

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.89

DOI: 10.17212/2782-2001-2024-3-7-24

Метод динамической оценки утомления оператора ПК на основе характеристик глазных движений*

А.О. БУЛЫГИН

199178, РФ, г. Санкт-Петербург, 14-я лин. В. О., Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский федеральный исследова-
тельский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН)

alexandr_bulygin@mail.ru

Наступление утомления опасно в сферах деятельности, требующих высокой концентрации внимания человека, например авиадиспетчеров, операторов атомных станций и т. д. Необходимо отметить, что данные виды деятельности характеризуются тем, что большую часть времени работник сидит на рабочем месте и его взгляд направлен в монитор. В статье представлен метод динамической оценки утомления оператора ПК на основе характеристик глазных движений. Метод динамической оценки утомления реализует сценарий обучения модели определения утомления и сценарий определения утомления. В рамках сценария обучения выполняется вычисление характеристик глазных движений и поиск корреляций с результатами тестов о степени утомления. В рамках сценария определения утомления выбираются характеристики глазных движений, которые наиболее сильно коррелируют с утомлением. Также эти характеристики можно разделить по типам физических событий, на которых они основаны. Можно выделить скоростные, временные, количественные, размерные, процентные, частотные и характеристики отношения. Для поиска корреляций между характеристиками глазных движений и утомлением был проанализирован набор данных глазных движений и результаты тестов и опросников, таких как тест СЗМР, тест «Кольца Ландольта», опросник Visual Analogue Scale to Evaluate Fatigue Severity (VAS-F). Набор данных состоит из записей координат взгляда 15 участников, выполняющих функции оператора ПК. Для определения степени утомления участник заполнял опросник VAS-F. Корректирующая проба «Кольца Ландольта» – тест, используемый для измерения концентрации внимания. Размеченный набор данных используется для обучения модели машинного обучения, которая определяет, утомлен или не утомлен оператор ПК. Результаты экспериментов показали, что использование выбранных в рамках исследования характеристик дало наиболее многообещающие результаты. Этот подход позволил добиться самых высоких показателей F -меры и наилучшей средней точности, что говорит об общей надежности модели.

Ключевые слова: окулограф, глазные движения, характеристики глазных движений, утомление, определение утомления, опросник, тест, корреляция с утомлением

* Статья получена 06 марта 2024 г.

ВВЕДЕНИЕ

Снижение работоспособности, связанное с утомлением, сопровождается потерей внимания и замедлением времени реакции, ростом количества ошибок. Подобные ошибки часто приводят к катастрофическим последствиям в работе представителей различных профессий: авиадиспетчеров, операторов атомных станций, водителей судов, самолетов, железнодорожных составов, грузового, общественного и личного автотранспорта. Быстрое выявление симптомов утомления является главным принципом недопущения негативных последствий.

Операторы АЭС работают бригадами в большом пультовом помещении, где размещаются сотни приборов, экранов и индикаторов. Рабочее место авиадиспетчера располагается в башне, расположенной рядом со зданием аэропорта. Рабочие места авиадиспетчеров внутри башни располагаются по кругу и представляют собой столы, на которых стоят мониторы. Профессия оператора ПК главным образом связана с работой на компьютере. Оператор ПК занимается набором текста, обработкой информации, составлением таблиц, форматированием документов и т. д. Таким образом, работник сидит на рабочем месте, и его взгляд направлен в монитор. Следовательно, может быть разработан единый метод определения утомления для такого вида деятельности.

Характеристики глазных движений дают возможность оценить когнитивные процессы, например принятие решений, концентрацию внимания. Характеристики глазных движений, такие как саккады, моргания, фиксации, задействуют различные нейронные цепи, связанные с обработкой зрительно-моторной информации. Предполагается, что пиковая скорость саккад, продолжительность саккад, продолжительность фиксации, продолжительность морганий, частота морганий и диапазон расширения зрачка могут быть чувствительными к изменению умственной нагрузки и утомлению. Например, пиковая скорость саккад, продолжительность саккад, продолжительность фиксации, продолжительность моргания, частота моргания и диаметр зрачка могут отражать изменение степени утомления [1].

В настоящей работе использовался набор данных, состоящий из глазодвигательной активности операторов ПК и соответствующих ей тестов на сложную зрительно-моторную реакцию (СЗМР), а также психологические опросники его состояния. В результате проведения эксперимента была выполнена запись следующих параметров оператора: глазодвигательная активность, СЗМР, а также психологические опросники его состояния. Разработанный метод динамической оценки утомления оператора ПК состоит из сценария обучения и сценария определения утомления. Сценарий обучения предназначен для обучения модели машинного обучения. Результатом работы сценария определения утомления является оценка утомления оператора ПК.

