

УДК 612.821

## АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УТОМЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ОКУЛОМОТОРНЫХ СОБЫТИЙ

© 2024 г. И. И. Шошина<sup>1, \*</sup>, С. Д. Коваленко<sup>2</sup>, В. В. Кузнецов<sup>3</sup>, И. В. Брак<sup>4, 5</sup>,  
А. М. Кашевник<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Институт когнитивных исследований,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>5</sup>Приволжский исследовательский медицинский университет Минздрава России, Нижний Новгород, Россия

<sup>6</sup>Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: shoshinaii@mail.ru

Поступила в редакцию 27.06.2023 г.

После доработки 26.01.2024 г.

Принята к публикации 02.02.2024 г.

Рассмотрены теоретические предпосылки определения функционального состояния утомления на основе анализа стратегии глазных движений, современные методы оценки движений глаз. Анализ литературы позволяет сделать вывод о том, что в настоящее время существует огромное количество численных характеристик движений глаз, динамика которых гипотетически может позволить судить о степени утомления человека. Однако, пока отсутствуют предложения метода определения степени утомления на основе анализа стратегии глазных движений. В связи с этим, основываясь на представлениях о статическом и динамическом зрении, предложено рассматривать сдвиг численных характеристик движений глаз в сторону показателей, отражающих стратегию динамического зрения, как свидетельство утомления.

**Ключевые слова:** утомление, глазные движения, стратегии движений глаз, окуломоторные события, айтрекинг, биометрия.

**DOI:** 10.31857/S0131164624030074, **EDN:** BULTQU

Утомление — это функциональное состояние, сопровождающееся снижением работоспособности, потерей внимания, замедлением реакции, ростом количества ошибок и другими проявлениями на различных уровнях организации целенаправленной деятельности [1, 2]. Выполнение человеком профессиональной деятельности в состоянии утомления может послужить причиной катастрофических последствий в работе представителей различных профессий: операторов атомных станций, авиадиспетчеров, водителей судов, самолетов, железнодорожных составов, грузового, общественного и личного автотранспорта. В связи с этим, во многих сферах производственной деятельности в настоящее время становятся все более популярны системы поддержки оператора (*Worker Assistance Systems*) [3]. Задача таких

систем, определяя когнитивное состояние оператора и операционный контекст, обеспечивать соответствующие им рекомендации. Раннее обнаружение признаков утомления оператора является решающим фактором для предотвращения возможных нештатных и аварийных ситуаций. Одной из важнейших задач является также дистанционная оценка признаков утомления.

У. Borgianni et al. [3], основываясь на анализе систем поддержки операторов, резюмируют, что измерения параметров глазных движений позволяют в режиме близком к реальному времени дистанционно отслеживать внимание оператора к той или иной области рабочего пространства, объекту наблюдения.

Основной целью настоящей работы является анализ современных исследований определения утомления человека на основе мониторинга параметров глазных движений.

### Теоретические предпосылки определения функционального состояния утомления на основе анализа стратегии глазных движений

Функциональное состояние описывается комплексом интегральных характеристик, которые прямо или косвенно обуславливают выполнение любого вида деятельности [1]. Функциональное состояние утомления имеет разнообразные проявления на поведенческом (снижение производительности труда, уменьшение скорости и точности работы), физиологическом (затруднение выработки условных связей, повышение инерционности в динамике нервных процессов) и когнитивном (снижение чувствительности, нарушение внимания, памяти, сдвиги в эмоционально-мотивационной сфере) уровнях [1, 2, 4, 5].

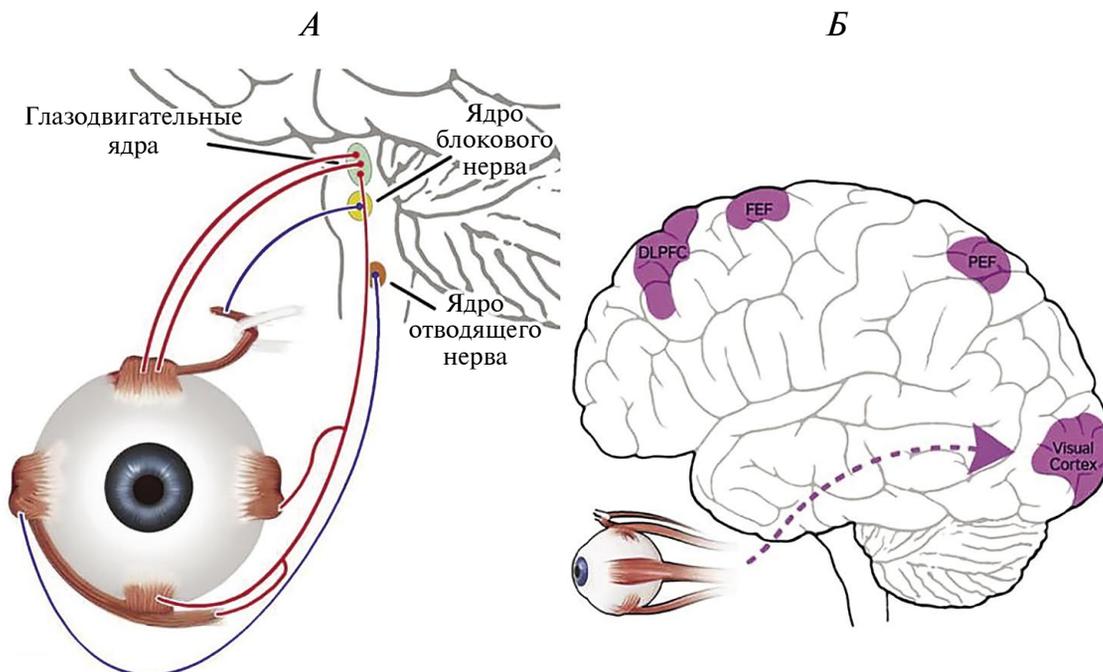
Современные системы технического зрения определяют состояние утомления человека на основе анализа косвенных признаков: доли времени, в течение которого были закрыты глаза (показатель *PERCLOS*), продолжительности морганий, частоты кивков головы, положения лица,

пристальности взгляда [6–12]. Недостаток таких систем в том, что они не позволяют определить степень выраженности утомления [13]. Согласно *M. Golz et al.* [14], даже при одновременной регистрации параметров *PERCLOS*, электроэнцефалограммы (*EEG*) и электроокулограммы (*EOG*) имеющиеся системы плохо различают легкую и сильную степень утомления.

В тоже время, анализ характера движений глаз может предоставить обширную информацию о внимании человека и поведении в опасных ситуациях [4]. Специфика функциональной организации глазодвигательных реакций позволяет использовать их в качестве интегративного показателя состояния центральной нервной системы (ЦНС) в целом и, ствола мозга в частности, организации познавательных процессов, состояния человека и его деятельности [15]. Совокупность движений глаз принято называть еще окулomotorной активностью.

Управление глазодвигательной (окулomotorной) активностью осуществляется на уровне ствола головного мозга и на корковом уровне (рис. 1). Стволовые (подкорковые) центры управления представлены глазодвигательными ядрами, ядром блокового нерва и ядром отводящего нерва (рис. 1, *A*).

Корковые центры управления глазами (рис. 1, *B*) включают: зрительную кору



**Рис. 1.** Нейронные центры управления движениями глаз.

*A* — подкорковые центры управления движениями глаз, *B* — корковые центры управления движениями глаз: Visual Cortex — зрительная кора, PEF — парietoальное зрительное поле, FEF — фронтальное зрительное поле, DLPFC — дорсолатеральная префронтальная кора.

(Visual Cortex), париетальное зрительное поле (PEF), фронтальное зрительное поле (FEF) и дорсолатеральную префронтальную кору (DLPFC).

### Подходы к классификации глазных движений

Анализ литературы свидетельствует о различных подходах к классификации глазных движений. Ниже представлены несколько классификаций, на которых основано большинство современных исследований.

Согласно классификации В.А. Барабанщикова и А.В. Жегалло [16], глазодвигательная или окуломоторная активность представлена макро- и микродвижениями глаз. Макродвижения глаз изменяют положение зрения и обеспечивают сканирование сцены. К ним относятся макросаккады, прослеживающие движения глаз, нистагм, вергентные движения и торзионные движения глаз. Макросаккады — резкие изменения позиции глаза, со скоростью до 900 угл. град/с и амплитудой от 40–50 до 50–60 угл. град [16, 17]. Прослеживающие движения — плавные перемещения глаз, сопровождающие движение наблюдаемого объекта в поле зрения. Прослеживающие движения глаз появляются примерно через 200 мс после начала движения объекта и продолжаются в течение 300 мс после его остановки или исчезновения. Такие движения глаз обеспечивают удержание объекта в зоне наилучшего видения — центральной ямке сетчатки — фовеа. Основной диапазон скоростей прослеживающих движений глаз  $-5^\circ/\text{с}$  — 90 угл. град/с, амплитуда —  $\pm 60$  угл. град по горизонтали и  $\pm 40$  угл. град по вертикали [16]. Нистагм — комплекс окуломоторных движений, состоящий из чередования саккад и плавных прослеживающих движений глаз. Амплитуда нистагма колеблется в пределах 18–16–5 град. Вергентные (содружественные) движения глаз — сведение (конвергенция) и разведение (дивергенция) оптических осей включены в процесс стереоскопического зрения, обеспечивая необходимое соответствие проекций объекта на сетчатках обоих глаз. Торзионные движения связаны с вращением глаз относительно оптической оси и обеспечивают частичную компенсацию наклонов головы относительно гравитационной вертикали. Амплитуда таких движений ограничена 10 угл. град.

Микродвижения или фиксационные движения глаз представлены микросаккадами, дрейфом и микротремором. Микросаккады — быстрые движения глаз длительностью 10–20 мс, амплитудой 2–50', скоростью от 3 до 12 угл. град/с [16]. Дрейф — медленные плавные микродвижения глаз со скоростью от 0 до 40 угл. град/с и длительностью — от 30 до 5000 мс. На долю дрейфа приходится до 97% от общего времени фиксации. Микротремор — микроколебания глаз со средней

амплитудой 20–40" и частотой до 250–270 Гц. Это естественный двигательный фон окуломоторной активности, не поддающийся осознанному контролю [15].

К. Holmqvist et al. [18] предлагают выделять следующие виды движений глаз: фиксация, саккада, глассада (также иногда называемая “постсаккадической осцилляцией”), прослеживающее движение, микросаккада, тремор и дрейф. Таким образом, по сравнению с предыдущей классификацией, авторы выделяют такое окуломоторное событие как “глассада”. По мнению S. Djanian [19] следует рассматривать четыре наиболее важных типа движений глаз: фиксация, саккада, прослеживающее движение и постсаккадическая осцилляция. B. Mahanama et al. [20] в своем обзоре глазных движений и способов их анализа, предлагают различать: фиксации, саккады, прослеживающие движения, тремор, микросаккады, дрейф, вергентные движения и отдельную категорию — моргание. Xian-sheng Li et al. [21] представляют эмпирически рассчитанные показатели фиксации, саккад и прослеживающих движений глаз. D.D. Salvucci и J.H. Goldberg [22] считают, что наибольший интерес из окуломоторных событий представляют: фиксации, саккады и моргания. S. Wang et al. [23] в своей работе по исследованию распознавания глазных движений используют классификацию R.H.S. Carpenter [24], согласно которой все виды глазных движений подразделяются на два типа — сопряженные и не сопряженные. К первому типу движений глаз авторы относят: фиксации, саккады, прослеживающие движения и вестибулоокулярный рефлекс. Вторым типом движений глаз — конвергентные и дивергентные движения.

Следует отметить, что большинство авторов либо не дают подробного описания параметров глазных движений, либо численные характеристики для различных окуломоторных событий отличаются от исследования к исследованию (табл. 1).

