и здоровых людей из контрольной группы [46]. Они прошли ряд тестов. Не получавшие медикаментозного лечения пациенты с впервые диагностированной БП демонстрировали более высокую частоту антисаккадических ошибок и значительно хуже выполняли задачу по поиску правил, что позволяет предположить, что отклонения в саккадическом поведении могут быть ранним признаком когнитивных нарушений при БП. Аналогичные результаты ранее были получены Кларком [51].

*Болезнь Альцгеймера* (БА) – наиболее распространенная нейродегенеративная деменция, характеризующаяся прогрессирующей потерей памяти, нарушением внимания и исполнительной дисфункцией. На сегодняшний день наиболее распространенными заданиями для отслеживания движения глаз при БА являются задачи фиксации, саккад и плавного преследования [18]. При выполнении саккадической задачи глазодвигательные движения обычно регистрируются с помощью бинокулярной инфракрасной системы слежения за глазами [49, 52]. Анализируются такие параметры, как продолжительность фиксации, время реакции, латентность и частота ошибок саккад. По сравнению со здоровыми пациентами контрольной группы у пациентов с БА наблюдались более короткие периоды фиксации, менее точные просаккады, более длительное латентное время для инициации саккад и большее количество саккад, что свидетельствует об избирательном и исполнительном нарушении внимания [49]. Пациенты с БА тратили меньше времени на отслеживание цели во время задачи плавного преследования. Это свидетельствует о дефиците зрительной обработки из-за корково-подкорковых нарушений [53]. В исследовании социального и эмоционального познания у пациентов с апатической болезнью Альцгеймера наблюдалось снижение продолжительности и частоты фиксации социальных изображений [54]. Наконец, пациенты с БА показали меньшее предпочтение новым изображениям, чем здоровые люди из контрольной группы, о чем свидетельствует сокращение времени просмотра и частоты фиксации [52]. Снижение зрительно-

селективного внимания к новым стимулам связано с характерным когнитивным дефицитом у пациентов с БА.

Хотя оценка эпизодической памяти по изменению размера зрачка является эффективным методом [55], он недостаточно изучен в настоящее время. Этот метод можно использовать, когда нарушена вербальная реакция. Это полезно для диагностики БА на более поздних стадиях.

Пространственная дезориентация является еще одной важной особенностью БА [56]. Известны исследования пространственной навигации на основе айтрекинга [57]. Процессы внимания и рабочая память изучались в основном с использованием задач на просаккады и антисаккады [59], но также использовался ряд других [60]. Учитывая несколько различных когнитивных областей, затронутых при БА, трекинг глаз может служить потенциально полезным инструментом для дальнейшей диагностики когнитивных функций, чтобы не полагаться на классические тесты с использованием бумаги и карандаша.

При неврологических расстройствах очень часто снижается внимание. Трекинг глаз может помочь оценить внимание у неврологических пациентов, например, с эпилепсией или черепно-мозговой травмой, а также различить здоровых субъектов и пациентов с неврологическими расстройствами [61].

**Методы трекинга глаз.** Методы айтрекинга основаны на технологии машинного зрения, которая применяется во многих производственных сферах, в том числе в медицинской диагностике. Машинное зрение – процесс применения компьютерного зрения, которое, в свою очередь, сосредотачивается на обработке трехмерных сцен, спроектированных на одно или несколько изображений [78]. На российском рынке много компаний, которые работают в области компьютерного зрения: *Fam Robotics* (занимаются автоматизацией производственных процессов при помощи промышленных роботов с системами машинного зрения), *Qtechnology* (разработчик и производитель интеллектуальных камер со встроенными технологиями компьютерного зрения), *Yandex Data Factory* (подразделение компании «Яндекс», которое специализируется на анализе больших данных и применении технологий машинного обучения для решения задач промышленности), *Cognitive Technologies* (компания в области разработки и внедрения программного обеспечения, которая разрабатывает системы машинного зрения и обработки изображений), *3i Technologies* (разработчик комплексных ИТ-решений и специализированных программных библиотек), *Inspector Cloud* (разработчик цифровой платформы, использующий фотографические данные, которые анализируются при помощи нейронных сетей и глубокого обучения).

За последнее десятилетие компьютерное зрение активно внедрилось в сферу автоматизированной медицинской диагностики, поскольку оно позволяет предоставить объективную информацию о состоянии пациента. Недавнее исследование показало, что использование методов компьютерного зрения для автоматического обнаружения симптомов позволяет предварительно диагностировать более 30 заболеваний [80]. Например, анализ лица на основе компьютерного зрения может использоваться для мониторинга сосудистого пульса, оценки боли, обнаружения паралича лицевого нерва, диагностики психических расстройств и расстройств аутистического спектра [81]. Основным обоснованием использования компьютерного зрения в клинических целях является устранение любой потенциальной предвзятости, разработка более объективного подхода к анализу, а также уменьшение ошибок, связанных с человеческим фактором в процессе принятия решений. Кроме того, системы на основе компьютерного зрения обеспечивают недорогой и неинвазивный подход, потенциально сокращая расходы на здравоохранение по сравнению с медицинскими осмотрами. [81]. Типовые системы машинного зрения состоят из цифровых или аналоговых камер, процессоров, источников света (светодиоды, люминесцентные и галогеновые лампы), приложений программного обеспечения и различных оптических или магнитных датчиков для захвата и обработки изображения [79].

Используя коммерчески доступный VR-дисплей со встроенной в линзу инфракрасной камерой, Дж. Орлоски и др. создали виртуальную трехмерную среду, предназначенную для имитации общих задач, используемых для оценки состояния пациентов, таких как фиксация на точке, плавное преследование объекта или выполнение саккад. Эти виртуальные задачи предназначены для выявления движений глаз, обычно связанных с нейродегенеративными заболеваниями, таких как аномальные саккады, подергивания и тремор глаз. Результаты показали, что их интерфейс виртуальной реальности смог выявить пять распространенных типов движений, которые можно использовать для оценки, врачи смогли подтвердить три из четырех отклонений [62].

В исследовании когнитивных задач при БАС данные отслеживания глаз были получены с помощью установленного на башне инфракрасного устройства айтрекинга *Eyelink 1000 (SR Research)*, фокусирующегося на одном глазу, в то время как стимулы отображались на экране на расстоянии 60 см. Калибровка и проверка *Eyelink* выполнялась перед каждым экспериментальным сеансом, а данные собирались при частоте 1000 Гц. Представление стимула и сбор данных были запрограммированы с использованием программного обеспечения *Experiment Builder (SR Research)*. Весь сеанс айтрекинга длился примерно 40 минут [63].

Орловский и др. разработали систему на основе виртуальной реальности и отслеживания движений глаз для диагностики нейродегенеративных заболеваний и оценили ее, проведя эксперименты на пациентах с болезнью Паркинсона. Основной задачей системы было выявление нарушений движения глаз с помощью задач в виртуальной реальности, чтобы можно было поставить правильный диагноз, наблюдая за этими отклонениями [62].

В настоящее время для отслеживания движений глаз в шлемах используются три метода: *электроокулография* (ЭОГ), электромагнитные склеральные катушки и *видеоокулография* (ВОГ).

С помощью ЭОГ измеряется ориентация глаза: на кожу вокруг глаза помещаются электроды, которые измеряют потенциал покоя глаза. Электроды можно легко встроить в шлем, где он контактирует с лицом [64]. Этот метод работает, поскольку глаз представляет собой диполь, который положительно заряжен по отношению к роговице и отрицательно заряжен по отношению к сетчатке. Разница в напряжении на электродах, расположенных на противоположных сторонах глаза (например, левой и правой), хорошо соответствует ориентации глаза (например, горизонтальному положению глаза). Одним из недостатков является то, что ЭОГ обеспечивает довольно неточную оценку положения глаз, но это единственный метод, который позволяет отслеживать положение глаз, когда глаза закрыты.