Сначала выполняется расчет таких характеристик движения взгляда, как скоростные, временные и количественные, характеристики длины саккады, характеристики кривизны траектории движения взгляда, доля характеристик от общего числа. Выполняется оценка утомления на основе таких тестов, как сложная зрительно-моторная реакция, тест «Кольца Ландольта», опросник о степени утомления VAS-F. Затем выполняется поиск корреляций между

характеристиками глазных движений и оценками утомления на основе тестов. Далее на основе корреляций эксперты выбирают характеристики для обучения модели машинного обучения. Обученная модель использует архитектуру модели машинного обучения, которая содержит такие классификаторы, как случайный лес, дерево решений, многослойный перцептрон. И, наконец, используя обученную модель, вычислитель определяет утомления. Также этот метод отличается определением характеристик глазных движений, наиболее точно коррелирующих с эталонными значениями утомления оператора.

1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УТОМЛЕНИЯ

Глазные движения могут свидетельствовать о наступлении сонливости и утомления. Характеристики глазных движений вычисляются из таких базовых понятий, как фиксация и саккада. Саккады – это быстрые движения глаз, обычно возникающие при переориентации взгляда на новую цель. Скорость движения глаз часто превышает 500 град/с, средняя продолжительность составляет от 20 до 40 мс [2]. Фиксации соответствуют временным интервалам, когда субъект смотрит на определенную точку, обычно на объект интереса. Их продолжительность обычно составляет от 200 до 500 мс, в среднем около 300 мс [2].

Один из способов детекции утомления с использованием окуломоторных движений основан на анализе пиковых значений ускорения зрачков. В [3] исследовались показатели утомленных и бодрых водителей такси. Количество пиковых значений у утомленных водителей было на 62 % больше, чем у бодрых. Для того чтобы сделать свой алгоритм подходящим для обработки сигнала в реальном времени, авторы применили z -оценку, которая позволяет адаптивно обнаруживать пиковые значения. При помощи такой оценки подсчет пиковых значений получается более точным, разница между их количеством у утомленного водителя больше в два раза, чем у бодрого. Энергичный человек совершает больше движений глаз по сравнению с утомленным человеком в той же тестовой среде.

Пиковая скорость саккад – это показатель, который снижается в связи с увеличением уровня утомления. В работе [4] по детекции утомления поместили участников в виртуальную среду, имитирующую вождение автомобиля в течение двух часов. До и после сессии вождения автомобиля, а также после небольшого перерыва участники проходили тест контролируемой фиксации. В результате анализа саккад авторы выявили следующее: рост продолжительности и падение пиковой скорости; 15-минутный перерыв после нагрузочного задания недостаточен для восстановления организма и возврата к исходному уровню утомления; на степень усталости и снижение скорости саккад, кроме сложности задания, влияет его продолжительность [5]. Для проверки этого предположения авторы провели эксперимент, тестируя хирургов до и после 45-минутной операции. Участникам было необходимо сфокусироваться на целевых символах в разных частях экрана [6]. Снижение максимальной скорости саккады по отношению к ее длине описано в работе [7] о детекции утомления во время совершения полета. Значение этого показателя стало ниже на 3 %.

Снижение средней и пиковой скорости саккад хорошо изучено в условиях депривации сна [8].

В работе [9] измерялись максимальная скорость и длина саккад во время прохождения теста на СЗМР. В результате оказалось, что значения максимальной скорости падают, а амплитуды растут, что не соответствует результатам, описанным в работе [10]. Это может быть связано с разными подходами к измерению амплитуды саккады. В работе [11] авторы отмечают снижение скорости ответа по сравнению с возрастанием значения пиковой скорости саккад и, кроме того, уменьшение времени реакции по мере увеличения умственной усталости.

В работе [12] были проведены два эксперимента с использованием следующих типов заданий: контролируемая взглядом саккадная задача и антисаккадная задача с использованием эмоциональных аудиальных стимулов. Для определения утомления применялись скоростные характеристики саккад. После анализа данных были получены следующие результаты: во время выполнения *time on task* (TOT) максимальная скорость саккад уменьшалась, так как этот параметр чувствителен к уровню возбуждения.

Такие параметры, как частота и длительность морганий, часто фигурируют в изучении связи окуломоторных событий с утомлением. В работе [13] говорится, что во множестве исследований отражено возрастание значений этих параметров при утомлении.