### Характеристики глазных движений и их использование

**Фиксации** — периоды удержания изображения или его части в области максимальной остроты зрения — для детального анализа содержащейся информации. Эти периоды имеют специфические динамические характеристики, которые могут дать доступ к важной информации о восприятии, внимании, эмоциональном отклике. Пространственная плотность фиксации взгляда дает представление о картине целенаправленного поиска [16, 18], отражает характер изменения когнитивной нагрузки и внимания [25]. Плотность фиксации вычисляется как отношение количе-

Таблица 1. Численные характеристики основных видов глазных движений

Источник	Фиксация	Саккада	Прослеживающее движение	Тремор	Микросаккада	Дрейф
[16]	Не определяется	Продолжительность, скорость и ускорение зависят от амплитуды. Амплитуда от 40–50° до 50–60°, в естественных условиях 20°	Появляются через 150–200 мс после начала движения объекта. Продолжительность 300 мс. Скорость 5–90°/с. Амплитуда ±60° по горизонтали и ±40° по вертикали	Средняя амплитуда 20–40", частота до 250–270 Гц	Продолжительность 10–20 мс. Диапазон амплитуд 2–50', скорость 3–12°/с	Скорость 0–40°/с, длительность 30–5000 мс
[18]	Продолжительность 200–300 мс	Продолжительность 30–80 мс. Амплитуда 4–20°. Скорость 30–500°/с. Ускорение 4000–8000°/с <sup>2</sup>	Скорость 10–30°/с	Амплитуда <1°. Скорость 20°/с	Продолжительность 10–30 мс. Амплитуда 10–40'. Скорость 15–50°/с	Продолжительность 200–1000 мс. Амплитуда 1–60°. Скорость 6–25°/с
[20]	Продолжительность 30–300 мс	Амплитуда около 2° во время чтения	Скорость 20–40°/с, максимально возможное значение — 130°/с, латентность 100–200 мс	Частота 90 Гц	Частота 1–3 Гц	Амплитуда 6°. Скорость 1°/с
[21]	Скорость 0–30°/с. Продолжительность 80–600 мс	Скорость 30–500°/с, продолжительность 20–40 мс	Скорость 1–30°/с	Не определяется	Не определяется	Не определяется
<a href="https://www.tobii.com/">https://www.tobii.com/</a>	Продолжительность 50–600 мс. Частота <3 Гц	Латентность 100–1000 мс. Средняя продолжительность 20–40 мс	Скорость менее 30°/с	Не определяется	Не определяется	Не определяется
[23]	Продолжительность более 100 мс	Максимальная скорость 1000°/с. Продолжительность 30 мс и более	Не указаны численные значения	Не определяется	Не определяется	Не определяется

ства точек взора к площади фиксации. Частота фиксаций рассматривается как свидетельство сложности задачи, чем частота ниже, тем сложность выше. При этом следует отметить, что при выполнении задачи экспертами отмечается снижение числа фиксаций, по сравнению с новичками [16]. Продолжительность фиксаций также отражает визуальное внимание и его распределение [26], уровень когнитивной нагрузки [27]. Области с наибольшей продолжительностью фиксаций определяют как зоны интереса. Средняя и максимальная продолжительность фиксаций снижаются с увеличением когнитивной нагрузки. Преобладание коротких или длинных фиксаций в наборе данных свидетельствуют об асимметрии распределения продолжительности фиксаций. Анализ вектора смещения фиксаций также позволяет сделать выводы о распределении фиксаций и зрительной нагрузке [16]. Вектор смещения фиксаций вычисляется как суммарное смещение фиксаций относительно центра с учетом их продолжительности.

*Саккады* — макродвижения глаз, обеспечивающие перемещение взора и сканирование сцены. Амплитуда саккад является вариативным и контекстно-зависимым показателем, испытывающим влияние освещения, размеров стимула, цели, сложности задачи [16]. При увеличении амплитуды саккады возрастает ускорение саккады, которое часто регистрируется в целях детекции утомления [28]. Скорость саккад снижается при отсутствии сна, развитии утомления [29]. Асимметрия распределения амплитуды саккад представляет собой параметр, отображающий преобладание одного из двух типов саккад — высоко- и низкоамплитудных, и может изменяться в зависимости от типа задания. Амплитуда саккады, так же как средняя и пиковая скорость саккады, отражает когнитивную нагрузку [16, 20, 26]. Чем сложнее задача, тем выше скорость саккад. Асимметрия саккад характеризует соотношение продолжительности фаз ускорения и торможения во время саккады. Все саккады завершаются глицсадами, однако, если их становится больше, это может говорить о снижении уровня готовности оператора и развитии утомления.

Латентность саккад связана со временем реакции и варьирует в зависимости от цели и типа стимула, распределения внимания, имеет возрастные особенности [30]. В условиях выполнения нескольких задач сразу и слежения за разными объектами, латентность саккад возрастает [16]. Частота саккад отличается для динамических и статических стимулов, увеличивается по мере повышения сложности задачи [31], свидетельствует о развитии утомления [31–33]. Направленные саккад используется для изучения стратегий визуального поиска [34], продолжительность саккад — при изучении внимания и когнитивной на-

грузки [16, 35], также, как длина и скорость саккад [36, 37]. Схожесть пути сканирования используется в исследованиях визуального внимания [38]. Количество перегибов траектории сканирования зависит от сдвигов внимания, появляющихся во время выполнения задачи и рассчитывается как количество саккад, в которых горизонтальная и/или вертикальная скорость меняет знаки [39]. Продолжительность (временная) траектории вычисляется при помощи суммирования фиксаций и саккад на определенном участке. Увеличение продолжительности может говорить о снижении эффективности визуального поиска [40]. Интервал между саккадами (стандартное отклонение, среднее, коэффициент дисперсии) используется в исследовании умственного утомления [41].

*Микросаккады* — разновидность микродвижений глаз, сопровождающих периоды фиксации, рассматривают как индикатор скрытого внимания [42]. Амплитуда микросаккад свидетельствует о когнитивной нагрузке [26] и увеличивается во время выполнения более сложных задач [43].

*A.S. Zandi et al.* [44] в задаче детекции утомления у водителей используют также ряд более сложных для вычисления параметров глазных движений (табл. 2). Авторы вводят индекс сходства (*similarity index*), который является мерой оценки того, насколько взгляд был сфокусирован на протяжении определенного периода времени. Этот индекс может быть вычислен для взгляда, фиксации и саккады следующим образом:

$$S = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \mathbb{H}(\varepsilon - \|g_i - g_j\|), \quad (1)$$

где  $N$  — общее количество векторов взгляда,  $i$  — вектор взгляда (с соответствующим углом направления взгляда  $g_i^h$  и углом тангажа  $g_i^p$ ).  $H$  — ступенчатая функция Хевисайда,  $\|\cdot\|$  — евклидово расстояние, а “ $\varepsilon$ ” — радиус окрестности. В данной работе радиус окрестности был установлен на 0.087 радиан ( $5^\circ$ ) для общего взора и саккад и 0.0175 ( $1^\circ$ ) для фиксаций. *Similarity index* — это характеристика, вычисляемая по некоторому окну (длиной  $n$  секунд): сравниваются все саккады со всеми саккадами, и также все фиксации со всеми фиксациями. Саккады считаются совпадающими, если их векторная разница не превышает  $5^\circ$ . Фиксации считаются совпадающими, если разница в их координатах не превышает  $1^\circ$ . В случае совпадения индекс увеличивается на 1, в противном случае — на ноль.

*Моргание.* Параметры моргания являются одними из самых популярных инструментов детекции утомления. Частота, скорость и продолжительность моргания могут отображать степень когнитивной нагрузки [35] и утомления [51].

Таблица 2. Базовые характеристики окуломоторных событий и их использование

Характеристика	Исследовательский вопрос
<b>Фиксации</b>	
Количество общее в области интереса на цели	Семантическая важность, визуальный поиск [16], когнитивная нагрузка [18]
Частота	Сложность задачи [16]
Плотность	Когнитивная нагрузка, внимание [25]
Продолжительность общая асимметрия распределения	Когнитивная нагрузка [16, 26, 27]
Зона интереса время непрерывного рассматривания суммарное время продолжительность первого непрерывного рассматривания количество фиксаций	Информативность объекта [16], внимание ( <a href="https://imotions.com/blog/learning/10-terms-metrics-eye-tracking/">https://imotions.com/blog/learning/10-terms-metrics-eye-tracking/</a> )
Время до первой фиксации	Когнитивная нагрузка [35] Визуальный поиск ( <a href="https://imotions.com/blog/learning/10-terms-metrics-eye-tracking/">https://imotions.com/blog/learning/10-terms-metrics-eye-tracking/</a> )
Начало и конец фиксации	Детекция утомления [45]
Координаты вертикальные горизонтальные	Использование машинного обучения для детекции событий [45]
<b>Саккады</b>	
Амплитуда горизонтальные саккады вертикальные саккады векторные саккады максимальная амплитуда	Когнитивная нагрузка, сложность задания [20, 26]
Продолжительность средняя кумулятивная	Внимание и когнитивная нагрузка [35] Эргономика [16]
Скорость вертикальная горизонтальная пиковая средняя и пиковая скорость векторных саккад	Когнитивная активация [16], сонливость [29], детекция утомления [41, 45]
Индикатор формы волны скорости	Биометрическая идентификация [39]
Латентность	Распределение внимания [16]
Количество	Память [16]

Таблица 2. Продолжение

Характеристика	Исследовательский вопрос
Частота	Сложность задания [31, 32], заболевания, детекция утомления [33]
Ускорение	
горизонтальное	
вертикальное	
коэффициент	
Направление	
Начало и окончание	
Длина	Умственные усилия [46]
Межсаккадный интервал	Детекция утомления [41]
Микросаккада	
Амплитуда	Когнитивная нагрузка [43], скрытое внимание и сложность задачи [26]
Прослеживающие движения	
Направление	Направление движущегося объекта [47, 48]
Скорость	Траектория движения объектов, возраст, профессия, заболевания [16]
Ускорение	Траектория движения объекта [20]
Латентность	
Моргание	
Частота	Внимание [49]
Амплитуда	Детекция утомления, сложность задания [20]
Латентность	Детекция утомления [50]
Продолжительность	Когнитивная нагрузка [26, 35]
Скорость	Когнитивная нагрузка, распределение внимания [35]
Количество	Детекция утомления [51]
в минуту	
общее	Детекция умственного утомления [41]
Интервал между морганиями	
стандартное отклонение	
среднее	
коэффициент дисперсии	Детекция утомления [44]
Процент	
Серия морганий в промежутке между (0.5–2.0 с)	Детекция утомления [52]
Зрачок	
Диаметр	Детекция утомления у водителей [44]. Опыт, сложность задачи [53]
максимальный	
минимальный	
средний	
Стандартное отклонение	
Скорость сужения	

Таблица 2. Окончание

Характеристика	Исследовательский вопрос
Размер процентное изменение максимальный размер для правого и левого зрачка средний по обоим	Когнитивная нагрузка [54] Опыт, сложность задачи [53]
Энтропия	Опыт [54]
Индекс когнитивной активности ( <i>ICA</i> )	
Индекс активности зрачка ( <i>IPA</i> )	Когнитивная активность [54-56]
Высокий/низкий индекс активности зрачка ( <i>LHIPA</i> )	
Взгляд	
Координаты взгляда в заданный момент времени	Шаблоны взгляда [57], разработка биометрических систем [58]
Координаты Минимальное	
Координаты Максимальное	Детекция утомления [59, 60], нагрузка при выполнении задачи [60]
Координаты Среднее	
Координаты Стандартное отклонение	
Энтропия	Сложность задачи [53], детекция утомления [44], эффектив- ность визуального сканирования [61]
Угол наклона взгляда среднее	
медианное значение	
стандартное отклонение	Детекция утомления [44]
Отношение скоростей	
Индекс сходства ( <i>similarity index</i> )	

Вместе с количеством морганий для изучения утомления рассматривается серия морганий в промежутке 0.5–2 с [52]. Согласно обзору [26], продолжительность и частота моргания снижаются с увеличением сложности задачи и концентрации внимания. Латентность моргания – промежуток времени между появлением релевантной для решения задачи информации и последующим инициированием моргания увеличивается вместе с развитием утомления [50]. Амплитуда моргания связана с измерением утомления и сложности задачи [20]. Процентное соотношение фиксаций, саккад и морганий фигурирует в исследованиях детекции утомления, как параметр, представляемый в виде доли эпохи, включающей окуломоторное событие.