Таблица 1

### Айтрекеры

Айтрекер	Программное обеспечение	Контроль движения головы	Частота записи (Гц)
<i>Fove-0</i> (на базе шлемов виртуальной реальности)	-	Нет	120
<i>HTC Vive Pro Eye</i> (на базе шлемов виртуальной реальности)	-	Нет	120
<i>Pico Neo 3 Pro Eye</i> (на базе шлемов виртуальной реальности)	-	Нет	60/90
<i>Pupil Labs</i> (на базе шлемов виртуальной реальности)	-	Нет	200
<i>Varjo VR-3</i> (на базе шлемов виртуальной реальности)	-	Нет	200
<i>Tobii Glasses 1</i> (очки)	-	Нет	-
<i>Eyelink 2</i> (наголовный)	-	Подставка для подбородка	500
<i>SMI iView XTM RED</i> (экранный)	<i>BeGaze</i>	Нет	60
<i>EyeTech TM4</i> (экранный)	<i>EyeTech's Quick Link API</i>	Подставка для подбородка	30
<i>EyeLink 1000</i> (экранный)	<i>EyeLink 1000</i>	Подставка для подбородка	-
<i>SMI RED250</i> (экранный)	<i>BeGaze</i>	Нет	250
<i>Tobii Pro X2-60</i> (экранный)	<i>Tobii Pro Studio</i>	Нет	60
<i>Tobii Pro Glasses 2</i> (очки)	<i>Tobii Pro Lab</i>	Нет	-
<i>SMI Remote 250</i> (экранный)	<i>BeGaze</i>	Инструктаж по обездвиживанию головы	250
<i>Eye Tribe Tracker</i> (экранный)	<i>OGAMA</i>	Нет	-

Электромагнитная склеральная катушка отслеживает ориентацию проволоочной петли, встроенной в контактную линзу, которую носит пользователь. Голова пользователя располагается между катушками Гельмгольца, которые генерируют однородное магнитное поле. Когда глаза движутся в однородном и известном магнитном поле, в склеральных катушках индуцируется электрический ток, указывающий на горизонтальную, вертикальную и торсионную ориентацию глаза. Этот метод отличается высокой точностью: пространственное разрешение составляет менее  $0,1^\circ$ , а временное разрешение превышает 1 кГц [65].

На сегодняшний день наиболее распространенным методом отслеживания взгляда, используемым в шлемах виртуальной реальности, является видеоокулография [66]. Коммерчески доступные айтрекеры с использованием шлемов виртуальной реальности, включая *Tobii*, *Pupil Labs*, *Varjo* и *Fove*, проводят отслеживание глаз на ее основе. Изображения глаз фиксируются камерами, установленными в шлеме, и анализ видеоклипов позволяет определить ориентацию глаз. Чаще всего методы анализа основаны на идентификации зрачка и, возможно, других ориентиров для определения положения глаза [67].

В настоящее время широко используются айтрекеры на базе шлемов виртуальной реальности, а также экранные айтрекеры и очки для отслеживания движения глаз, информация о которых представлена в табл. 1 [67, 77].

Также разрабатываются новые роботизированные неинвазивные технологии для диагностики нейродегенеративных заболеваний посредством анализа движений глаз [68].

Система айтрекинга со стабилизацией головы фиксирует голову человека с помощью опоры для подбородка или посредством прикусной планки [74]. Как правило, такие исследования позволяют достигать уровня точности, который невозможен при других типах айтрекинга. Они имеют высокое временное разрешение, что дает более быстрый анализ движения глаз [69]. Удаленный трекинг глаз основан на бесконтактной технологии, когда камера устанавливается на монитор компьютера и автоматически подстраивается под изменение положения головы человека [69]. Система позволяет отслеживать естественную позицию взгляда человека, а также является единственно возможной технологией отслеживания взгляда для младенцев или пациентов, которые не могут использовать дополнительное оборудование, крепящиеся к голове. Мобильные системы айтрекинга представляют собой устройство, которое позволяет отслеживать взгляд человека в реальном времени и включают в себя почти все поле зрения человека. Такое устройство выглядит как очки, дополнительно оборудованные рядом камер, часть которых располагается на траектории обзора и фиксирует положение глаза и сетчатки, в то время как другие камеры записывают поле зрения человека [69].

**Корреляция результатов трекинга глаз с точными инструментальными методами.** Несмотря на многочисленные преимущества методики айтрекинга, сами по себе движения глаз не дают прямого представления о нейронных и метаболических механизмах, лежащих в их основе. С этим могут помочь точные инструментальные методы исследования. Параллельная регистрация движений глаз и электроэнцефалографической активности позволяет синхронизировать анализ глазодвигательного поведения, отражающего восприятие зрительной информации, с анализом реакций мозга, связанных с анализом этой информации, и все это с одинаково высоким временным разрешением. В результате исследования выявляются потенциалы мозга, привязанные во времени к глазодвигательному явлению (например, фиксация или начало саккады). Они показывают связь между непосредственно движениями глаз и обработкой зрительных образов мозгом [86, 87]. Айтрекинг, ЭЭГ и МРТ дополняют друг друга: они позволяют измерить электрофизиологическую активность, физическую структуру и функции мозга, а также оценить поведение человека по глазодвигательным параметрам и соотнести его с нейронными механизмами [88]. Все эти методы исследования не могут заменить друг друга, они характеризуются отличительными признаками, плюсы и минусы которых описаны в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительная характеристика методов диагностики неврологических нарушений

Метод	Айтрекинг	Нейрофизиологические тесты	Точные инструментальные методы
Содержание	Технология отслеживания взгляда на базе машинного зрения	<i>MoCA</i> (Монреальская шкала оценки когнитивных функций) <i>MMSE</i> (Краткая шкала оценки психического статуса) <i>MIS</i> (Скрининг нарушений памяти)	Нейровизуализация
Исполнение	Самостоятельно	С помощью медицинского персонала	КТ/МРТ/ЭЭГ
Преимущества и недостатки	Недолговременный (5 мин) Неинвазивный Объективный	Длительный (30 мин) Неинвазивный Субъективный	Экспозиция облучения Объективный Дорогой

**Заключение.** Хотя традиционные методы (шкалы когнитивной оценки и инструментальные методы) широко используются в клинике, они имеют определенные минусы в использовании по сравнению с методом айтрекинга: оценка состояния пациента требует интенсивного труда, а анализ результатов имеет низкую разрешающую способность [12]. Напротив, технология отслеживания взгляда имеет высокую разрешающую способность и позволяет делать точную количественную оценку параметров на уровне миллисекунд (амплитуда, задержка, частота и стабильность) [70], которые отражают более объективный и динамический характер поведения в естественной среде [71]. Большинство данных показывают, что информация, полученная при отслеживании движения глаз, хорошо коррелирует с традиционными шка-

лами когнитивной оценки. Айтрекинг может использоваться для оценки и мониторинга когнитивных состояний, тяжести и прогрессирования неврологического заболевания. Интеграция нейропсихологических тестов в технологию трекинга глаз представляется перспективной, поскольку позволяет снизить лингвистические и двигательные требования к пациентам или преодолеть барьер, связанный с серьезными речевыми и двигательными дисфункциями. В свою очередь объединение результатов айтрекинга и методов визуализации мозга позволит сформировать более точную картину неврологических расстройств.