В работе [14] описано изменение нейрофизиологических показателей для оценки умственной нагрузки и утомления. Происходит уменьшение продолжительности и частоты морганий с увеличением сложности задачи. Это связано с тем, что сложное задание требует большего внимания и приводит к сокращению времени с закрытыми глазами.

В [15] представлено исследование утомления у молодых и пожилых людей. Получены следующие результаты: частота и длительность морганий увеличились при выполнении TOT. Изменение частоты морганий связано с изменением уровня внимания. При изучении трех типов продолжительности фиксации (<150 мс, 150...900 мс, > 900 мс) продолжительность фиксации средней длительности растет в связи с утомлением. Диапазон изменения диаметра зрачка также увеличился в ходе выполнения задания, так как происходит увеличение затрачиваемых сил [15]. Максимальная скорость саккад и их продолжительность снижаются по мере прохождения эксперимента [15].

В работе [16] рассматривается изменение внимания вследствие утомления. Использовался тест *N-back* с дистракторами в виде лиц. Количество времени, зафиксированного за пределами экрана, стало значительно выше в конце эксперимента. При изменении вознаграждения участников за участие в эксперименте этот эффект стал меньше. Это говорит о том, что повышение степени утомления не всегда сопровождается снижением внимания к заданию и повышению внимания к дистракторам в виде лиц. Диаметр зрачка значительно уменьшался к концу выполнения теста и увеличивался после смены мотивации.

В работе [17] об определении утомления по характеристикам глазных движений у солдат в полевых условиях авторы выделяют ряд параметров и их изменения в связи с утомлением. Частота и продолжительность морганий увеличиваются, а интервал между морганиями уменьшается. Однако частота моргания в какой-то момент достигает максимального значения, а значение

утомления может продолжать расти. Длительность морганий является широко применяемым параметром для определения утомления.

В [18] проводилось исследование поведения операторов экскаватора с использованием окулографа, камеры сцены и двух камер для наблюдения за глазами. В качестве задания применялся симулятор управления экскаватором. Для достижения состояния утомления каждый участник выполнял задание *time on operating* (ТОО). Длительность всего эксперимента составила 100 минут, включая тренировку, 5 тестов ТОО и перерыв. Главной частью эксперимента было выполнение повседневных задач оператора экскаватора, оставшаяся часть занимал тест *hazard detection task* (HDT), который требовал от участников реакции на визуальный стимул для выявления опасного поведения. Этот тест заключался в определении по зеркалам заднего вида уровня опасности местоположения человека. Для определения утомления были выбраны следующие параметры: частота и длительность моргания, размер зрачка, направление взгляда. Результаты анализа показали увеличение частоты морганий, уменьшение диаметра зрачка и снижение внимания оператора.

Таким образом, разработка метода для динамического определения функционального состояния утомления является чрезвычайно важной задачей в современном мире. Методы определения утомления по глазным движениям применяются в различных сферах человеческой деятельности, однако на данный момент не существует метода, который позволял бы в реальном времени и с высокой точностью определять утомление на основе движений глаз. Требуется разработка метода динамической оценки утомления оператора ПК с использованием среднескоростных трекеров глаз, позволяющего определить значимые характеристики движения взгляда и осуществить их интеллектуальный анализ.

2. НАБОР ДАННЫХ ГЛАЗНЫХ ДВИЖЕНИЙ

При разработке сессии использовались две разные по стилю реагирования группы заданий – пассивные и активные, оценивающие вовлеченность, степень внимания (чтение текста) и требующие скоординированного моторного ответа: СЗМР, корректурная проба «Кольца Ландольта», игра «Тетрис». В качестве задания, воспроизводящего естественную и каждодневную деятельность оператора, использовалось задание на чтение текста научного стиля. Размер одной экспериментальной сессии составляет 60 минут. В связи с тем, что оператор в начале и в конце записи сессии будет иметь разную степень утомления, тест СЗМР проводился в начале и в конце экспериментальной сессии.