*Взгляд.* Что касается координат взгляда, для изучения нагрузки при выполнении задачи рассматривается стандартный набор параметров для анализа координат взгляда (табл. 2), такие как минимальное, максимальное, среднее и стандартное

отклонение [60]. Координаты взгляда в заданный момент времени используются для изучения шаблонов перемещения взгляда [57], а также при разработке биометрических систем [62]. Для данных взгляда также рассчитывается соотношение пиковой и средней скорости [44]. Время непрерывного рассматривания – пребывания в зоне интереса определяется, как характером решаемой задачи, так и информативностью изучаемого объекта. Чем она выше, тем больше время нахождения взора в зоне интереса. Следует учитывать, что отсутствие опыта и проблемы с обработкой информации также могут привести к росту значений данного параметра. Суммарное время, проведенное в зоне интереса, вычисляется как суммарная продолжительность всех фиксаций в выделенной области [16]. Среднее время пребывания в зоне интереса (например, на приборной панели для водителя) может отражать умственную нагрузку, тогда как параметр времени фиксации может быть полезен для оценки неопределенности и риска ситуации [63]. В своих исследованиях

компания *iMotions* подробно описывает ряд характеристик, связанных с зонами интереса. Так, например, время до первой фиксации фигурирует в изучении времени, необходимого для нахождения цели. С этой характеристикой также тесно связана продолжительность первой фиксации. В случае если время до первой фиксации мало, и сама она непродолжительная, это означает высокую степень привлекательности зоны интереса (<https://imotions.com/blog/learning/10-terms-metrics-eye-tracking/>).

Частота интрузий — параметр, отражающий количество резких отклонений взгляда от целевого стимула и возврат обратно. Его изменение связывают с наличием движущегося целевого объекта, задачей извлечения из памяти и воспроизведения расположения объектов [16], [64]. Плотность матрицы переходов используется для изучения парадигмы визуального поиска. Чем ниже значения этого показателя, тем эффективнее происходит поиск [20]. Энтропия взгляда также связана с эффективностью визуального сканирования [61], коррелирует с увеличением сложности выполняемой задачи [53]. Среднее и медианное значение, а также стандартное отклонение для угла наклона взгляда используется для детекции утомления [44].

**Прослеживающие движения.** Направление, латентность, скорость и ускорение прослеживающих движений глаз зависит от траектории движения объекта [16, 20, 48]. При этом ускорение падает в случае конкурирующих стимулов и растет в случае слежения за целевыми стимулами [65]. Скорость прослеживающих движений изменяется в течение жизни, в частности, увеличивается латентность [66].

**Динамика зрачка.** Согласно обширному обзору *O. Tolvanen et al.* [53] о влиянии когнитивной нагрузки на окуломоторные события, размер зрачка коррелирует с увеличением сложности задачи. Расширение зрачка является отображением использования ресурсов обработки информации, поэтому рассматривается в рамках изучения когнитивной нагрузки, внимания, выполнения сложных задач [67, 68], исследованиях умственного утомления, засыпания и нагрузки во время вождения [41, 44, 60]. При использовании в исследованиях характеристик зрачка необходимо учитывать его чувствительность к изменению освещения.

Индекс когнитивной активности (*ICA*), введенный *S.P. Marshall* [54], является мерой флуктуации диаметра зрачка. Для его вычисления удаляются сегменты данных, отвечающие за моргание. Индекс активности зрачков (*IPA*) появился как усовершенствованный параметр *ICA* [55]. Для расчета *IPA* не использует промежутки записи, предшествующие и последующие за морганием

(200 мс). Разновидностью *IPA* является низкий/высокий индекс активности зрачков (*LHIPA*), связанный с подсчетом максимумов модуля низкочастотных и высокочастотных полос, содержащихся в вейвлете. Увеличение реакции зрачка находит отражение в уменьшении значения *LHIPA*. *LHIPA* меняется в зависимости от сложности задачи и когнитивной нагрузки. С использованием индекса активности зрачка/ индекса когнитивной активности (*PAI/CAI*) определяют изменение диаметра зрачка. Особенность их в том, что для шумоподавления используется вейвлет-разложение. Разложение в данном случае выполняется на две компоненты: высокочастотную и низкочастотную, и после этого применяется простое пороговое шумоподавление [56].

### Определение утомления по динамике глазных движений

Окуломоторные события успешно используются при детекции утомления. Все параметры, связанные с детекцией утомления могут быть разделены на три группы: связанные с саккадами, морганиями и изменением размера зрачка. *M. Russo et al.* [29] сообщают о потенциальной полезности характеристик глазодвигательных движений для выявления ухудшения сложной двигательной активности при хроническом ограничении длительности сна и возникающей усталости (в терминах авторов). Показано, что при недостатке сна наблюдается снижение скорости саккад и уменьшение начального размера зрачка. По данным исследования *S. Lyapunov et al.* [13] треморные движения глаз являются объективным маркером утомления водителя.

Основные параметры окуломоторных событий, коррелирующие с состоянием утомления человека, а также характер их изменения отражены в табл. 3. Такие численные характеристики саккад, как пиковая скорость и продолжительность являются релевантными показателями утомления [46, 69], как и анализ пиков ускорения [70]. *J.T. Chen et al.* [46] были проведены два эксперимента с использованием нескольких типов заданий: саккадная задача, про- и антисаккадная задача (*pro* и *antisaccade task*) с использованием эмоциональных аудиальных стимулов. Детекция утомления была основана на использовании скоростных показателей саккад и показателей активности зрачка. По мере развития утомления наблюдалось снижение пиковой скорости произвольных саккад, уменьшение базового абсолютного размера зрачка, так называемого тонического размера зрачков и фазических зрачковых реакций. Более того, тонический размер зрачка влиял на латентность и динамику саккад, причем наклон главной последовательности саккад был более крутым по мере увеличения тонического размера зрачков.

Таблица 3. Изменение параметров окуломоторных событий в связи с утомлением

Название	Изменение	Источник
Средняя скорость саккад	Растет	[71]
	Падает	[72]
Относительная скорость саккад	Падает	[73]
Пиковая скорость саккад	Падает	[46, 69, 74–76]
	Растет	[71, 75]
Продолжительность саккад	Падает	[69]
	Растет	[78, 79]
Амплитуда саккад	Растет	[77, 78]
	Падает	[76]
Количество микросаккад	Падает	[73]
	Растет	[77]
Пиковая скорость и амплитуда саккад по отношению к времени реакции	Растет	[59, 69, 78, 80, 81]
	Падает	[82]
Частота моргания	Не изменяется	[83]
	Растет	[69, 71, 73, 78, 81, 83, 84]
Продолжительность моргания	Падает	[82]
	Падает	[81]
Интервал между морганиями	Растет	[52]
Количество морганий	Падает	[52]
Скорость моргания	Падает	[59, 71, 74, 85]
Диаметр зрачка	Растет	[86]
Диапазон расширения зрачка	Растет	[87]
Процент взгляда за кадром	Не известно	[44]
	Падает	[73]

Коммерческая патентованная установка *FIT 2500 Fatigue Analyzer* (<https://www.pmifit.com/research.pdf>), сочетающая в себе пупиллометр и окулограф, использует алгоритм, основанный на анализе значений скорости саккад, а также диаметра, амплитуды и латентности периода сужения зрачка, полученных в ходе процедуры стимуляции зрачка вспышками яркого света разной продолжительности [87]. Расчет индекса утомления  $FIT_{index}$  производится по формуле:

$$FIT_{index} = \left( \frac{PD - \mu PD}{\sigma PD} \right)^2 + \left( \frac{CA - \mu CA}{\sigma CA} \right)^2 + \left( \frac{CL - \mu CL}{\sigma CL} \right)^2 + \left( \frac{SV - \mu SV}{\sigma SV} \right)^2, \quad (2)$$

где  $PD$  — диаметр зрачка,  $CA$  — амплитуда сужения зрачка,  $CL$  — латентный период сужения зрачка,  $SV$  — скорость саккад. Значения индекса до 18.467 считались нормой. Данный метод детекции утомления требует специфического обо-

рудования, что делает процедуру его проведения сложной в плане внедрения в рабочий процесс оператора.

В работе по детекции утомления *L.L. Di Stasi et al.* [75] оценивали продолжительность саккад и их пиковую скорость, погрузив участников в виртуальную среду, имитирующую вождение автомобиля в течение 2 ч. До и после сессии вождения автомобиля, а также после небольшого перерыва, участники проходили тест контролируемой фиксации (фиксация на точке, а затем на целевом объекте). В результате анализа саккадических характеристик авторы выявили рост продолжительности и падение пиковой скорости саккад соответственно. Кроме того, они выявили, что 15-минутный перерыв после нагрузочного задания недостаточен для восстановления организма и возврата к исходному уровню утомления. Эта же группа авторов позднее делает вывод, что на снижение скорости саккад помимо сложности задачи влияет продолжительность ее выполнения [88]. Для подтверждения своих гипотез авторы провели еще один эксперимент, тестируя хирур-

гов до и после 45-минутной операции [74]. Участникам требовалось фиксироваться на целевых стимулах в разных частях экрана. Снижение показателя пиковой скорости саккад по отношению к амплитуде было описано и в работе детекции утомления во время совершения полета (150 мин) [89].

Такие параметры как частота и продолжительность моргания часто фигурируют в изучении связи окуломоторных событий с утомлением [52, 69, 83–85]. *R. Horiuchi et al.* [52], используя специальную систему детекции морганий, установили, что количество морганий линейно увеличивается со временем, тогда как скорость морганий уменьшается на протяжении выполнения задачи на математическое сложение.

*R. Zargari Marandi et al.* [69] представили исследование утомления у молодых и пожилых людей. По данным авторов частота и продолжительность морганий увеличиваются в условиях выполнения *TOT (time-on-task)*. По их мнению, изменение частоты морганий связано с изменением бдительности (*vigilance*) и уровня внимания. Изменение продолжительности моргания они связывают с изменениями уровня нейрональной активации мигательных мотонейронов и круговой мышцы глаза по мере прогрессирования утомления. Кроме того, при изучении трех типов продолжительности фиксации (<150, 150–900, >900 мс), авторы пришли к выводу, что продолжительность фиксации средней длительности растет в связи с утомлением. Показано также, что пиковая скорость саккад и их продолжительность снижаются по мере прохождения эксперимента.

Описывая в своей работе по детекции утомления у солдат в полевых условиях глазодвигательные характеристики, *R. Schweitzer* и *M. Rolfs* [81] приводят свидетельства того, что при утомлении частота и продолжительность морганий растут, а интервал между двумя морганиями падает. Авторы также обращают внимание на то, что частота моргания в какой-то момент времени достигает определенного предельного значения, тогда как степень утомления может продолжать увеличиваться. Продолжительность моргания является популярным параметром для детекции утомления, однако необходимо учесть, что при длительных измерениях возможно возникновение интра- и интервариабельности, так как частота моргания увеличивается, интервал между морганиями уменьшается. Использовать этот параметр довольно проблематично ввиду выраженных индивидуальных различий.