### Литература

1. Ключников С.А., Азиатская Г.А. Глазодвигательные расстройства в практике невролога // *Нервные болезни* 2015. Т. 4. С. 41-46
2. Походай М. Ю., Бермудес-Маргаретто Б., Штыров Ю. Ю., Мячиков А. В. Методика айтрекинга в психолингвистике и параллельная регистрация с ЭЭГ // *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова* 2022. Т. 72(5). С. 609-622. DOI: 10.31857/S0044467722050124
3. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение // М.: Бином. Лаборатория знаний 2006. С. 752
4. Abadi R. V. Mechanisms underlying nystagmus // *Journal of the Royal Society of Medicine* 2002. Vol. 95(5). P. 231-234. DOI:10.1177/014107680209500504
5. Adhanom I.B., MacNeilage P., Folmer E. Eye Tracking in Virtual Reality: a Broad Review of Applications and Challenges // *Virtual Reality* 2023. Vol. 27. P. 1481–1505. DOI:10.1007/s10055-022-00738-z
6. Ahmad O., Mazomenos E., Chadebecq F., Kader R., Puyal J., Brandao P., Toth D., Mountney P., Seward E., Vega R., Stoyanov D., Lovat L. Identifying key mechanisms leading to visual recognition errors for missed colorectal polyps using eye-tracking technology // *Journal of gastroenterology and hepatology* 2023. Vol. 38(5). P. 768-774. DOI:10.1111/jgh.16127
7. Amador S. C., Hood A. J., Schiess M. C., Izor R., Sereno A. B. Dissociating cognitive deficits involved in voluntary eye movement dysfunctions in Parkinson's disease patients // *Neuropsychologia* 2006. Vol. 44(8). P. 1475-1482. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2005.11.015
8. Antoniadou C. A., Demeyere N., Kennard C., Humphreys G. W., Hu M. T. Antisaccades and executive dysfunction in early drug-naïve Parkinson's disease: The discovery study // *Mov Disord* 2015. Vol. 30(6). P. 843-847. DOI:10.1002/mds.26134
9. Barone V., van Dijk J. P., Debeij-van Hall M. H. J. A., van Putten M. J. A. M. A Potential Multimodal Test for Clinical Assessment of Visual Attention in Neurological Disorders // *Clin EEG Neurosci* 2023. Vol. 54(5). P. 512-521. DOI: 10.1177/15500594221129962
10. Bhadila G.Y., Alyafi D.A. The Use of Eye-Tracking Technology in Pediatric Orofacial Clefts: A Systematic Review and Meta-Analysis // *Children* 2023. Vol. 10. P. 1425. DOI: 10.3390/children10081425
11. Borys M., Plechawska-Wójcik M. Eye-tracking metrics in perception and visual attention research // *EJMT* 2017. Vol. 3. P. 11-23.
12. Bours C.C.A.H., Bakker-Huvenaars M.J., Tramper J., Bielczyk N., Scheepers F., Nijhof K. S., Baanders A. N., Lambregts-Rommelse N. N. J., Medendorp P., Glennon J. C., Buitelaar J. K. Emotional face recognition in male adolescents with autism spectrum disorder or disruptive behavior disorder: an eye-tracking study // *Eur Child Adolesc Psychiatry* 2018. Vol. 27. P. 1143–1157. DOI: 10.1007/s00787-018-1174-4
13. Bueno A.P.A., Sato J.R., Hornberger M. Eye tracking – The overlooked method to measure cognition in neurodegeneration // *Neuropsychologia* 2019. Vol. 133. P. 107191. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2019.107191
14. Burger G., Guna J., Pogačnik M. Suitability of Inexpensive Eye-Tracking Device for User Experience Evaluations // *Sensors (Basel)* 2018. Vol. 8(6). P. 1822. DOI: 10.3390/s18061822
15. Burrell J. R., Carpenter R. H., Hodges J. R., Kiernan M. C. Early saccades in amyotrophic lateral sclerosis // *Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener* 2013. Vol. 14(4). P. 294-301. DOI: 10.3109/21678421.2013.783077
16. Chau S. A., Chung J., Herrmann N., Eizenman M., Lanctôt K. L. Apathy and Attentional Biases in Alzheimer's Disease // *J Alzheimers Dis* 2016. Vol. 51(3). P. 837-846. DOI:10.3233/JAD-151026
17. Chau S. A., Herrmann N., Eizenman M., Chung J., Lanctôt K. L. Exploring Visual Selective Attention towards Novel Stimuli in Alzheimer's Disease Patients // *Dementia and geriatric cognitive disorders extra* 2015. Vol. 5(3). P. 492–502. DOI: 10.1159/000442383
18. Chau S. A., Herrmann N., Sherman C., Chung J., Eizenman M., Kiss A., Lanctôt K. L. Visual Selective Attention Toward Novel Stimuli Predicts Cognitive Decline in Alzheimer's Disease Patients // *Journal of Alzheimer's disease : JAD* 2017, Vol. 55(4). P. 1339–1349. DOI: 10.3233/JAD-160641
19. Chisari C.G., Sciacca G., Reggio E., Terravecchia C., Patti F., Zappia M. Subclinical involvement of eye movements detected by video-based eye tracking in myasthenia gravis // *Neurol Sci* 2023. Vol. 44. P. 2555–2559. DOI :10.1007/s10072-023-06736-6

20. Clark U. S., Nearing S., Cronin-Golomb A. Visual exploration of emotional facial expressions in Parkinson's disease // *Neuropsychologia* 2010. Vol. 48. P. 1901–1913
21. Coughlan G., Laczó J., Hort J., Minihane A. M., Hornberger M. Spatial navigation deficits - overlooked cognitive marker for preclinical Alzheimer disease? // *Nature reviews. Neurology* 2018. Vol. 14(8). P. 496–506. DOI: 10.1038/s41582-018-0031-x
22. Crawford T. J., Smith E. S., Berry D. M. Eye Gaze and Aging: Selective and Combined Effects of Working Memory and Inhibitory Control // *Frontiers in human neuroscience* 2017. Vol. 11. P. 563. DOI: 10.3389/fnhum.2017.00563
23. Daniele A., Lacidogna G. The need for an extensive neuropsychological assessment for a reliable diagnosis of mild cognitive impairment in patients with Parkinson's disease // *Eur J Neurol* 2018. Vol. 25. P. 795–796
24. de Belen R. A. J., Bednarz T., Sowmya A., Del Favero D. Computer vision in autism spectrum disorder research: a systematic review of published studies from 2009 to 2019 // *Translational psychiatry* 2020. Vol. 10(1). P. 333. DOI: 10.1038/s41398-020-01015-w
25. de Boer C., van der Steen J., Mattace-Raso F., Boon A. J., Pel J. J. The Effect of Neurodegeneration on Visuomotor Behavior in Alzheimer's Disease and Parkinson's Disease // *Motor Control* 2016. Vol. 20(1). P. 1–20. DOI: 10.1123/mc.2014-0015
26. Duchowski A. Eye tracking techniques // In: *eye tracking methodology: theory and practice*, Springer London, London 2007. Vol. 2. P. 51–59. DOI: 10.1007/978-1-84628-609-4\_5
27. Duprez J., Houvenaghel J. F., Argaud S., Naudet F., Robert G., Drapier D., Vérin M., Sauleau P. Impulsive oculomotor action selection in Parkinson's disease // *Neuropsychologia* 2017. Vol. 95. P. 250–258. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2016.12.027.
28. Forssman L., Ashorn P., Ashorn U., Maleta K., Matchado A., Kortekangas E., Leppänen J.M. Eye-tracking-based assessment of cognitive function in low-resource settings // *Archives of Disease in Childhood* 2016. Vol. 102. P. 301–302. DOI: 10.1136/archdischild-2016-310525
29. Girardi A., Macpherson S. E., Abrahams S. Deficits in emotional and social cognition in amyotrophic lateral sclerosis // *Neuropsychology* 2011. Vol. 25. P. 53–65
30. Graves J., Oertel F., van der Walt A., Collorone S., Sotirchos E., Pihl-Jensen G., Albrecht P., Yeh E. A., Saidha S., Frederiksen J., Newsome S. D., Paul F. Leveraging visual outcome measures to advance therapy development in neuroimmunologic disorders // *Neurology neuroimmunol Neuroinflamm* 2022. Vol. 9(2). P. 1126. DOI: 10.1212/nxi.0000000000001126
31. Guantay C.D. Usefulness of eye tracking systems in multiple sclerosis // *Acta Ophthalmologica* 2024, Vol. 102 (S279).
32. Hochstadt J. Set-shifting and the on-line processing of relative clauses in Parkinson's disease: results from a novel eye-tracking method // *Cortex* 2009. Vol. 45. P. 991–1011
33. Holmqvist K., Nystrom M., Andersson R., Dewhurst R., Jarodzka H., Weijer J. van de. *Eye-tracking: a comprehensive guide to methods and measures* // Oxford: Oxford University Press
34. Hutzler F., Braun M., Vö M. L., Engl V., Hofmann M., Dambacher M., Leder H., Jacobs A. M. Welcome to the real world: validating fixation-related brain potentials for ecologically valid settings // *Brain research* 2007. Vol. 1172. P. 124–129. DOI: 10.1016/j.brainres.2007.07.025
35. Isbilir E., Cakır M. P., Acarturk C., Tekerek A. S. Towards a multimodal model of cognitive workload through synchronous optical brain imaging and eye tracking measures // *Front Hum Neurosci* 2019. Vol. 13. P. 375. DOI: 10.3389/fnhum.2019.00375
36. Ismailova S. B., Prokopenko S. V., Pokhobov D. V., Mosaleva E. I., Alekseenko P. V., Zhumzhanov I. M. Dynamics of cognitive impairments during L-dopa therapy in Parkinson's disease // *Zh Nevrol Psikhiatr Im S.S. Korsakova* 2021. Vol. 121(7). P. 36–41. DOI: 10.17116/jnevro202112107136
37. Jacobs L., Bozian D., Heffner R. R. Jr., Barron S. A. An eye movement disorder in amyotrophic lateral sclerosis // *Neurology* 1981. Vol. 31(10). P. 1282–1287. DOI: 10.1212/wnl.31.10.1282
38. Jiang M., Liu S., Feng Q., Gao J., Zhang Q. Usability study of the user-interface of intensive care ventilators based on user test and eye-tracking signals // *Med Sci Monit* 2018. Vol. 24, P. 6617–6629. DOI: 10.12659/MSM.909933.
39. Karamchandani U., Erridge S., Evans-Harvey K., Darzi A., Hoare J., Sodergren M. Eye-tracking technology differentiates visual gaze patterns between trainee endoscopists according to a validated objective skills assessment scale // *Gastrointest Endosc* 2020. Vol. 91. P. 113–4.
40. Kassavetis P., Kaski D., Anderson T., Hallett M. Eye Movement Disorders in Movement Disorders // *Movement disorders clinical practice* 2022. Vol. 9(3). P. 284–295. DOI: 10.1002/mdc3.13413
41. Keller J., Krimly A., Bauer L., Schulenburg S., Böhm S., Aho-Özhan H. E. A., Uttner I., Gorges M., Kassubek J., Pinkhardt E. H., Abrahams S., Ludolph A. C., Lulé D. A first approach to a neuropsychological screening tool using eye-tracking for bedside cognitive testing based on the Edinburgh cognitive and Behaviour-