Регистрация СЗМР выполнялась программно при предъявлении целевого стимула (красного круга) и дистрактора (зеленого круга). Задача участника эксперимента заключается в том, чтобы нажать кнопку при появлении целевого стимула. Количество проб – 70. Регистрируются следующие параметры: среднее значение времени реакции, стандартное отклонение и количество ошибок. Чтение текста научного стиля выступает в роли контрольного и нагрузочного статического условия. Статьи и книги по интересующей участника тематике были опубликованы в рецензируемых журналах и найдены через индексированную базу данных. В течение 15 минут участник читает текст с монитора. Корректурная проба «Кольца Ландольта» – тест, используемый для

измерения остроты зрения, состоящий из стимулов в виде неполного кольца [19]. Размер предъявляемой таблицы – 30×30 , на прохождение теста отведено 5 минут. Регистрируются следующие параметры: затраченное время, количество целевых стимулов, количество обнаруженных символов, количество пропущенных символов, количество ошибок. Эти параметры позволяют рассчитать коэффициент умственной работоспособности. Игра «Тетрис» выступает в роли контрольного и нагрузочного динамического условия. На протяжении 15 минут участник играет в классический вид игры «Тетрис», используя клавиатуру [20].

Таким образом, экспериментальная сессия состоит из следующих этапов:

- 1) заполнение опросника VAS-F;
- 2) тест СЗМР (активное задание);
- 3) чтение текста научного стиля (пассивное задание);
- 4) корректурная проба «Кольца Ландольта» (активное задание);
- 5) тест «Игра в тетрис» (активное задание);
- 6) тест СЗМР (активное задание).

Во время выполнения каждого задания осуществляется запись глазных движений. Запись останавливалась после выполнения задания. На рис. 1 представлена последовательность заданий в одной сессии. Общая продолжительность такой записи составляет один час.

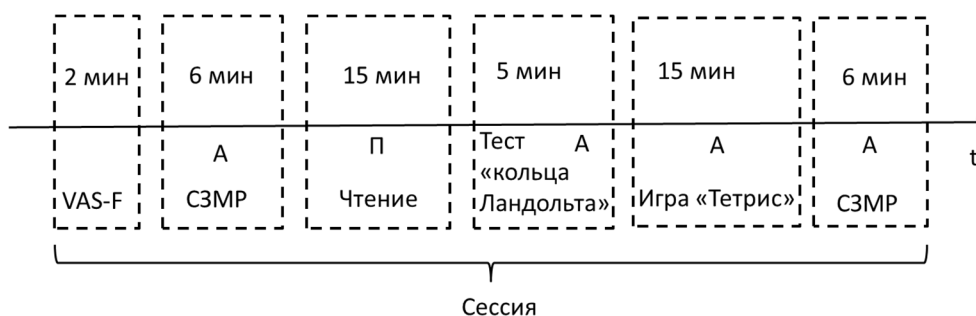


Рис. 1. Хронология одной записи

Fig. 1. The timeline of a one recording

В течение одного дня участник выполняет 3 сессии записи, перед каждой сессией заполняет опросник VAS-F. Участникам нужно было записать набор данных за 8 дней. Набор каждого участника состоит из записей как минимум одного дня. В экспериментах по формированию набора данных [21] приняли участие 15 человек, в сумме получено 192 часа записи.

3. МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ УТОМЛЕНИЯ ОПЕРАТОРА ПК

На рис. 2 представлен разработанный метод динамической оценки утомления оператора ПК. Этот метод состоит из сценария обучения и сценария определения утомления. Сценарий обучения предназначен для машинного

обучения. Результатом работы сценария определения утомления является оценка утомления оператора ПК.

Сценарий обучения начинается с вычисления характеристик глазных движений по координатам взгляда [21]. В результате получаются скоростные характеристики, временные характеристики, доля характеристик от общего числа, количественные характеристики, характеристики длины саккады и характеристики кривизны траектории движения взгляда. Затем выполняется поиск корреляций между характеристиками глазных движений и оценками утомления на основе результатов теста СЗМР, теста «Кольца Ландольта» и опросника VAS-F.

Далее начинается сценарий определения утомления. Выбираются характеристики с наибольшими значениями корреляции и соответствующие требованиям экспертов. Из модулей «Выбранные характеристики» и «Координаты взгляда» формируется модуль «Размеченный набор данных», содержащий модули «Размеченные координаты взгляда» и «Рассчитанные характеристики». Архитектура модели машинного обучения содержит такие классификаторы, как случайный лес, дерево решений, многослойный персептрон. На основе архитектуры строится обученная модель, которая содержит один из трех классификаторов с весами. Таким образом, модуль «Размеченный набор данных» передается в модуль «Обученная модель». И модуль «Вычислитель», используя модули «Обученная модель» и «Размеченный набор данных», определяет, утомлен или не утомлен оператор ПК.