*M.B. Herlambang et al.* [78], исследуя связь утомления и мотивации, установили, что после 2.5-часового эксперимента по измерению времени реакции при выполнении сложного задания количество и продолжительность отвлечения от за-

дания возрастали, также как частота и продолжительность моргания, частота и амплитуда саккад. Согласно данным исследования *M. Gergelyfi et al.* [80], по изучению утомления и отвлечения от задачи, а также влияния мотивации на поведение и физиологические показатели, частота моргания увеличивалась и по мере возрастания уровня утомления во время выполнения задания на решение sudoku (в течение 120 мин). *G. Borghini et al.* [82] также обращают внимание на то, что уменьшение продолжительности и частоты морганий связано с увеличением сложности задачи. Авторы объясняют это тем, что трудная задача требует большей концентрации, а значит, приводит к сокращению времени с закрытыми глазами.

В своей работе по изучению изменения внимания ввиду утомления *J.F. Hopstaken et al.* [85] использовали *N-back* тест с дистракторами в виде лиц. Участнику одна за другой предъявлялись буквы. Его задачей было определить, является ли представленная на данный момент на экране буква такой же, что была 2 позиции назад. Количество времени, которое взгляд проводил в фиксациях за пределами экрана, стало значительно выше в конце эксперимента. При изменении размера вознаграждения за участие в эксперименте этот эффект стал меньше, что говорит о том, что повышение степени утомления не всегда сопровождается уменьшением внимания к заданию и увеличению внимания к дистракторам в виде лиц. Значение параметра диаметра зрачка значительно уменьшилось к концу выполнения теста (и увеличилось, после смены мотивации).

В своем исследовании поведения операторов экскаватора *J. Li et al.* [59] использовали окулограф, камеру сцены и две камеры для области глаз. В качестве основного задания была использована симуляция управления экскаватором. От каждого участника требовалось прохождение *TOO (time-on-operating)* задания для развития утомления. Протяженность всего эксперимента составила 100 мин, включая тренировку, 5 тестов *TOO* и перерыв. Основной частью эксперимента было выполнение повседневных задач оператора экскаватора, остальную часть занимал тест *HDT (hazard detection task)*, который требовал от участников ответа на визуальный стимул с целью детекции опасного (рискованного) поведения. Этот тест был в форме определения по зеркалам заднего вида степени опасности местоположения человека. Для детекции утомления были выбраны следующие параметры: частота и продолжительность моргания, диаметр зрачка, положение взгляда (горизонтальные и вертикальные координаты взгляда, количество точек взгляда на мониторах). Результаты анализа показали значительный рост частоты морганий, снижение диаметра зрачка и рассеивание внимания оператора при развитии утомления.

В еще одном исследовании, посвященном изучению утомления в условиях прохождения теста в симуляции, были водители грузовиков [83]. Запись данных производилась два раза — в бодром состоянии и утомленном, после рабочей смены. Авторы рассматривали показатели: *PERCLOS* (*Percentage of Eyelid Closure over the Pupil over Time*), продолжительность закрытия глаз (*eye closure duration*) и частота закрытия глаз (*frequency of eye closure*). Продолжительность закрытия глаз вычисляется как средняя продолжительность кластеров за период времени (30 или 60 с), где кластер представляет собой набор непрерывных кадров, в которых глаза классифицируются как закрытые. Частота закрывания глаз вычисляется при помощи количества зафиксированных закрытий глаз, отличающихся от морганий (т.е., протяженностью более 200 мс). Согласно результатам анализа, первые два показателя коррелируют с утомлением, тогда как частота закрытия глаз оказалась не связана с ним.

Для изучения детекции утомления при помощи ЭЭГ и айтрекинга *A.S. Zandi et al.* провели эксперимент с вождением автомобиля [44]. Контрольный тест длился 10 мин в утреннее время, к участникам не предъявлялось никаких требований относительно порядка вождения. Основная часть эксперимента состояла из 30-минутной езды (в дневное время) с определенными условиями (отсутствие разговоров, соблюдение скоростного режима, выполнение ряда задач, например парковка и разворот). Авторы извлекали 34 параметра таких окуломоторных событий как взгляд, моргание, диаметр зрачка и степень открытости глаза. После анализа данных с применением метода случайного леса (*Random Forest*) — алгоритма машинного обучения, часто используемого в задачах классификации и регрессии, авторы выделили 10 наиболее репрезентативных параметров: отклонение взгляда, среднее значение взгляда, процент саккад, вертикальный путь сканирования саккад, горизонтальный путь сканирования саккад, горизонтальная скорость саккад, процент моргания, средний диаметр зрачка, отклонение диаметра зрачка, средняя степень открытости глаз.

*X. Hu* и *G. Lodewijks* [71] в исследовании с задачей активного и пассивного вождения показали, что средняя скорость и продолжительность саккад увеличиваются с ростом степени выраженности утомления. Продолжительность моргания значительно выросла после 1 ч активного вождения автомобиля. Диаметр зрачка уменьшился после часового активного и пассивного вождения, при этом не изменившись в условиях полуторачасового пассивного вождения.

Изучая вопрос внимания в условиях депривации сна, *T. Abe et al.* [73] показали, что с течением

времени средняя степень открытости глаз (*Average Eyelid Opening Degree*), диаметр зрачка, относительная скорость саккад уменьшаются, а продолжительность моргания, соотношение амплитуды и скорости открытия/закрытия глаз увеличиваются. А также вследствие депривации сна снижается частота микросаккад и соотношение количества микросаккад к общему количеству саккад. *L.S. Stone et al.* [79] показали значимый рост частоты саккад в связи с отсутствием сна, нарушением циркадных ритмов и развивающимся утомлением.

### Обоснование оценки утомления на основе анализа стратегии глазных движений

Согласно *Б.М. Величковскому* [4], наблюдая характер движений глаз, можно с высокой степенью вероятности определить, способен ли человек идентифицировать возникшую в его поле зрения опасную ситуацию или в этот момент он находится в режиме распределенного внимания, что существенно снижает скорость и точность его реакции. Два отличающихся характера глазных движений в естественной среде проявляются в амбиентных и фокальных зрительных фиксациях [90–93]. Исследования *В.М. Velichkovsky et al.* [92] позволили установить нейрофизиологическую основу этих отличающихся характеров движений глаз, продемонстрировать их связь с двумя главными "потокками" переработки зрительной информации в коре головного мозга человека: дорзальной и вентральной крупномасштабными нейронными системами, несущими информацию из каудальных во фронтальные зоны коры головного мозга (рис. 2).

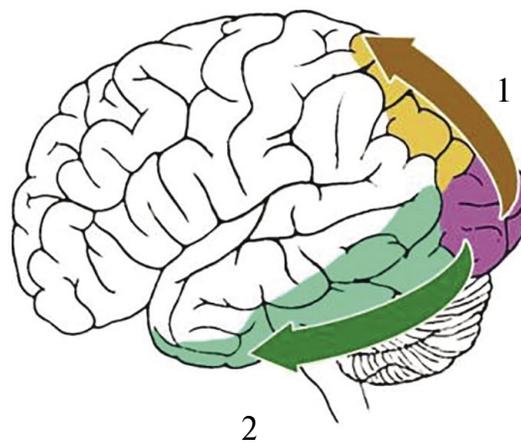


Рис. 2. Дорзальная (1) и вентральная система (2), как нейронная основа пространственного динамического и предметного статического зрения.

По данным исследований *B.M. Velichkovsky et al.* [92] амбиентный характер глазных движений определяет динамическое зрение и сопровождается активацией структур мозга, относящихся к дорзальной зрительной системе, тогда как фокальный — совпадает по времени с активацией структур вентрального пути. Дорзальный поток (рис. 2) пролегает через задне-теменную кору, дополнительное зрительное поле, прилегающее к моторным зонам коры головного мозга, и отвечает за глобальный анализ информации, быстрое сканирование зрительной сцены, охват множества объектов, оценку движения и взаимного пространственного расположения, периферическое зрение, определяет амбиентный характер глазных движений (короткие фиксации) [4, 92].

Вентральный поток информации из каудальных во фронтальные зоны коры мозга пролегает через нижнюю височную кору, обеспечивая локальный анализ информации, распознавание тонких деталей зрительных объектов, статическое, центральное зрение, фокальный характер глазных движений (продолжительные фиксации).

Согласованная работа этих систем обеспечивает целостность восприятия, нарушения которого наблюдаются при рассогласовании их взаимодействия [93], что, в свою очередь, проявляется в изменении функции внимания, в частности в сдвиге равновесия между процессами распределения и концентрации внимания [94].

Результаты исследований, выполненных на модели психопатологии, характеризующейся выраженным снижением функции внимания, свидетельствуют о том, что доминирование статического центрального зрения (вентральный, он же височный путь) или динамического периферического (дорзальный или теменной путь) зрения в состоянии утомления будет приводить к снижению эффективности деятельности в результате смещения равновесия между концентрацией и распределением внимания [95] в сторону его распределения. Таким образом, исходя из данных нейрофизиологических исследований [92] о параметрах динамического и статического зрения, при развитии утомления в ЦНС будут изменяться их характеристики, отражающие работу механизмов глобального и локального анализа информации. Нейронным субстратом этих механизмов является магно- и парвоклеточная нейронные системы, берущие начало от разного типа ганглиозных клеток сетчатки, несущих информацию к разным слоям латерального коллатерального тела таламуса, нейроны которых, в свою очередь, посылают свои отростки к разным слоям первичной зрительной коры, где далее происходит разделение на дорзальный (теменной) и вентральный (височный) корковые потоки информации из каудальных (задних) во фронтальные зоны коры головного мозга [93, 95]. Основными пока-

зателями, отличающими стратегии динамического и статического зрения, являются длительность фиксации и амплитуда саккад [92].

*K. Kunasegaran et al.* [96] в своем обзоре, рассматривая вопрос понимания когнитивного утомления и его выявления, отмечают, что областями мозга, которые в первую очередь при этом страдают, являются зрительная и лобная кора [97]. Так как саккадические движения глаз связаны с нейронной активностью в лобной доле [98], надежность и валидность использования саккадических движений глаз для выявления утомления будут высокими. *T. Bafna* и *J.P. Hansen* [99] показали, что саккады являются наиболее многообещающей категорией, при этом средняя и пиковая скорость саккад обеспечивают быстрый доступ к когнитивным состояниям в течение 30 мин после утомительной деятельности. *M.F. Ansari et al.* [100] предложили модель обнаружения когнитивного утомления с помощью регистрации и анализа параметров взгляда на основе внешности с использованием сверточных нейронных сетей. Авторы продемонстрировали успешность расшифровки саккадических движений глаз по изображениям лиц с настольных веб-камер.

В исследовании пилотов *S. Naeeri et al.* [101] были изучены положительные или отрицательные корреляции между показателями теста на время реакции и показателями движения глаз (размер зрачка, число фиксации глаз, продолжительность фиксации, энтропия зрения), на основе которых были разработаны прогностические модели утомления пилотов. Авторами предложены две прогностические модели утомления, исходя из установленного влияния на стратегию глазных движений фактора экспертности, преобладания у новичков распределения внимания. Кроме того, результаты регрессий показали, что для прогнозирования утомления может быть достаточно одного или подмножества показателей движения глаз. *L. Mengtao et al.* [102] в своем обзоре об использовании технологии отслеживания глаз для повышения безопасности в авиационной промышленности отмечают, что показатели фиксации, визуального поиска, зрачков, саккад и моргания наиболее перспективны при оценке функционального состояния пилотов.