al ALS screen // *Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener* 2017. Vol. 18(5-6). P. 443–450. DOI: 10.1080/21678421.2017.1313869

42. Kiefer P., Giannopoulos I., Raubal M., Duchowski A. Eye tracking for spatial research: Cognition, computation, challenges // *Spatial Cognition & Computation* 2017. Vol. 17(1-2). P. 1-19. DOI: 10.1080/13875868.2016.1254634

43. Koens L.H, Tijssen M.A.J, Lange F., Wolffenbittel B.H.R., Rufa A., Zee D.S, de Koning T.J. Eye movement disorders and neurological symptoms in late-onset inborn errors of metabolism // *Mov Disord* 2018. Vol. 33(12). P. 1844-1856. DOI: 10.1002/mds.27484.

44. Krejtz K., Duchowski A. T., Niedzielska A., Biele C., Krejtz I. Eye tracking cognitive load using pupil diameter and microsaccades with fixed gaze // *PLoS One* 2018. Vol. 13(9). P. e0203629. DOI:10.1371/journal.pone.0203629

45. Kucewicz M. T., Dolezal J., Kremen V., Berry B. M., Miller L. R., Magee A. L., Fabian V., & Worrell G. A. Pupil size reflects successful encoding and recall of memory in humans // *Scientific reports* 2018. Vol. 8(1). P. 4949. DOI: 10.1038/s41598-018-23197-6

46. Kulisevsky J., Pagonabarraga J. Cognitive impairment in Parkinson's disease: tools for diagnosis and assessment // *Mov Disord* 2009. Vol. 24. P. 1103–1110

47. Kyroudi A., Petersson K., Ozsahin M., Bourhis J., Bochud F., Moeckli R. Analysis of the treatment plan evaluation process in radiotherapy through eye tracking // *Zeitschrift fur medizinische Physik* 2018. Vol. 28(4). P. 318-324. DOI:10.1016/j.zemedi.2017.11.002

48. Lami M., Singh H., Dilley J. H., Ashraf H., Edmondson M., Orihuela-Espina F., Hoare J., Darzi A., Sodergren M. H. Gaze patterns hold key to unlocking successful search strategies and increasing polyp detection rate in colonoscopy // *Endoscopy* 2018. Vol. 50(7). P. 701–707. DOI: 10.1055/s-0044-101026

49. MacAskill M.R, Anderson T.J. Eye movements in neurodegenerative diseases // *Curr Opin Neurol* 2016. Vol. 29(1). P. 61-8. DOI: 10.1097/WCO.0000000000000274.

50. Maurage P., Masson N., Bollen Z., D'Hondt F. Eye tracking correlates of acute alcohol consumption: A systematic and critical review // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 2020. Vol. 108. P. 400-422. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2019.10.001

51. Mento M. A. Different Kinds of Eye Tracking Devices // *Bitbrain* June 12, 2020 (69)

52. Moghadami M., Moghimi S., Moghimi A., Malekzadeh G. R., Fadardi J. S. The Investigation of Simultaneous EEG and Eye Tracking Characteristics During Fixation Task in Mild Alzheimer's Disease // *Clinical EEG and Neuroscience* 2021. Vol. 52(3). P. 211-220. DOI: 10.1177/1550059420932752

53. Moroso A, Ruet A, Deloire M, Lamargue-Hamel D., Cubizolle S., Charré-Morin J., Saubusse A., Brochet B. Cerebellar assessment in early multiple sclerosis // *Cerebellum* 2017. Vol. 16(2). P. 607-611. DOI: 10.1007/s12311-016-0831-8

54. Nguyen, M. N. L., van der Walt A., Fielding J., Clough M., White O. B. Tracking Eye Movements for Diagnosis in Myasthenia Gravis: A Comprehensive Review // *Journal of Neuro-Ophthalmology* 2022. Vol. 42(4). P. 428-441. DOI: 10.1097/WNO.0000000000001668

55. Okruszek L., Bala A., Dziekan M., Szantoch M., Rysz A., Marchel A., Hyniewska S. Gaze matters! The effect of gaze direction on emotional enhancement of memory for faces in patients with mesial temporal lobe epilepsy // *Epilepsy & behavior* 2017. Vol. 72. P. 35–38. DOI: 10.1016/j.yebeh.2017.04.016

56. Orlosky J., Itoh Y., Ranchet M., Kiyokawa K., Morgan J., Devos, H. Emulation of Physician Tasks in Eye-Track Virtual Reality for Remote Diagnosis of Neurodegenerative Disease // *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 2017. Vol. 23(4). P. 1302–1311. DOI: 10.1109/TVCG.2017.2657018

57. Pavisic I. M., Firth N. C., Parsons S., Rego D. M., Shakespeare T. J., Yong K. X. X., Slattery C. F., Paterson R. W., Foulkes A. J. M., Macpherson K., Carton A. M., Alexander D. C., Shawe-Taylor J., Fox N. C., Schott J. M., Crutch S. J., Primativo S. Eyetracking Metrics in Young Onset Alzheimer's Disease: A Window into Cognitive Visual Functions // *Frontiers in neurology* 2017. Vol. 8. P. 377. DOI: 10.3389/fneur.2017.00377