Рис. 2. Метод динамической оценки утомления оператора ПК

Fig. 2. Method of dynamic assesment of PC operator fatigue

Скоростные характеристики показывают, как быстро перемещается взгляд. Временные характеристики показывают длительность фиксации и саккад разных видов (например, сколько времени взгляд находился внутри области фиксации короче 150 мс, сколько времени длилась саккада). Долевые характеристики показывают долю характеристик от общего числа (например, процент фиксации короче 150 мс от общего числа фиксации). Количественные характеристики показывают число фиксации и саккад определенного типа

(например, число саккад с амплитудой менее 6 угловых градусов). Характеристики длины саккады показывают среднюю, минимальную и максимальную длину саккады. Характеристики кривизны траектории движения взгляда показывают отношение пути, пройденного взглядом, к перемещению взгляда.

Указанные ниже характеристики глазных движений выбраны экспертами на основе анализа таблицы корреляции значений соответствующих параметров движений, представленных на рис. 3, и теста умственной работоспособности (тест «Кольца Ландольта»), результатов VAS-F, значений СЗМР:

- средняя кривизна траектории движения взгляда;
- минимальная кривизна траектории движения взгляда;
- минимальная длина саккады;
- доля времени, проведенного в фиксациях короче 150 мс;
- доля фиксаций короче 150 мс;
- средняя скорость внутри области фиксации, град/с;
- максимальная скорость внутри области фиксации, град/с.

Таблица 1

Table 1

Результаты экспериментов

Experimental results

Характеристики	Тест «Кольца Ландольта» по критерию Уилкоксона, $\times 10^{-2}$		Динамика изменения характеристик внутри сессии		Корреляция		
	1p – value	2p – value	Медиана	Среднее значение	VAS-F, %	СЗМР, %	Изменение СЗМР, %
Средняя скорость внутри области фиксации, град/с	0	0	–86,61	–58,20	10,74	27,84	9,90
Средняя кривизна траектории движения взгляда	0	0	72,62	63,91	–9,07	–27,34	12,10
Минимальная скорость движения взгляда в секундном интервале, град/с	0	0	–69,05	–49,34	11,15	15,99	7,64
Минимальная скорость внутри области фиксации, град/с	0	0	–66,52	–45,58	5,73	9,17	3,81
Минимальная кривизна траектории движения взгляда	0	0	56,70	38,27	27,34	–22,44	–27,94
Минимальная длина саккады, град.	0	0	56,35	38,59	9,76	–40,39	8,82
Максимальная длина саккады, град.	0	0	–55,90	–15,79	8,83	–6,53	–12,58

Продолжение табл. 1

Continuation of the Tab. 1

Характеристики	Тест «Кольца Ландольта» по критерию Уилкоксона, $\times 10^{-2}$		Динамика изменения характеристик внутри сессии		Корреляция		
	1p – value	2p – value	Медиана	Среднее значение	VAS-F, %	СЗМР, %	Изменение СЗМР, %
Доля фиксаций между 150 и 900 мс	0	0	55,84	15,70	–11,58	12,17	0,01
Средняя длина саккады, град	0	1	52,27	21,34	–21,73	8,35	–7,14
Средняя длительность саккады, с	0	1	52,27	14,27	–21,93	13,40	–6,66
Общая длительность фиксаций между 150 и 900 мс	0	2	–21,43	–10,12	19,21	8,59	–5,58
Доля времени, проведенного в фиксациях между 150 и 900 мс	0	1	–12,01	–8,73	–0,50	28,57	–9,74
Максимальная мгновенная скорость движения взгляда, град/с	1	0	–55,90	–23,90	–0,50	1,18	–14,17
Максимальная кривизна траектории движения взгляда	1	2	–2,78	–8,08	–18,64	–8,28	–0,31
Доля фиксаций короче 150 мс	1	5	–59,82	–31,28	16,20	7,16	–4,27
Доля фиксаций длиннее 150 мс	1	5	59,82	40,73	–16,53	–19,05	–6,71
Доля фиксаций короче 180 мс	1	5	–68,06	–29,91	13,72	4,93	8,81
Доля фиксаций длиннее 180 мс	1	5	66,07	29,35	–13,96	7,09	–2,28
Средняя скорость саккады, град/с	1	4	–0,45	–0,80	–4,31	8,32	3,08
Ложные фиксации в минуту	1	10	–62,50	–21,41	19,84	12,37	–2,40
Модуль среднего ускорения в секундном интервале, град/с ²	1	10	–73,26	–37,74	–5,29	7,30	–3,85
Фиксации дольше 900 мс в минуту	2	10	–10,71	–13,33	–8,24	14,81	–16,56