Поскольку видеометоды измерения зрительных метрик являются многообещающим и практичным методом мониторинга утомляемости оператора, в настоящее время активно обсуждается взаимосвязь между утомлением и показателями зрения для реализации прагматичного детектора утомления операторов и лиц других профессий [101, 103, 104]. В работе *X. Hu* и *G. Lodewijks* [103] обсуждаются будущие направления с точки зрения методологии проведения исследований и анализа утомления с использованием параметров, связанных с глазами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье выполнен анализ литературы по использованию параметров глазных движений для оценки утомления. Результаты анализа позволяют сделать вывод о многообразии параметров глазных движений, используемых для оценки утомления. Наиболее популярными и надежными параметрами окуломоторных событий для детекции утомления выступают саккадические показатели (пиковая и средняя скорости, продолжительность), а также количество и продолжительность морганий. Ряд параметров является противоречивым для детектирования состояния утомления и скорее всего противоположные изменения параметров зависят от контекста и состояния, в котором находится оператор, например, характера выполняемой работы. Потенциальными информативными маркерами утомления могут выступать параметры стратегии динамического и статического зрения. Сдвиг в сторону стратегий динамического или статического зрения будет сопровождаться изменением: амплитуды саккад, длительности фиксаций, местоположения фиксаций, количества фиксаций и т.д.

Результаты показывают перспективность использования движений глаз в качестве индикатора для прогнозирования утомления и обеспечивают основу, которая может приблизить к разработке системы детекции утомления в режиме реального времени, для предотвращения критических несчастных случаев.

**Финансирование работы.** Исследование поддержано Фондом содействия инновациям (проект КодИИ-205491).

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исакова М.* Тема по ВПП № 22 для военнослужащих, проходящих военную службу по контракту и призыву // Армейский Сборник. 2021. Т. 8. С. 126.
2. *Величковский Б.Б.* Когнитивные эффекты умышленного утомления // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2019. № 1. С. 108.
3. *Borgianni Y., Rauch E., Maccioni L., Mark B.G.* User experience analysis in industry 4.0 – The use of biometric devices in engineering design and manufacturing / IEEE International conference on Industrial Engineering and Engineering Management. (IEEM), Bangkok, Thailand, 16-19 December, 2018. IEEE Computer Society, 2019. P. 192.
4. *Величковский Б.М., Ушаков В.Л.* Когнитивные науки и новые медицинские технологии // Современные технологии в медицине. 2019. Т. 11. № 1. С. 8.
5. *Robertson C.V., Marino F.E.* Cerebral responses to exercise and the influence of heat stress in human fatigue // J. Therm. Biol. 2017. V. 63. P. 10.
6. *Bergasa L.M., Nuevo J., Sotelo M.-A. et al.* Real-time system for monitoring driver vigilance // IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2006. V. 7. № 1. P. 63.
7. *D’Orazio T., Leo M., Guaragnella C., Distante A.* A visual approach for driver inattention detection // Patt. Recog. 2007. V. 40. № 8. P. 2341.
8. *Al-Anizy G.J., Nordin M.J., Razooq M.M.* Automatic driver drowsiness detection using haar algorithm and support vector machine techniques // Asian J. Appl. Sci. 2015. V. 8. № 2. P. 149.
9. *Golz M., Sommer D., Chen M. et al.* Feature fusion for the detection of microsleep events // J. VLSI Sign. Process Syst. Sign. Im. 2007. V. 49. № 2. P. 329.
10. *Liu Z., Peng Y., Hu W.* Driver fatigue detection based on deeply-learned facial expression representation // J. Vis. Commun. Image Represent. 2020. V. 71. № 2. P. 102723.
11. *Mandal B., Li L., Wang G.S., Lin J.* Towards detection of bus driver fatigue based on robust visual analysis of eye state // IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2016. V. 18. № 3. P. 545.
12. *Sigari M.H., Fathy M., Soryani M.* A driver face monitoring system for fatigue and distraction detection // Int. J. Vehicul. Technol. 2013. V. 2013. P. 1.
13. *Ляпунов С.И., Шошина И.И., Ляпунов И.С.* Треморные колебания глаз как объективный показатель утомления водителей // Физиология человека. 2022. Т. 48. № 1. С. 89.
14. *Golz M., Sommer D., Trutschel U. et al.* Evaluation of fatigue monitoring technologies // Somnologie. 2010. V. 14. № 3. P. 187.
15. *Кубарко А.И., Лухачев С.А., Кубарко Н.П.* Зрение (нейрофизиологические и нейроофтальмологические аспекты): монография в 2 т. Т. 2: Нейронные механизмы контроля установки и движения глаз и их нарушения при заболеваниях нервной системы. Минск: БГМУ, 2009. 352 с.
16. *Барабанищikov В.А., Жегалло А.В.* Айттрекинг: методы регистрации движений глаз в психологических исследованиях и практике. М.: Когито-центр, 2014. С. 117.
17. *Ярбус А.* Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965. 161 с.
18. *Holmqvist K.* Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures. O.: OUP Oxford, 2011. 560 p.
19. *Djanian S.* Eye movement classification using deep learning. Aalborg University: Department of Electronic Systems, 2019. 76 p.
20. *Mahanama B., Jayawardana Y., Rengarajan S. et al.* Eye movement and pupil measures: A review // Front. Comput. Sci. 2022. V. 3. P. 733531.
21. *Li X., Fan Z., Ren Y. et al.* Classification of eye movement and its application in driving based on

- a refined pre-processing and machine learning algorithm // *IEEE Access*. 2021. V. 9. P. 136164.
22. *Salvucci D.D., Goldberg J.H.* Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols / *Proceedings of the 2000 symposium on Eye Tracking Research and Applications (ETRA '00)*. Palm Beach Gardens, FL, USA. November 6–8, 2000. Association for Computing Machinery (ACM). New York, NY, USA, 2000. P. 71.
  23. *Wang S., Wang Q., Chen H.* Research and application of eye movement interaction based on eye movement recognition / *MATEC Web Conf.* 2018. V. 246. P. 5.
  24. *Carpenter R.H.S.* *Movements of the eyes: Part 1. Movements of the eyes.* 2nd ed. Pion, 1988. P. 593.
  25. *Shojaeizadeh M., Djamshidi S., Trapp A.C.* Density of gaze points within a fixation and information processing behavior / *Universal Access in Human-Computer Interaction. Methods, Techniques, and Best Practices. UAHCI 2016. Lect. Notes Comput.* // Eds. Antona M., Stephanidis C. Sci. Springer, Cham, 2016. V. 9737. P. 465.
  26. *Skaramagkas V., Giannakakis G., Ktistakis E. et al.* Review of eye tracking metrics involved in emotional and cognitive processes // *IEEE Rev. Biomed. Eng.* 2023. V. 16. P. 260.
  27. *Foy H.J., Chapman P.* Mental workload is reflected in driver behavior, physiology, eye movements and prefrontal cortex activation // *Appl. Ergon.* 2018. V. 73. P. 90.
  28. *Srimal R., Diedrichsen J., Ryklin E.B., Curtis C.E.* Obligatory adaptation of saccade gains // *J. Neurophysiol.* 2008. V. 99. № 3. P. 1554.
  29. *Russo M., Thomas M., Thorne D. et al.* Oculomotor impairment during chronic partial sleep deprivation // *Clin. Neurophysiol.* 2003. V. 114. № 4. P. 723.
  30. *Warren D.E., Thurtell M.J., Carroll J.N., Wall M.* Perimetric evaluation of saccadic latency, saccadic accuracy, and visual threshold for peripheral visual stimuli in young compared with older adults // *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2013. V. 54. № 8. P. 5778.
  31. *Yang Y., McDonald M., Zheng P.* Can drivers' eye movements be used to monitor their performance? A case study // *IET Intell. Transp. Syst.* 2012. V. 6. № 4. P. 444.
  32. *Nakayama M., Takahashi K., Shimizu Y.* The act of task difficulty and eye-movement frequency for the "oculo-motor indices" / *Proceedings of the 2002 symposium on Eye tracking research & applications (ETRA '02)*. New Orleans Louisiana, March 25–27, 2002. Association for Computing Machinery (ACM). New York, NY, USA. 2002. P. 37.
  33. *Van Orden K.F., Limbert W., Makeig S., Jung T.P.* Eye activity correlates of workload during a visuospatial memory task // *Hum. Factors.* 2001. V. 43. № 1. P. 111.
  34. *Amor T.A., Reis S.D., Campos D. et al.* Persistence in eye movement during visual search // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 20815.
  35. *Joseph A.W., Murugesh R.* Potential eye tracking metrics and indicators to measure cognitive load in human-computer interaction research // *J. Sci. Res.* 2020. V. 64. № 01. P. 168.
  36. *Chen S., Epps J., Ruiz N., Chen F.* Eye activity as a measure of human mental effort in HCI / *Proceedings of the 16th international conference on Intelligent user interfaces (IUI'11)*. Association for Computing Machinery (ACM), February 13–16, 2011. New York, NY, USA, 2011. P. 315.
  37. *Zagermann J., Pfeil U., Reiterer H.* Measuring cognitive load using eye tracking technology in visual computing / *Proceedings of the sixth workshop on Beyond Time and Errors on novel evaluation methods for visualization, BELIV '16*. Baltimore MD USA, 24 October 2016. New York, NY: ACM Press, 2016. V. 24. P. 78.
  38. *Fahimi R., Bruce N.D.B.* On metrics for measuring scan path similarity // *Behav. Res. Methods.* 2021. V. 53. № 2. P. 609.
  39. *Holland C., Komogortsev O.V.* Biometric identification via eye movement scanpaths in reading / *International Joint Conference on Biometrics*. 11 October 2011. P. 1. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:2528223>.
  40. *Goldberg J.H., Kotval X.P.* Computer interface evaluation using eye movements: Methods and constructs // *Int. J. Ind. Ergon.* 1999. V. 24. № 6. P. 631.
  41. *Yamada Y., Kobayashi M.* Detecting mental fatigue from eye-tracking data gathered while watching video: Evaluation in younger and older adults // *Artif. Intell. Med.* 2018. V. 91. P. 39.
  42. *Kliegl R., Rolfs M., Laubrock J., Engbert R.* Microsaccadic modulation of response times in spatial attention tasks // *Psychol. Res.* 2009. V. 73. № 2. P. 136.
  43. *Krejtz K., Duchowski A.T., Niedzielska A. et al.* Eye tracking cognitive load using pupil diameter and microsaccades with fixed gaze // *PLoS One.* 2018. V. 13. № 9. P. e0203629.
  44. *Zandi A.S., Qudus A., Prest L., Comeau F.J.* Non-Intrusive detection of drowsy driving based on eye tracking data // *Transp. Res. Rec.* 2019. V. 2673. № 6. P. 247.
  45. *Zemblyis R., Niehorster D.C., Komogortsev O., Holmqvist K.* Using machine learning to detect events in eye-tracking data // *Behav. Res. Methods.* 2018. V. 50. № 1. P. 160.
  46. *Chen J.T., Kuo Y.C., Hsu T.Y., Wang C.A.* Fatigue and arousal modulations revealed by saccade and pupil dynamics // *Int. J. Environ Res. Public Health.* MDPI. 2022. V. 19. № 15. P. 9234.
  47. *Brezinova V., Kendell R.E.* Smooth pursuit eye movements of schizophrenics and normal people under stress // *Br. J. Psychiatry.* 1977. V. 130. P. 59.
  48. *Rottach K.G., Zivotofsky A.Z., Das V.E. et al.* Comparison of horizontal, vertical and diagonal smooth pursuit eye movements in normal human subjects // *Vision Res.* 1996. V. 36. № 14. P. 2189.
  49. *Ranti C., Jones W., Klin A., Shultz S.* Blink rate patterns provide a reliable measure of individual