58. Perrin M., Robillard M., Roy-Charland A. Observing eye movements and the influence of cognition during a symbol search task: a comparison across three age groups // *Augmentative and Alternative Communication* 2017. Vol. 33(4). P. 249-259. DOI: 10.1080/07434618.2017.1381990

59. Pham D.T., Alcock R.J. *Smart Inspection Systems: Techniques and Applications of Intelligent Vision*, Academic Press 2003

60. Phukan J., Elamin M., Bede P., Jordan N., Gallagher L., Byrne S., Lynch C., Pender N., Hardiman O. The syndrome of cognitive impairment in amyotrophic lateral sclerosis: a population-based study // *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2012. Vol. 83. P. 102–108. DOI:10.1136/jnnp-2011-300188

61. Poletti B., Carelli L., Faini A., Solca F., Meriggi P., Lafronza A., Ciringione L., Pedroli E., Ticozzi N., Ciammola A., Cipresso P., Riva G., Silani V. The Arrows and Colors Cognitive Test (ACCT): a new verbal-motor free cognitive measure for executive functions in ALS // *PLoS One* 2018. Vol. 13(8). P. e0200953 DOI: 10.1371/journal.pone.0200953.

62. Poletti B., Carelli L., Solca F., Lafronza A., Pedroli E., Faini A., Ticozzi N., Ciammola A., Meriggi P., Cipresso P., Lulé D., Ludolph A. C., Riva G., Silani V. An eye-tracker controlled cognitive battery: overcoming verbal-motor limitations in ALS // *J Neurol* 2017. Vol. 264(6) P. 1136–1145. DOI: 10.1007/s00415-017-8506-z
63. Proudfoot M., Menke R. A., Sharma R., Berna C. M., Hicks S. L., Kennard C., Talbot K., Turner M. R. Eye-tracking in amyotrophic lateral sclerosis: A longitudinal study of saccadic and cognitive tasks // *Amyotrophic lateral sclerosis & frontotemporal degeneration* 2015. Vol. 17(1-2). P. 101–111. DOI: 10.3109/21678421.2015.1054292
64. Ranchet M., Orlosky J., Morgan J., Qadir S., Akinwuntan A. E., Devos H. Pupillary response to cognitive workload during saccadic tasks in Parkinson's disease // *Behav Brain Res* 2017. Vol. 327. P. 162-166. DOI:10.1016/j.bbr.2017.03.043
65. Rees E. M., Farmer R., Cole J. H., Haider S., Durr A., Landwehrmeyer B., Scahill R. I., Tabrizi S. J., Hobbs N. Z. Cerebellar abnormalities in Huntington's disease: a role in motor and psychiatric impairment // *Mov Disord* 2014. Vol. 29. P. 1648–1654. DOI: 10.1002/mds.25984
66. Shakespeare T. J., Kaski D., Yong K.X., Paterson R. W., Slattery C. F., Ryan N. S., Schott J. M., Crutch S. J. Abnormalities of fixation, saccade and pursuit in posterior cortical atrophy // *Brain* 2015. Vol. 138. P. 1976–1991. DOI: 10.1093/brain/awv103.
67. Tan R. H., Ke Y. D., Ittner L. M., Halliday G. M. ALS/FTLD: experimental models and reality // *Acta Neuropathol* 2017. Vol. 133. P. 177–196. DOI:10.1007/s00401-016-1666-6
68. Tao L., Wang Q., Liu D., Wang J., Zhu Z., Feng L. Eye tracking metrics to screen and assess cognitive impairment in patients with neurological disorders // *Neurol Sci* 2020. Vol. 41. P. 1697–1704. DOI: 10.1007/s10072-020-04310-y
69. Thevenot J., López M. B., Hadid A. A survey on computer vision for assistive medical diagnosis from faces // *IEEE J. Biomed. Health Inform* 2018. Vol. 22. P. 1497–1511. DOI: 10.1109/JBHI.2017.2754861.
70. Ting H., Xinyu W., Haiming X. Eye-Tracking in Interpreting Studies: A Review of Four Decades of Empirical Studies // *Frontiers in Psychology* 2022. Vol. 13. DOI: 10.3389/fpsyg.2022.872247
71. Tolaven O., Elomaa AP., Itkonen M., Vrzakova H., Bednarik R., Huotari A. Eye-Tracking Indicators of Workload in Surgery: A Systematic Review // *Journal of Investigative Surgery* 2022. Vol. 35(6). P. 1340-1349. DOI: 10.1080/08941939.2021.2025282
72. Trofimov A.O., Sofronova V., Trofimova K., Dubrovin A., Martynov D., Lidji-Goryaev C., Semyachkina-Glushkovskaya O., Bragin D.E. Eye Tracking Parameters Correlate with the Level of Cerebral Oxygen Saturation in Mild Traumatic Brain Injury: A Preliminary Study // *Adv Exp Med Biol*. 2022. Vol. 1395. P. 151-156. DOI: 10.1007/978-3-031-14190-4\_26
73. Unger M., Black D., Fischer N. M., Neumuth T., Glaser B. Design and evaluation of an eye tracking support system for the scrub nurse // *Int J Med Robot* 2019. Vol. 15(1). P. e1954. DOI: 10.1002/rcs.1954
74. Ward N., Hussey E. K., Cunningham E. C., Paul E. J., McWilliams T., Kramer A. F. Building the multitasking brain: An integrated perspective on functional brain activation during task-switching and dual-tasking // *Neuropsychologia* 2019. Vol. 132. P. 107149. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia
75. Wei Q., Cao H., Shi Y., Xu X., Li T. Machine learning based on eye-tracking data to identify Autism Spectrum Disorder: A systematic review and meta-analysis // *Journal of Biomedical Informatics* 2023, Vol. 137, P. 104-254.
76. Whitmire E., Trutoiu L., Cavin R., Perek D., Scally B., Phillips J., Patel S. EyeContact: scleral coil eye tracking for virtual reality // In: international symposium on wearable computers, digest of papers 2016, DOI: 10.1145/2971763.2971771
77. Witiuk K., Fernandez-Ruiz J., McKee R., Alahyane N., Coe B. C., Melanson M., Munoz D. P. Cognitive deterioration and functional compensation in ALS measured with fMRI using an inhibitory task // *J Neurosci* 2014. Vol. 34. P. 14260–14271. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1111-14.2014
78. Wolf K., Galeano Weber E., van den Bosch J. J. F., Volz S., Nöth U., Deichmann R., Naumer M. J., Pfeiffer T., Fiebach C. J. Neurocognitive development of the resolution of selective visuospatial attention: functional MRI evidence from object tracking // *Front Psychol* 2018. Vol. 9. P. 1106. DOI:10.3389/fpsyg.2018.01106
79. Xiao J., Qu J., Li Y. An electrooculogram-based interaction method and its music-on-demand application in a virtual reality environment // *IEEE Access* 2019. Vol. 7. P. 22059–22070. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2898324
80. Xiarchos A. Robotic Systems Involved in the Diagnosis of Neurodegenerative Diseases // *Advances in experimental medicine and biology* 2020, Vol. 1194. P. 423. DOI: 10.1007/978-3-030-32622-7\_39
81. Yousef A., Devereux M., Gourraud P. A., Jonzson S., Suleiman L., Waubant E., Green A., Graves J. S. Subclinical saccadic eye movement dysfunction in pediatric multiple sclerosis // *J Child Neurol* 2019. Vol. 34(1). P. 38-43. DOI: 10.1177/0883073818807787