- engagement with scene content // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 8267.
50. *Marquart G., Cabrall C., de Winter J.* Review of eye-related measures of drivers' mental workload // *Procedia Manuf.* 2015. V. 3. P. 2854.
  51. *Haq Z.A., Hasan Z.* Eye-blink rate detection for fatigue determination / India International Conference on Information Processing (IICIP 2016), Delhi, India, 12–14 August, 2016. Proceedings IEEE Inc., 2017. P. 1.
  52. *Horiuchi R., Ogasawara T., Miki N.* Fatigue assessment by blink detected with attachable optical sensors of dye-sensitized photovoltaic cells // *Micromachines (Basel).* 2018. V. 9. № 6. P. 310.
  53. *Tolvanen O., Elomaa A. P., Itkonen M. et al.* Eye-tracking indicators of workload in surgery: A systematic review // *J. Invest. Surg.* 2022. V. 35. № 6. P. 1340.
  54. *Marshall S.P.* The index of cognitive activity: Measuring cognitive workload / Proceedings of the IEEE 7th Conference on Human Factors and Power Plants. 19 September, Scottsdale, AZ, USA, 2002. P. 7. doi: 10.1109/HFPP.2002.1042860
  55. *Duchowski A.T., Krejtz K., Krejtz I. et al.* The index of pupillary activity: Measuring cognitive load vis-à-vis task difficulty with pupil oscillation / Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2018. V. 282. P. 1. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173856>
  56. *Duchowski A.T., Krejtz K., Gehrler N.A. et al.* The low/high index of pupillary activity / Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '20). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2020. P. 1. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376394>
  57. *Alnajar F., Gevers T., Valenti R., Ghebreab S.* Calibration-free gaze estimation using human gaze patterns / Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 1-8 Dec. 2013, Sydney, NSW, Australia, 2013. P. 137. doi: 10.1109/ICCV.2013.24
  58. *Rigas I., Economou G., Fotopoulos S.* Biometric identification based on the eye movements and graph matching techniques // *Patt. Recogn. Lett.* 2012. V. 33. № 6. P. 786.
  59. *Li J., Li H., Umer W. et al.* Identification and classification of construction equipment operators' mental fatigue using wearable eye-tracking technology // *Autom. Constr.* 2020. V. 109. P. 103000.
  60. *Bitkina O.V., Park J., Kim H.K.* The ability of eye-tracking metrics to classify and predict the perceived driving workload // *Int. J. Ind. Ergonom.* 2021. V. 86. P. 103193.
  61. *Shiferaw B., Downey L., Crewther D.* A review of gaze entropy as a measure of visual scanning efficiency // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2019. V. 96. P. 353.
  62. *Deravi F., Biosignals S.G.* Gaze trajectory as a biometric modality / Proceedings of the International Conference on Bio-inspired Systems and Signal Processing (BIOSIGNALS-2011). 2011. P. 335. doi: 10.5220/0003275803350341
  63. *Pejfl S., Wickens C.D., Baruah R.* Eye-Tracking measures in aviation: A selective literature review // *Int. J. Aerosp. Psychol.* 2018. V. 28. № 3–4. P. 98.
  64. *Meghanathan R.N., Nikolaev A.R., van Leeuwen C.* Refixation patterns reveal memory-encoding strategies in free viewing // *Atten. Percept. Psychophys.* 2019. V. 81. № 7. P. 2499.
  65. *Fukushima K., Fukushima J., Warabi T., Barnes G.R.* Cognitive processes involved in smooth pursuit eye movements: behavioral evidence, neural substrate and clinical correlation // *Front. Syst. Neurosci.* 2013. V. 7. P. 4.
  66. *Knox P.C., Davidson J.H., Anderson D.* Age-related changes in smooth pursuit initiation // *Exp. Brain Res.* 2005. V. 165. № 1. P. 1.
  67. *Einhäuser W.* The pupil as marker of cognitive processes / Computational and Cognitive Neuroscience of Vision. Cognitive Science and Technology // Ed. Zhao Q. Springer, Singapore, 2017. P. 141.
  68. *Richstone L., Schwartz M.J., Seideman C. et al.* Eye metrics as an objective assessment of surgical skill // *Ann. Surg.* 2010. V. 252. № 1. P. 1772.
  69. *Zargari Marandi R., Madeleine P., Omland Ø. et al.* Eye movement characteristics reflected fatigue development in both young and elderly individuals // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. № 1. P. 13148.
  70. *Catalbas M.C., Cegovnik T., Sodnik J., Gulten A.* Driver fatigue detection based on saccadic eye movements / 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE. 30 November – 2 December 2017. Bursa, Turkey, 2017. P. 913.
  71. *Hu X., Lodewijks G.* Exploration of the effects of task-related fatigue on eye-motion features and its value in improving driver fatigue-related technology // *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 2021. V. 80. P. 150.
  72. *Ahlstrom C., Nyström M., Holmqvist K. et al.* Fit-for-duty test for estimation of drivers' sleepiness level: Eye movements improve the sleep/wake predictor // *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 2013. V. 26. P. 20.
  73. *Abe T., Mishima K., Kitamura S. et al.* Tracking intermediate performance of vigilant attention using multiple eye metrics // *Sleep.* 2020. V. 43. № 3. P. zsz219.
  74. *Di Stasi L.L., McCamy M.B., Macknik S.L. et al.* Saccadic eye movement metrics reflect surgical residents' fatigue // *Ann. Surg.* 2014. V. 259. № 4. P. 824.
  75. *Di Stasi L.L., Renner R., Catena A. et al.* Towards a driver fatigue test based on the saccadic main sequence: A partial validation by subjective report data // *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 2012. V. 21. № 1. P. 122.
  76. *Finke C., Pech L.M., Sömmer C. et al.* Dynamics of saccade parameters in multiple sclerosis patients with fatigue // *J. Neurol.* 2012. V. 259. № 12. P. 2656.

77. *Renata V., Li F., Lee C.H., Chen C.H.* Investigation on the correlation between eye movement and reaction time under mental fatigue influence / Proceedings of the 17th International Conference on Cyberworlds (CW 2018), Singapore 3-5 Oct 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 207.
78. *Herlambang M.B., Taatgen N.A., Cnossen F.* The role of motivation as a factor in mental fatigue // *Hum. Factors*. 2019. V. 61. № 7. P. 1171.
79. *Stone L.S., Tyson T.L., Cravalho P.F. et al.* Distinct pattern of oculomotor impairment associated with acute sleep loss and circadian misalignment // *J. Physiol*. 2019. V. 597. № 17. P. 4643.
80. *Gergelyfi M., Jacob B., Olivier E., Zénon A.* Dissociation between mental fatigue and motivational state during prolonged mental activity // *Front. Behav. Neurosci*. 2015. V. 9. P. 176.
81. *Schweitzer T., Wyss T., Gilgen-Ammann R.* Detecting soldiers' fatigue using eye-tracking glasses: Practical field applications and research opportunities // *Mil. Med*. 2022. V. 187. № 11–12. P. e1330.
82. *Borghini G., Astolfi L., Vecchiato G. et al.* Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness // *Neurosci. Biobehav. Rev*. 2014. V. 44. P. 58.
83. *Dziuda Ł., Baran P., Zieliński P. et al.* Evaluation of a fatigue detector using eye closure-associated indicators acquired from truck drivers in a simulator study // *Sensors*. 2021. V. 21. № 19. P. 6449.
84. *Schleicher R., Galley N., Briest S., Galley L.* Blinks and saccades as indicators of fatigue in sleepiness warnings: looking tired? // *Ergonomics*. 2008. V. 51. № 7. P. 982.
85. *Hopstaken J.F., van der Linden D., Bakker A.B. et al.* Shifts in attention during mental fatigue: Evidence from subjective, behavioral, physiological, and eye-tracking data // *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform*. 2016. V. 42. № 6. P. 878.
86. *Pomplun M., Sunkara S.* Pupil dilation as an indicator of cognitive workload in human-computer interaction / *Human-Centered Computing. Cognitive, Social, and Ergonomic Aspects* // Eds. Harris D., Duffy V., Smith M., Stephanidis C. Boca Raton: CRC Press, 2019. V. 3. P. 542.
87. *Morad Y., Barkana Y., Zadok D. et al.* Ocular parameters as an objective tool for the assessment of truck drivers' fatigue // *Accid. Anal. Prev*. 2009. V. 41. № 4. P. 856.
88. *Di Stasi L.L., Marchitto M., Antolí A., Cañas J.J.* Saccadic peak velocity as an alternative index of operator attention: A short review // *Eur. Rev. Appl. Psychol*. 2013. V. 63. № 6. P. 335.
89. *Diaz-Piedra C., Rieiro H., Suárez J. et al.* Fatigue in the military: towards a fatigue detection test based on the saccadic velocity // *Physiol. Meas*. 2016. V. 37. № 9. P. N62.
90. *Ito J., Yamane Y., Suzuki M. et al.* Switch from ambient to focal processing mode explains the dynamics of free viewing eye movements // *Sci. Rep*. 2017. V. 7. № 1. P. 1082.
91. *Pannasch S., Velichkovsky B.M.* Distractor effect and saccade amplitudes: Further evidence on different modes of processing in free exploration of visual images // *Vis. Cogn*. 2009. V. 17. № 6-7. P. 1109.
92. *Величковский Б.М., Коростелева А.Н., Паннаш С. и др.* Две системы зрения и их Движения глаз: эксперимент с фиксациями как событиями и сверхбыстрой фМРТ примиряет соперничающие взгляды // *Современные технологии в медицине*. 2019. Т. 11. № 4. С. 7.
93. *Шошина И.И., Шелепин Ю.Е.* Механизмы глобального и локального анализа зрительной информации при шизофрении. СПб.: Изд-во ВВМ, 2016. 300 с.
94. *Шошина И.И., Мухитова Ю.В., Трегубенко И.А. и др.* Контрастная чувствительность зрительной системы и когнитивные функции при шизофрении и депрессии // *Физиология человека*. 2021. Т. 47. № 5. С. 48.
95. *Milner A.D.* How do the two visual streams interact with each other? // *Exp. Brain Res*. 2017. V. 235. № 5. P. 1297.
96. *Kunasegaran K., Ismail A.M.H., Ramasamy S. et al.* Understanding mental fatigue and its detection: a comparative analysis of assessments and tools // *Peer J*. 2023. V. 11. P. e15744
97. *Tran Y., Craig A., Craig R. et al.* The influence of mental fatigue on brain activity: Evidence from a systematic review with meta-analyses // *Psychophysiology*. 2020. V. 57. № 5. P. e13554.
98. *Hsu T.-Y., Hsu Y.-F., Wang H.-Y., Wang C.-A.* Role of the frontal eye field in human pupil and saccade orienting responses // *Eur. J. Neurosci*. 2021. V. 54. P. 4283.
99. *Bafna T., Hansen J.P.* Mental fatigue measurement using eye metrics: A systematic literature review // *Psychophysiology*. 2021. V. 58. № 6. P. e13828.
100. *Ansari M.F., Kasproski P., Obetkal M.* Gaze tracking using an unmodified web camera and convolutional neural network // *Appl. Sci*. 2021. V. 11. № 19. P. 9068.
101. *Naeeri S., Kang Z., Mandal S., Kim K.* Multimodal analysis of eye movements and fatigue in a simulated glass cockpit environment // *Aerospace*. 2021. V. 8. № 10. P. 283.
102. *Mengtao L., Fan L., Gangyan X., Su H.* Leveraging eye-tracking technologies to promote aviation safety – A review of key aspects, challenges, and future perspectives // *Saf. Sci*. 2023. V. 168. P. 106295.
103. *Hu X., Lodewijks G.* Detecting fatigue in car drivers and aircraft pilots by using non-invasive measures: The value of differentiation of sleepiness and mental fatigue // *J. Safety Res*. 2020. V. 72. P. 173.
104. *Zhimin L., Ruilin L., Liqiang Y. et al.* A benchmarking framework for eye-tracking-based vigilance prediction of vessel traffic controllers // *Eng. Appl. Artif. Intell*. 2024. V. 129. P. e107660.