### References

1. Kljushnikov SA, Aziatskaja GA. Glazodvigatel'nye rasstrojstva v praktike nevrologa [Oculomotor disorders in the practice of a neurologist]. *Nervnye bolezni* 2015;4:41-6. Russian.
2. Pohodaj M Ju, Bermudes-Margaretto B, Shtyrov Ju Ju, Mjachikov A V. Metodika ajtrekinga v psiholingvitsike i paralelnaja registracija s JeJeG [the methodology of eyetracking in psycholinguistics and parallel registration with EEG]. *Zhurnal vysshej nervnoj dejatel'nosti im. I.P. Pavlova* 2022;72(5):609-22. DOI: 10.31857/S0044467722050124 Russian.
3. Shapiro L, Stokman Dzh. Komp'juternoe zrenie [Computer vision]. M.: Binom. Laboratorija znanij 2006. C. 752 Russian.
4. Abadi R V. Mechanisms underlying nystagmus. *Journal of the Royal Society of Medicine* 2002; 95(5):231-4. DOI:10.1177/014107680209500504 Russian.
5. Adhanom IB, MacNeilage P, Folmer E. Eye Tracking in Virtual Reality: a Broad Review of Applications and Challenges. *Virtual Reality* 2023;27:1481–505. DOI:10.1007/s10055-022-00738-z
6. Ahmad O, Mazomenos E, Chadebecq F, Kader R, Puyal J, Brandao P, Toth D, Mountney P, Seward E, Vega R, Stoyanov D, Lovat L. Identifying key mechanisms leading to visual recognition errors for missed colorectal polyps using eye-tracking technology. *Journal of gastroenterology and hepatology* 2023;38(5):768-774. DOI:10.1111/jgh.16127
7. Amador SC, Hood AJ, Schiess M C, Izor R, Sereno AB. Dissociating cognitive deficits in-volved in voluntary eye movement dysfunctions in Parkinson's disease patients. *Neuropsychologia* 2006; 44(8):1475-1482. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2005.11.015
8. Antoniadis C A, Demeyere N, Kennard C, Humphreys G W, Hu M T. Antisaccades and executive dysfunction in early drug-naive Parkinson's disease: The discovery study. *Mov Disord* 2015;30(6):843-7. DOI:10.1002/mds.26134
9. Barone V, van Dijk J ., Debeij-van Hall M H J A, van Putten M J A M A Potential Multimodal Test for Clinical Assessment of Visual Attention in Neurological Disorders. *Clin EEG Neurosci* 2023; 54(5): 512-521. DOI: 10.1177/15500594221129962
10. Bhadila GY, Alyafi DA. The Use of Eye-Tracking Technology in Pediatric Orofacial Clefts: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Children* 2023;10:1425. DOI: 10.3390/children10081425
11. Borys M, Plechawska-Wójcik M. Eye-tracking metrics in perception and visual attention re-search. *EJMT* 2017;3:11-23.
12. Bours CCAH, Bakker-Huvenaars MJ, Tramper J, Bielczyk N, Scheepers F, Nijhof K S, Baanders A N, Lambregts-Rommelse N N J, Medendorp P, Glennon JC, Buitelaar JK. Emotional face recognition in male adolescents with autism spectrum disorder or disruptive behavior disorder: an eye-tracking study. *Eur Child Adolesc Psychiatry* 2018;27:1143–1157. DOI: 10.1007/s00787-018-1174-4
13. Bueno APA, Sato JR., Hornberger M. Eye tracking – The overlooked method to measure cognition in neurodegeneration. *Neuropsychologia* 2019;133:107191. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2019.107191
14. Burger G, Guna J, Pogačnik M. Suitability of Inexpensive Eye-Tracking Device for User Ex-perience Evaluations. *Sensors (Basel)* 2018;8(6):1822. DOI: 10.3390/s18061822
15. Burrell J R, Carpenter R H, Hodges J R, Kiernan M C. Early saccades in amyotrophic lateral sclerosis. *Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener* 2013;14(4):294-301. DOI: 10.3109/21678421.2013.783077
16. Chau S A, Chung J, Herrmann N, Eizenman M, Lanctôt KL. Apathy and Attentional Biases in Alzheimer's Disease. *J Alzheimers Dis* 2016;51(3):837-846. DOI:10.3233/JAD-151026
17. Chau S A, Herrmann N, Eizenman M, Chung J, Lanctôt K. L. Exploring Visual Selective At-tention towards Novel Stimuli in Alzheimer's Disease Patients. *Dementia and geriatric cognitive disorders extra* 2015;(3):492–502. DOI: 10.1159/000442383
18. Chau S A, Herrmann N, Sherman C, Chung J, Eizenman M, Kiss A, Lanctôt KL. Visual Selective Attention Toward Novel Stimuli Predicts Cognitive Decline in Alzheimer's Disease Patients. *Journal of Alzheimer's disease : JAD* 2017;55(4):1339–1349. DOI: 10.3233/JAD-160641
19. Chisari CG, Sciaccia G, Reggio E, Terravecchia C, Patti F, Zappia M. Subclinical involvement of eye movements detected by video-based eye tracking in myasthenia gravis. *Neurol Sci* 2023;44:2555–2559. DOI :10.1007/s10072-023-06736-6
20. Clark U S, Nearing S, Cronin-Golomb A. Visual exploration of emotional facial expressions in Parkinson's disease. *Neuropsychologia* 2010;48:1901–1913
21. Coughlan G, Laczó J, Hort J, Minihane A M, Hornberger M. Spatial navigation deficits - over-looked cognitive marker for preclinical Alzheimer disease? *Nature reviews. Neurology* 2018;14(8):496–506. DOI: 10.1038/s41582-018-0031-x
22. Crawford T , Smith ES, Berry DM. Eye Gaze and Aging: Selective and Combined Effects of Working Memory and Inhibitory Control. *Frontiers in human neuroscience* 2017;11:563. DOI: 10.3389/fnhum.2017.00563

23. Daniele A, Lacidogna G. The need for an extensive neuropsychological assessment for a reliable diagnosis of mild cognitive impairment in patients with Parkinson's disease. *Eur J Neurol* 2018;25:795–796
24. de Belen RAJ, Bednarz T, Sowmya A, Del Favero D. Computer vision in autism spectrum disorder research: a systematic review of published studies from 2009 to 2019. *Translational psychiatry* 2020;10(1):333. DOI: 10.1038/s41398-020-01015-w
25. de Boer C, van der Steen J, Mattace-Raso F, Boon A J, Pel J J. The Effect of Neurodegeneration on Visuomotor Behavior in Alzheimer's Disease and Parkinson's Disease. *Motor Control* 2016;20(1):1-20. DOI: 10.1123/mc.2014-0015
26. Duchowski A. Eye tracking techniques. In: *eye tracking methodology: theory and practice*, Springer London, London 2007;2:51–59. DOI: 10.1007/978-1-84628-609-4\_5
27. Duprez J, Houvenaghel JF, Argaud S, Naudet F, Robert G, Drapier D, Vérin M, Sauleau P. Impulsive oculomotor action selection in Parkinson's disease. *Neuropsychologia* 2017;5:250-258. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2016.12.027.
28. Forssman L, Ashorn P, Ashorn U, Maleta , Matchado A, Kortekangas E, Leppänen JM. Eye-tracking-based assessment of cognitive function in low-resource settings. *Archives of Disease in Childhood* 2016;102:301-302. DOI: 10.1136/archdischild-2016-310525
29. Girardi A, Macpherson SE, Abrahams S. Deficits in emotional and social cognition in amyotrophic lateral sclerosis. *Neuropsychology* 2011;25:53–65
30. Graves J, Oertel F, van der Walt A, Collorone S, Sotirchos E, Pihl-Jensen G, Albrecht P, Yeh E A, Saidha S, Frederiksen J, Newsome SD, Paul F. Leveraging visual outcome measures to advance therapy development in neuroimmunologic disorders. *Neurology neuroimmunol Neuroinflamm* 2022; 9(2):1126. DOI: 10.1212/nxi.0000000000001126
31. Guantay CD. Usefulness of eye tracking systems in multiple sclerosis. *Acta Ophthalmologica* 2024;102 (S279).
32. Hochstadt J. Set-shifting and the on-line processing of relative clauses in Parkinson's disease: results from a novel eyetracking method. *Cortex* 2009;45:991–1011
33. Holmqvist K, Nyström M, Andersson R, Dewhurst R, Jarodzka H, Weijer J. van de. *Eye-tracking: a comprehensive guide to methods and measures*. Oxford: Oxford University Press
34. Hutzler F, Braun M, Vö M L, Engl V, Hofmann M, Dambacher M, Leder H, Jacobs AM. Welcome to the real world: validating fixation-related brain potentials for ecologically valid settings. *Brain research* 2007;1172:124–129. DOI: 10.1016/j.brainres.2007.07.025
35. Isbilir E, Cakır M P, Acarturk C, Tekerek A S. Towards a multimodal model of cognitive workload through synchronous optical brain imaging and eye tracking measures. *Front Hum Neurosci* 2019; 13:375. DOI: 10.3389/fnhum.2019.00375
36. Ismailova SB, Prokopenko SV, Pokhabov DV, Mosaleva EI, Alekseenko V, Zhumzhanov I M. Dynamics of cognitive impairments during L-dopa therapy in Parkinson's disease. *Zh Nevrol Psikhiatr Im S.S. Korsakova* 2021;121(7):36-41. DOI: 10.17116/jnevro202112107136
37. Jacobs L, Bozian D, Heffner R R. Jr, Barron SA. An eye movement disorder in amyotrophic lateral sclerosis. *Neurology* 1981;31(10):1282–7. DOI:10.1212/wnl.31.10.1282
38. Jiang M, Liu S, Feng Q, Gao J, Zhang Q. Usability study of the user-interface of intensive care ventilators based on user test and eye-tracking signals. *Med Sci Monit* 2018;4:6617–6629. DOI: 10.12659/MSM.909933.
39. Karamchandani U, Erridge S, Evans-Harvey K, Darzi A, Hoare J, Sodergren M. Eye-tracking technology differentiates visual gaze patterns between trainee endoscopists according to a validated objective skills assessment scale. *Gastrointest Endosc* 2020;91:113–4.
40. Kassavetis , Kaski D, Anderson T, Hallett M. Eye Movement Disorders in Movement Dis-orders. *Movement disorders clinical practice* 2022;9(3):284–95. DOI: 10.1002/mdc3.13413
41. Keller J, Krimly A, Bauer L, Schulenburg S, Böhm S, Aho-Özhan HEA, Uttner I, Gorges M, Kassubek J, Pinkhardt EH, Abrahams S, Ludolph AC, Lulé D. A first approach to a neuropsychological screening tool using eye-tracking for bedside cognitive testing based on the Edinburgh cognitive and Behavioural ALS screen. *Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener* 2017;18(5-6):443–50. DOI: 10.1080/21678421.2017.1313869
42. Kiefer P, Giannopoulos I, Raubal M, Duchowski A. Eye tracking for spatial research: Cognition, computation, challenges. *Spatial Cognition & Computation* 2017;17(1-2):1-19. DOI: 10.1080/13875868.2016.1254634
43. Koens LH, Tijssen MAJ, Lange F, Wolffenbuttel BHR, Rufa A, Zee DS, de Koning TJ. Eye movement disorders and neurological symptoms in late-onset inborn errors of metabolism. *Mov Disord* 2018;33(12):1844-56. DOI: 10.1002/mds.27484.

44. Krejtz K, Duchowski AT, Niedzielska A, Biele C, Krejtz I. Eye tracking cognitive load using pupil diameter and microsaccades with fixed gaze. *PLoS One* 2018;13(9):e0203629. DOI:10.1371/journal.pone.0203629
45. Kucewicz MT, Dolezal J, Kremen V, Berry BM, Miller LR, Magee AL, Fabian V. & Wor-rell G.A. Pupil size reflects successful encoding and recall of memory in humans. *Scientific reports* 2018;8(1):4949. DOI: 10.1038/s41598-018-23197-6
46. Kulisevsky J, Pagonabarraga J. Cognitive impairment in Parkinson's disease: tools for diagnosis and assessment. *Mov Disord* 2009;24:1103–1110
47. Kyroudi A, Petersson K, Ozsahin M, Bourhis J, Bochud F, Moeckli R. Analysis of the treatment plan evaluation process in radiotherapy through eye tracking. *Zeitschrift fur medizinische Physik* 2018;28(4):318-324. DOI:10.1016/j.zemedi.2017.11.002
48. Lami M, Singh H, Dilley JH, Ashraf H, Edmondson M, Orihuela-Espina F, Hoare J, Darzi A, Sodergren M. H. Gaze patterns hold key to unlocking successful search strategies and increasing polyp detection rate in colonoscopy. *Endoscopy* 2018;50(7):701–7. DOI: 10.1055/s-0044-101026
49. MacAskill MR, Anderson TJ. Eye movements in neurodegenerative diseases. *Curr Opin Neurol.* 2016;29(1):61-8. DOI: 10.1097/WCO.0000000000000274.
50. Maurage P, Masson N, Bollen Z, D'Hondt F. Eye tracking correlates of acute alcohol consumption: A systematic and critical review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 2020;108:400-422. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2019.10.001
51. Mento MA. Different Kinds of Eye Tracking Devices. *Bitbrain* June 12, 2020 (69)
52. Moghadami M, Moghimi S, Moghimi A, Malekzadeh GR, Fadardi JS. The Investigation of Simultaneous EEG and Eye Tracking Characteristics During Fixation Task in Mild Alzheimer's Disease. *Clinical EEG and Neuroscience* 2021; 52(3):211-220. DOI: 10.1177/1550059420932752
53. Moroso A, Ruet A, Deloire M, Lamargue-Hamel D, Cubizolle S., Charré-Morin J., Saubusse A., Brochet B. Cerebellar assessment in early multiple sclerosis. *Cerebellum* 2017;16(2):607-11. DOI: 10.1007/s12311-016-0831-8
54. Nguyen MNL, van der Walt A, Fielding J, Clough M, White OB. Tracking Eye Movements for Diagnosis in Myasthenia Gravis: A Comprehensive Review. *Journal of Neuro-Ophthalmology* 2022;42(4):428-441. DOI: 10.1097/WNO.0000000000001668
55. Okruszek Ł, Bala A, Dziekan M, Szantoch M, Rysz A, Marchel A, Hyniewska S. Gaze matters! The effect of gaze direction on emotional enhancement of memory for faces in patients with mesial temporal lobe epilepsy. *Epilepsy & behavior* 2017;72:35–8. DOI: 10.1016/j.yebeh.2017.04.016
56. Orlosky J, Itoh Y, Ranchet M, Kiyokawa K, Morgan J, Devos, H. Emulation of Physician Tasks in Eye-Tracked Virtual Reality for Remote Diagnosis of Neurodegenerative Disease. *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 2017;23(4):1302–11. DOI: 10.1109/TVCG.2017.2657018
57. Pavisic IM, Firth NC, Parsons S, Rego DM, Shakespeare TJ, Yong KXX, Slattery C, Paterson RW, Foulkes A J M, Macpherson K, Carton AM, Alexander D C, Shawe-Taylor J, Fox NC, Schott JM, Crutch SJ, Primativo S. Eyetracking Metrics in Young Onset Alzheimer's Disease: A Window into Cognitive Visual Functions. *Frontiers in neurology* 2017;8:377. DOI: 10.3389/fneur.2017.00377
58. Perrin M, Robillard M, Roy-Charland A. Observing eye movements and the influence of cognition during a symbol search task: a comparison across three age groups. *Augmentative and Alternative Communication* 2017 ;33(4): 249-259. DOI: 10.1080/07434618.2017.1381990
59. Pham DT, Alcock RJ. *Smart Inspection Systems: Techniques and Applications of Intelligent Vision*, Academic Press 2003
60. Phukan J, Elamin M, Bede P, Jordan N, Gallagher L, Byrne S, Lynch C, Pender N, Hardiman O. The syndrome of cognitive impairment in amyotrophic lateral sclerosis: a population-based study. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2012;83:102–108. DOI:10.1136/jnnp-2011-300188
61. Poletti B, Carelli L, Faini A, Solca F, Meriggi P, Lafronza A, Ciringione L, Pedroli E, Ticozzi N, Ciammola A, Cipresso P, Riva G, Silani V. The Arrows and Colors Cognitive Test (ACCT): a new verbal-motor free cognitive measure for executive functions in ALS. *PLoS One* 2018;13(8):e0200953 DOI: 10.1371/journal.pone.0200953.
62. Poletti B, Carelli L, Solca F, Lafronza A, Pedroli E, Faini A, Ticozzi N, Ciammola A, Meriggi P, Cipresso P, Lulé D, Ludolph A C, Riva G, Silani V. An eye-tracker controlled cognitive battery: overcoming verbal-motor limitations in ALS. *J Neurol* 2017;264(6):1136–1145. DOI: 10.1007/s00415-017-8506-z
63. Proudfoot M, Menke A, Sharma R, Berna CM, Hicks SL, Kennard C, Talbot K, Turner MR. Eye-tracking in amyotrophic lateral sclerosis: A longitudinal study of saccadic and cognitive tasks. *Amyotrophic lateral sclerosis & frontotemporal degeneration* 2015;17(1-2):101–111. DOI: 10.3109/21678421.2015.1054292
64. Ranchet M, Orlosky J, Morgan J, Qadir S, Akinwuntan AE, Devos H. Pupillary response to cognitive workload during saccadic tasks in Parkinson's disease. *Behav Brain Res* 2017;327:162-6. DOI:10.1016/j.bbr.2017.03.043