## REFERENCES

1. *Isakova M.* Topic on VPP № 22 for military personnel serving under contract and conscription // Army Collection. 2021. V. 8. P. 126.
2. *Velichkovsky B.B.* Cognitive effects of mental fatigue // Bulletin of Moscow University. Series 14. Psychology. 2019. № 1. P. 108.
3. *Borgianni Y., Rauch E., Maccioni L., Mark B.G.* User experience analysis in industry 4.0 – The use of biometric devices in engineering design and manufacturing / IEEE International conference on Industrial Engineering and Engineering Management. (IEEM), Bangkok, Thailand, 16-19 December, 2018. IEEE Computer Society, 2019. P. 192.
4. *Velichkovsky B.M., Ushakov V.L.* Cognitive sciences and new medical technologies // Modern Technologies in Medicine. 2019. V. 11. № 1. P. 8.
5. *Robertson C.V., Marino F.E.* Cerebral responses to exercise and the influence of heat stress in human fatigue // J. Therm. Biol. 2017. V. 63. P. 10.
6. *Bergasa L.M., Nuevo J., Sotelo M.-A. et al.* Real-time system for monitoring driver vigilance // IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2006. V. 7. № 1. P. 63.
7. *D’Orazio T., Leo M., Guaragnella C., Distanti A.* A visual approach for driver inattention detection // Patt. Recog. 2007. V. 40. № 8. P. 2341.
8. *Al-Anizy G.J., Nordin M.J., Razoog M.M.* Automatic driver drowsiness detection using haar algorithm and support vector machine techniques // Asian J. Appl. Sci. 2015. V. 8. № 2. P. 149.
9. *Golz M., Sommer D., Chen M. et al.* Feature fusion for the detection of microsleep events // J. VLSI Sign. Process Syst. Sign. Im. 2007. V. 49. № 2. P. 329.
10. *Liu Z., Peng Y., Hu W.* Driver fatigue detection based on deeply-learned facial expression representation // J. Vis. Commun. Image Represent. 2020. V. 71. № 2. 102723.
11. *Mandal B., Li L., Wang G.S., Lin J.* Towards detection of bus driver fatigue based on robust visual analysis of eye state // IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2016. V. 18. № 3. P. 545.
12. *Sigari M.H., Fathy M., Soryani M.* A driver face monitoring system for fatigue and distraction detection // Int. J. Vehicul. Technol. 2013. V. 2013. P. 1.
13. *Lyapunov S.I., Shoshina I.I., Lyapunov I.S.* Tremor eye movements as an objective marker of driver’s fatigue // Human Physiology. 2022. V. 48. № 1. P. 71.
14. *Golz M., Sommer D., Trutschel U. et al.* Evaluation of fatigue monitoring technologies // Somnologie. 2010. V. 14. № 3. P. 187.
15. *Kubarko A.I., Likhachev S.A., Kubarko N.P.* [Vision (neurophysiological and neuro-ophthalmological aspects): monograph in 2 volumes. V. 2: Neural mechanisms for controlling the installation and movement of the eyes and their disorders in diseases of the nervous system]. Minsk: BSMU, 2009. 352 p.
16. *Barabanshchikov V.A., Zhegallo A.V.* [Eye-tracking: methods of recording eye movements in psychological research and practice]. M.: Kogito-center, 2014. P. 117.
17. *Yarbus A.* [The role of eye movements in the process of vision]. M.: Nauka, 1965. 161 p.
18. *Holmqvist K.* Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures. O.: OUP Oxford, 2011. 560 p.
19. *Djanian S.* Eye movement classification using deep learning. Aalborg University: Department of Electronic Systems, 2019. 76 p.
20. *Mahanama B., Jayawardana Y., Rengarajan S. et al.* Eye movement and pupil measures: A review // Front. Comput. Sci. 2022. V. 3. P. 733531.
21. *Li X., Fan Z., Ren Y. et al.* Classification of eye movement and its application in driving based on a refined pre-processing and machine learning algorithm // IEEE Access. 2021. V. 9. P. 136164.
22. *Salvucci D.D., Goldberg J.H.* Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols / Proceedings of the 2000 symposium on Eye Tracking Research and Applications (ETRA ‘00). Palm Beach Gardens, FL, USA. November 6–8, 2000. Association for Computing Machinery (ACM). New York, NY, USA, 2000. P. 71.
23. *Wang S., Wang Q., Chen H.* Research and application of eye movement interaction based on eye movement recognition / MATEC Web Conf. 2018. V. 246. P. 5.
24. *Carpenter R.H.S.* Movements of the eyes: Part 1. Movements of the eyes. 2nd ed. Pion, 1988. P. 593.
25. *Shojaeizadeh M., Djamshabi S., Trapp A.C.* Density of gaze points within a fixation and information processing behavior / Universal Access in Human-Computer Interaction. Methods, Techniques, and Best Practices. UAHCI 2016. Lect. Notes Comput. // Eds. Antona M., Stephanidis C. Sci. Springer, Cham, 2016. V. 9737. P. 465.
26. *Skaramagkas V., Giannakakis G., Ktistakis E. et al.* Review of eye tracking metrics involved in emotional and cognitive processes // IEEE Rev. Biomed. Eng. 2023. V. 16. P. 260.
27. *Foy H.J., Chapman P.* Mental workload is reflected in driver behavior, physiology, eye movements and prefrontal cortex activation // Appl. Ergon. 2018. V. 73. P. 90.
28. *Srimal R., Diedrichsen J., Ryklin E.B., Curtis C.E.* Obligatory adaptation of saccade gains // J. Neurophysiol. 2008. V. 99. № 3. P. 1554.
29. *Russo M., Thomas M., Thorne D. et al.* Oculomotor impairment during chronic partial sleep deprivation // Clin. Neurophysiol. 2003. V. 114. № 4. P. 723.
30. *Warren D.E., Thurtell M.J., Carroll J.N., Wall M.* Perimetric evaluation of saccadic latency, saccadic accuracy, and visual threshold for peripheral visual stimuli in young compared with older adults // Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. 2013. V. 54. № 8. P. 5778.
31. *Yang Y., McDonald M., Zheng P.* Can drivers’ eye movements be used to monitor their performance? A case study // IET Intell. Transp. Syst. 2012. V. 6. № 4. P. 444.
32. *Nakayama M., Takahashi K., Shimizu Y.* The act of task difficulty and eye-movement frequency for the “oculo-motor indices” / Proceedings of the 2002

- symposium on Eye tracking research & applications (ETRA '02). New Orleans Louisiana, March 25–27, 2002. Association for Computing Machinery (ACM), New York, NY, USA, 2002. P. 37.
33. *Van Orden K.F., Limbert W., Makeig S., Jung T.P.* Eye activity correlates of workload during a visuospatial memory task // *Hum. Factors*. 2001. V. 43. № 1. P. 111.
  34. *Amor T.A., Reis S.D., Campos D. et al.* Persistence in eye movement during visual search // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 20815.
  35. *Joseph A.W., Muruges R.* Potential eye tracking metrics and indicators to measure cognitive load in human-computer interaction research // *J. Sci. Res.* 2020. V. 64. № 01. P. 168.
  36. *Chen S., Epps J., Ruiz N., Chen F.* Eye activity as a measure of human mental effort in HCI / Proceedings of the 16th international conference on Intelligent user interfaces (IUI'11). Association for Computing Machinery (ACM), February 13–16, 2011. New York, NY, USA, 2011. P. 315.
  37. *Zagermann J., Pfeil U., Reiterer H.* Measuring cognitive load using eye tracking technology in visual computing / Proceedings of the sixth workshop on Beyond Time and Errors on novel evaluation methods for visualization, BELIV '16. Baltimore MD USA, 24 October 2016. New York, NY: ACM Press, 2016. V. 24. P. 78.
  38. *Fahimi R., Bruce N.D.B.* On metrics for measuring scan path similarity // *Behav. Res. Methods*. 2021. V. 53. № 2. P. 609.
  39. *Holland C., Komogortsev O.V.* Biometric identification via eye movement scanpaths in reading / International Joint Conference on Biometrics. 11 October 2011. P. 1. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:2528223>.
  40. *Goldberg J.H., Kotval X.P.* Computer interface evaluation using eye movements: Methods and constructs // *Int. J. Ind. Ergon.* 1999. V. 24. № 6. P. 631.
  41. *Yamada, Y., Kobayashi, M.* Detecting mental fatigue from eye-tracking data gathered while watching video: Evaluation in younger and older adults // *Artif. Intell. Med.* 2018. V. 91. P. 39.
  42. *Kliegl R., Rolfs M., Laubrock J., Engbert R.* Microsaccadic modulation of response times in spatial attention tasks // *Psychol. Res.* 2009. V. 73. № 2. P. 136.
  43. *Krejtz K., Duchowski A.T., Niedzielska A. et al.* Eye tracking cognitive load using pupil diameter and microsaccades with fixed gaze // *PLoS One*. 2018. V. 13. № 9. P. e0203629.
  44. *Zandi A.S., Qudus A., Prest L., Comeau F.J.* Non-Intrusive detection of drowsy driving based on eye tracking data // *Transp. Res. Rec.* 2019. V. 2673. № 6. P. 247.
  45. *Zemblys R., Niehorster D.C., Komogortsev O., Holmqvist K.* Using machine learning to detect events in eye-tracking data // *Behav. Res. Methods*. 2018. V. 50. № 1. P. 160.
  46. *Chen J.T., Kuo Y.C., Hsu T.Y., Wang C.A.* Fatigue and arousal modulations revealed by saccade and pupil dynamics // *Int. J. Environ Res. Public Health*. MDPI. 2022. V. 19. № 15. P. 9234.
  47. *Brezinova V., Kendell R.E.* Smooth pursuit eye movements of schizophrenics and normal people under stress // *Br. J. Psychiatry*. 1977. V. 130. P. 59.
  48. *Rottach K.G., Zivotofsky A.Z., Das V.E. et al.* Comparison of horizontal, vertical and diagonal smooth pursuit eye movements in normal human subjects // *Vision Res.* 1996. V. 36. № 14. P. 2189.
  49. *Ranti C., Jones W., Klin A., Shultz S.* Blink rate patterns provide a reliable measure of individual engagement with scene content // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 8267.
  50. *Marquart G., Cabrall C., de Winter J.* Review of eye-related measures of drivers' mental workload // *Procedia Manuf.* 2015. V. 3. P. 2854.
  51. *Haq Z.A., Hasan Z.* Eye-blink rate detection for fatigue determination / India International Conference on Information Processing (IICIP 2016), Delhi, India, 12–14 August, 2016. Proceedings IEEE Inc., 2017. P. 1.
  52. *Horiuchi R., Ogasawara T., Miki N.* Fatigue assessment by blink detected with attachable optical sensors of dye-sensitized photovoltaic cells // *Micromachines (Basel)*. 2018. V. 9. № 6. P. 310.
  53. *Tolvanen O., Elomaa A. P., Itkonen M. et al.* Eye-tracking indicators of workload in surgery: A systematic review // *J. Invest. Surg.* 2022. V. 35. № 6. P. 1340.
  54. *Marshall S.P.* The index of cognitive activity: Measuring cognitive workload / Proceedings of the IEEE 7th Conference on Human Factors and Power Plants. 19 September, Scottsdale, AZ, USA, 2002. P. 7. doi: 10.1109/HFPP.2002.1042860.
  55. *Duchowski A.T., Krejtz K., Krejtz I. et al.* The index of pupillary activity: Measuring cognitive load vis-à-vis task difficulty with pupil oscillation / Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2018. V. 282. P. 1. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173856>
  56. *Duchowski A.T., Krejtz K., Gehrler N.A. et al.* The low/high index of pupillary activity / Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '20). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2020. P. 1. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376394>
  57. *Alnajar F., Gevers T., Valenti R., Ghebreab S.* Calibration-free gaze estimation using human gaze patterns / Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 1–8 Dec. 2013, Sydney, NSW, Australia, 2013. P. 137. doi: 10.1109/ICCV.2013.24.
  58. *Rigas I., Economou G., Fotopoulos S.* Biometric identification based on the eye movements and graph matching techniques // *Patt. Recogn. Lett.* 2012. V. 33. № 6. P. 786.
  59. *Li J., Li H., Umer W. et al.* Identification and classification of construction equipment operators' mental fatigue using wearable eye-tracking technology // *Autom. Constr.* 2020. V. 109. P. 103000.
  60. *Bitkina O.V., Park J., Kim H.K.* The ability of eye-tracking metrics to classify and predict the perceived