65. Rees EM, Farmer R, Cole JH, Haider S, Durr A, Landwehrmeyer B, Scahill R., Tabrizi S, Hobbs N. Z. Cerebellar abnormalities in Huntington's disease: a role in motor and psychiatric impairment. *Mov Disord* 2014;29:1648–1654. DOI: 10.1002/mds.25984
66. Shakespeare TJ, Kaski D, Yong KX, Paterson R W, Slattery C, Ryan N S, Schott J M, Crutch S J. Abnormalities of fixation, saccade and pursuit in posterior cortical atrophy. *Brain* 2015;138:1976–1991. DOI: 10.1093/brain/awv103.
67. Tan R H, Ke Y D, Ittner L M, Halliday G M. ALS/FTLD: experimental models and reality. *Acta Neuropathol* 2017;133:177–196. DOI:10.1007/s00401-016-1666-6
68. Tao L, Wang Q, Liu D, Wang J, Zhu Z, Feng L. Eye tracking metrics to screen and assess cognitive impairment in patients with neurological disorders. *Neurol Sci* 2020; 41: 1697–1704. DOI: 10.1007/s10072-020-04310-y
69. Thevenot J, López M B, Hadid A. A survey on computer vision for assistive medical diagnosis from faces. *IEEE J. Biomed. Health Inform* 2018;22:1497–511. DOI: 10.1109/JBHI.2017.2754861.
70. Ting H, Xinyu W, Haiming X. Eye-Tracking in Interpreting Studies: A Review of Four Decades of Empirical Studies. *Frontiers in Psychology* 2022;13. DOI: 10.3389/fpsyg.2022.872247
71. Tolaven O, Elomaa AP, Itkonen M, Vrzakova H, Bednarik R, Huotari A. Eye-Tracking Indicators of Workload in Surgery: A Systematic Review. *Journal of Investigative Surgery* 2022;35(6):1340-9. DOI: 10.1080/08941939.2021.2025282
72. Trofimov AO, Sofronova V, Trofimova K, Dubrovin A, Martynov D, Lidji-Goryaev S, Semyachkina-Glushkovskaya O, Bragin D.E. Eye Tracking Parameters Correlate with the Level of Cerebral Oxygen Saturation in Mild Traumatic Brain Injury: A Preliminary Study. *Adv Exp Med Biol.* 2022;1395:151-6. DOI: 10.1007/978-3-031-14190-4\_26
73. Unger M, Black D, Fischer NM, Neumuth T, Glaser B. Design and evaluation of an eye tracking support system for the scrub nurse. *Int J Med Robot* 2019;15(1):e1954. DOI: 10.1002/rcs.1954
74. Ward N, Hussey EK, Cunningham EC, Paul EJ, McWilliams T, Kramer A. F. Building the multitasking brain: An integrated perspective on functional brain activation during task-switching and dual-tasking. *Neuropsychologia* 2019;132:107149. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia
75. Wei Q, Cao H, Shi Y, Xu X, Li T. Machine learning based on eye-tracking data to identify Autism Spectrum Disorder: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Biomedical Informatics* 2023;137:104-254.
76. Whitmire E, Trutoiu L, Cavin R, Perek D, Scally B, Phillips J, Patel S. EyeContact: scleral coil eye tracking for virtual reality. In: international symposium on wearable computers, digest of papers 2016, DOI: 10.1145/2971763.2971771
77. Witiuk K, Fernandez-Ruiz J, McKee R, Alahyane N, Coe BC, Melanson M, Munoz DP. Cognitive deterioration and functional compensation in ALS measured with fMRI using an inhibitory task. *J Neurosci* 2014;34:14260–14271. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1111-14.2014
78. Wolf K, Galeano Weber E, van den Bosch J J F, Volz S, Nöth U, Deichmann R, Naumer M J, Pfeiffer T., Fiebach C J. Neurocognitive development of the resolution of selective visuospatial attention: functional MRI evidence from object tracking. *Front Psychol* 2018;9:1106. DOI:10.3389/fpsyg.2018.01106
79. Xiao J, Qu J, Li Y. An electrooculogram-based interaction method and its music-on-demand application in a virtual reality environment. *IEEE Access* 2019;7:22059–22070. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2898324
80. Xiarchos A. Robotic Systems Involved in the Diagnosis of Neurodegenerative Diseases. *Advances in experimental medicine and biology* 2020;1194:423. DOI: 10.1007/978-3-030-32622-7\_39
81. Yousef A, Devereux M, Gourraud P A, Jonzson S, Suleiman L, Waubant E, Green A, Graves J S. Subclinical saccadic eye movement dysfunction in pediatric multiple sclerosis. *J Child Neurol* 2019;34(1):38-43. DOI: 10.1177/0883073818807787

**Библиографическая ссылка:**

Шанхоева Д.М., Самедова Э.Ш., Трегуб П.П. Использование метода трекинга движения глаз для диагностики неврологических нарушений (обзор литературы) // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2024. №5. Публикация 3-4 URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2024-5/3-4.pdf> (дата обращения: 23.09.2024). DOI: 10.24412/2075-4094-2024-5-3-4. EDN MMCRVY\*

**Bibliographic reference:**

Shankhоеva DM, Samedova ESh, Tregub PP. Ispol'zovanie metoda trekinga dvizheniya glaz dlja diagnostiki nevrologicheskikh narushenij (obzor literatury) [Use of eye movement tracking for the diagnosis of neurological disorders (literature review)]. *Journal of New Medical Technologies, e-edition.* 2024 [cited 2024 Sep 23];5 [about 16 p.]. Russian. Available from: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2024-5/3-4.pdf>. DOI: 10.24412/2075-4094-2024-5-3-4. EDN MMCRVY

\*номера страниц смотреть после выхода полной версии журнала: URL: <http://medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2024-5/e2024-5.pdf>

\*\*идентификатор для научных публикаций EDN (eLIBRARY Document Number) будет активен после загрузки полной версии журнала в eLIBRARY