- driving workload // *Int. J. Ind. Ergonom.* 2021. V. 86. P. 103193.
61. *Shiferaw B., Downey L., Crewther D.* A review of gaze entropy as a measure of visual scanning efficiency // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2019. V. 96. P. 353.
  62. *Deravi F., Biosignals S.G.* Gaze trajectory as a biometric modality / Proceedings of the International Conference on Bio-inspired Systems and Signal Processing (BIOSIGNALS-2011). 2011. P. 335. doi: 10.5220/0003275803350341
  63. *Peißl S., Wickens C.D., Baruah R.* Eye-Tracking measures in aviation: A selective literature review // *Int. J. Aerosp. Psychol.* 2018. V. 28. № 3–4. P. 98.
  64. *Meghanathan R.N., Nikolaev A.R., van Leeuwen C.* Refixation patterns reveal memory-encoding strategies in free viewing // *Atten. Percept. Psychophys.* 2019. V. 81. № 7. P. 2499.
  65. *Fukushima K., Fukushima J., Warabi T., Barnes G.R.* Cognitive processes involved in smooth pursuit eye movements: behavioral evidence, neural substrate and clinical correlation // *Front. Syst. Neurosci.* 2013. V. 7. P. 4.
  66. *Knox P.C., Davidson J.H., Anderson D.* Age-related changes in smooth pursuit initiation // *Exp. Brain Res.* 2005. V. 165. № 1. P. 1.
  67. *Einhäuser W.* The pupil as marker of cognitive processes / Computational and Cognitive Neuroscience of Vision. Cognitive Science and Technology // Ed. Zhao Q. Springer, Singapore, 2017. P. 141.
  68. *Richstone L., Schwartz M.J., Seideman C. et al.* Eye metrics as an objective assessment of surgical skill // *Ann. Surg.* 2010. V. 252. № 1. P. 1772.
  69. *Zargari Marandi R., Madeleine P., Omland Ø. et al.* Eye movement characteristics reflected fatigue development in both young and elderly individuals // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. № 1. P. 13148.
  70. *Catalbas M.C., Cegovnik T., Sodnik J., Gulten A.* Driver fatigue detection based on saccadic eye movements / 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE. 30 November – 2 December 2017. Bursa, Turkey, 2017. P. 913.
  71. *Hu X., Lodewijks G.* Exploration of the effects of task-related fatigue on eye-motion features and its value in improving driver fatigue-related technology // *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 2021. V. 80. P. 150.
  72. *Ahlstrom C., Nyström M., Holmqvist K. et al.* Fit-for-duty test for estimation of drivers' sleepiness level: Eye movements improve the sleep/wake predictor // *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 2013. V. 26. P. 20.
  73. *Abe T., Mishima K., Kitamura S. et al.* Tracking intermediate performance of vigilant attention using multiple eye metrics // *Sleep.* 2020. V. 43. № 3. P. zsz219.
  74. *Di Stasi L.L., McCamy M.B., Macknik S.L. et al.* Saccadic eye movement metrics reflect surgical residents' fatigue // *Ann. Surg.* 2014. V. 259. № 4. P. 824.
  75. *Di Stasi L.L., Renner R., Catena A. et al.* Towards a driver fatigue test based on the saccadic main sequence: A partial validation by subjective report data // *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 2012. V. 21. № 1. P. 122.
  76. *Finke C., Pech L.M., Sömmer C. et al.* Dynamics of saccade parameters in multiple sclerosis patients with fatigue // *J. Neurol.* 2012. V. 259. № 12. P. 2656.
  77. *Renata V., Li F., Lee C.H., Chen C.H.* Investigation on the correlation between eye movement and reaction time under mental fatigue influence / Proceedings of the 17th International Conference on Cyberworlds (CW2018), Singapore 3-5 Oct 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 207.
  78. *Herlambang M.B., Taatgen N.A., Cnossen F.* The role of motivation as a factor in mental fatigue // *Hum. Factors.* 2019. V. 61. № 7. P. 1171.
  79. *Stone L.S., Tyson T.L., Cravalho P.F. et al.* Distinct pattern of oculomotor impairment associated with acute sleep loss and circadian misalignment // *J. Physiol.* 2019. V. 597. № 17. P. 4643.
  80. *Gergelyfi M., Jacob B., Olivier E., Zénon A.* Dissociation between mental fatigue and motivational state during prolonged mental activity // *Front. Behav. Neurosci.* 2015. V. 9. P. 176.
  81. *Schweitzer T., Wyss T., Gilgen-Ammann R.* Detecting soldiers' fatigue using eye-tracking glasses: Practical field applications and research opportunities // *Mil. Med.* 2022. V. 187. № 11-12. P. e1330.
  82. *Borghini G., Astolfi L., Vecchiato G. et al.* Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2014. V. 44. P. 58.
  83. *Dziuda Ł., Baran P., Zieliński P. et al.* Evaluation of a fatigue detector using eye closure-associated indicators acquired from truck drivers in a simulator study // *Sensors.* 2021. V. 21. № 19. P. 6449.
  84. *Schleicher R., Galley N., Briest S., Galley L.* Blinks and saccades as indicators of fatigue in sleepiness warnings: looking tired? // *Ergonomics.* 2008. V. 51. № 7. P. 982.
  85. *Hopstaken J.F., van der Linden D., Bakker A.B. et al.* Shifts in attention during mental fatigue: Evidence from subjective, behavioral, physiological, and eye-tracking data // *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 2016. V. 42. № 6. P. 878.
  86. *Pomplun M., Sunkara S.* Pupil dilation as an indicator of cognitive workload in human-computer interaction / Human-Centered Computing. Cognitive, Social, and Ergonomic Aspects // Eds. Harris D., Duffy V., Smith M., Stephanidis C. Boca Raton: CRC Press, 2019. V. 3. P. 542.
  87. *Morad Y., Barkana Y., Zadok D. et al.* Ocular parameters as an objective tool for the assessment of truck drivers' fatigue // *Accid. Anal. Prev.* 2009. V. 41. № 4. P. 856.
  88. *Di Stasi L.L., Marchitto M., Antolí A., Cañas J.J.* Saccadic peak velocity as an alternative index of operator attention: A short review // *Eur. Rev. Appl. Psychol.* 2013. V. 63. № 6. P. 335.
  89. *Diaz-Piedra C., Rieiro H., Suárez J. et al.* Fatigue in the military: towards a fatigue detection test based on

- the saccadic velocity // *Physiol. Meas.* 2016. V. 37. № 9. P. N62.
90. Ito J., Yamane Y., Suzuki M. *et al.* Switch from ambient to focal processing mode explains the dynamics of free viewing eye movements // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. № 1. P. 1082.
91. Pannasch S., Velichkovsky B.M. Distractor effect and saccade amplitudes: Further evidence on different modes of processing in free exploration of visual images // *Vis. Cogn.* 2009. V. 17. № 6-7. P. 1109.
92. Velichkovsky B.M., Korosteleva A.N., Pannasch S. *et al.* [Two visual systems and their eye movements: A fixation-based event-related experiment with ultrafast fMRI reconciles competing views] // *Sovrem. Tehnol. Med.* 2019. V. 11. № 4. P. 7.
93. Shoshina I.I., Shelepin Yu.E. Mechanisms of global and local analysis of visual information in schizophrenia. St. Petersburg: VVM Publishing House, 2016. 300 p.
94. Shoshina I.I., Mukhitova Y.V., Tregubenko I.A. *et al.* Contrast Sensitivity of the Visual System and Cognitive Functions in Schizophrenia and Depression // *Human Physiology.* 2021. V. 47. № 5. P. 516.
95. Milner A.D. How do the two visual streams interact with each other? // *Exp. Brain Res.* 2017. V. 235. № 5. P. 1297.
96. Kunasegaran K., Ismail A.M.H., Ramasamy S. *et al.* Understanding mental fatigue and its detection: a comparative analysis of assessments and tools // *Peer J.* 2023. V. 11. P. e15744
97. Tran Y., Craig A., Craig R. *et al.* The influence of mental fatigue on brain activity: Evidence from a systematic review with meta-analyses // *Psychophysiology.* 2020. V. 57. № 5. P. e13554.
98. Hsu T.-Y., Hsu Y.-F., Wang H.-Y., Wang C.-A. Role of the frontal eye field in human pupil and saccade orienting responses // *Eur. J. Neurosci.* 2021. V. 54. P. 4283.
99. Bafna T., Hansen J.P. Mental fatigue measurement using eye metrics: A systematic literature review // *Psychophysiology.* 2021. V. 58. № 6. P. e13828.
100. Ansari M.F., Kasproski P., Obetkal M. Gaze tracking using an unmodified web camera and convolutional neural network // *Appl. Sci.* 2021. V. 11. № 19. P. 9068.
101. Naeeri S., Kang Z., Mandal S., Kim K. Multimodal analysis of eye movements and fatigue in a simulated glass cockpit environment // *Aerospace.* 2021. V. 8. № 10. P. 283.
102. Mengtao L., Fan L., Gangyan X., Su H. Leveraging eye-tracking technologies to promote aviation safety – A review of key aspects, challenges, and future perspectives // *Saf. Sci.* 2023. V. 168. P. 106295.
103. Hu X., Lodewijks G. Detecting fatigue in car drivers and aircraft pilots by using non-invasive measures: The value of differentiation of sleepiness and mental fatigue // *J. Safety Res.* 2020. V. 72. P. 173.
104. Zhimin L., Ruilin L., Liqiang Y. *et al.* A benchmarking framework for eye-tracking-based vigilance prediction of vessel traffic controllers // *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2024. V. 129. P. e107660.

## Related Work Analysis for Determination of Fatigue State Based on Eye Movements Monitoring

I. I. Shoshina<sup>a, \*</sup>, S. D. Kovalenko<sup>b</sup>, V. V. Kuznetsov<sup>c</sup>, I. V. Brak<sup>d, e</sup>, A. M. Kashevnik<sup>f</sup>

<sup>a</sup>*Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

<sup>b</sup>*National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia*

<sup>c</sup>*Federal Research Center “Computer Science and Control”, RAS, Moscow, Russia*

<sup>d</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

<sup>e</sup>*Privolzhsky Research Medical University, PRMU, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>f</sup>*Saint-Petersburg Federal Research Center, RAS, St. Petersburg, Russia*

\*E-mail: shoshinaii@mail.ru

We have reviewed theoretical background of detecting functional state of fatigue based on the strategy of eye movements. Also, modern methods for assessing eye movements were considered. Based on our literature review, we can conclude that nowadays there are multitude numerical characteristics of eye movements, the dynamics of which can hypothetically make it possible to assess degree of fatigue. However, there are still no proposals for a method for determining the degree of fatigue based on an analysis of the strategy of eye movements. In this regard, according to the concepts of static and dynamic vision, it is proposed to consider the shift in the numerical characteristics of eye movements towards characteristics that reflect the strategy of dynamic vision as evidence of fatigue.

**Keywords:** fatigue, eye movements, eye movement strategies, oculomotor events, eye tracking, biometrics.