Продолжение табл. 1
Continuation of the Tab. 1

Характеристики	Тест «Кольца Ландольта» по критерию Уилкоксона, $\times 10^{-2}$		Динамика изменения характеристик внутри сессии		Корреляция		
	1p – value	2p – value	Медиана	Среднее значение	VAS-F, %	СЗМР, %	Изменение СЗМР, %
Доля времени, проведенного в фиксациях короче 150 мс	3	4	–82,86	–53,97	23,51	15,41	7,79
Максимальная длительность саккады, с	4	13	–59,13	–18,16	17,46	10,55	12,97
Фиксации короче 180 мс в минуту	5	7	–3,57	–11,37	–3,60	19,08	–8,08
Доля времени, проведенного в фиксациях длиннее 150 мс	5	10	82,86	50,69	–12,52	–10,71	0,53
Доля времени, проведенного в фиксациях короче 180 мс	6	7	–71,43	–45,77	22,13	8,48	17,28
Доля времени, проведенного в фиксациях длиннее 180 мс	6	10	79,29	50,51	–10,28	–14,70	–1,16
Фиксации длиннее 150 мс в минуту	6	10	–56,70	–26,60	–10,98	7,87	–14,09
Минимальная мгновенная скорость движения взгляда, град/с	6	10	–3,57	–4,47	–6,64	4,49	2,69
Фиксации короче 150 мс в минуту	6	16	–75,40	–62,17	31,41	9,82	–1,54
Фиксации между 150 и 900 мс в минуту	8	16	–74,60	–61,56	30,59	7,27	8,62
Доля времени, проведенного в фиксациях дольше 900 мс	8	20	70,71	50,08	–2,41	–29,15	–25,97
Максимальная скорость саккады, град/с	8	30	–58,68	–25,79	3,13	–18,77	–23,21
Модуль максимального ускорения в секундном интервале, град/с ²	9	30	3,57	1,56	6,06	21,36	8,43
Общая длительность фиксаций длиннее 150 мс	14	30	82,14	66,29	–4,35	1,25	–1,70

Продолжение табл. 1
Continuation of the Tab. 1

Характеристики	Текст «Кольца Ландольта» по критерию Уилкоксона, $\times 10^{-2}$		Динамика изменения характеристик внутри сессии		Корреляция		
	1p – value	2p – value	Медиана	Среднее значение	VAS-F, %	СЗМР, %	Изменение СЗМР, %
Общая длительность фиксаций длиннее 180 мс	14	30	78,57	66,20	2,35	0,14	–5,07
Максимальная скорость внутри области фиксации, град/с	22	36	–56,70	–25,96	31,88	45,33	11,99
Модуль максимального мгновенного ускорения, град/с ²	30	100	–2,78	–1,56	7,16	5,05	–7,19
Минимальная длительность саккады, с	39	36	53,13	12,23	–19,67	–13,07	3,87
Доля фиксаций дольше 900 мс	44	30	68,75	18,02	11,64	–2,87	–9,59
Общая длительность фиксаций дольше 900 мс	44	43	82,86	53,47	–2,76	26,70	–26,81
Фиксации длиннее 180 мс в минуту	55	57	–72,08	–61,67	–4,47	–15,9%	–30,06
Модуль среднего мгновенного ускорения, град/с ²	55	73	–78,13	–52,99	10,95	16,73	–0,29
Ложные саккады в минуту	67	73	–82,86	–56,95	16,39	19,87	–3,15
Количество саккады с амплитудой менее 6 угловых градусов в минуту	73	50	–82,14	–56,47	19,80	16,26	4,61
Средняя скорость движения взгляда в секундном интервале, град/с	73	73	–77,38	–52,98	4,19	16,73	–0,39
Средняя мгновенная скорость движения взгляда, град/с	73	73	–77,38	–41,73	6,21	16,53	–0,39
Общая длительность фиксаций короче 150 мс	80	43	–82,14	–55,87	21,71	21,25	–10,52
Минимальная скорость саккады, град/с	80	100	52,78	37,92	–5,48	–8,38	–22,95
Средняя частота появления новой области фиксации в секундном интервале, Гц	86	65	–82,86	–52,48	16,98	29,07	6,59

Окончание табл. 1

End of the Tab. 1

Характеристики	Тест «Кольца Ландольта» по критерию Уилкоксона, $\times 10^{-2}$		Динамика изменения характеристик внутри сессии		Корреляция		
	1p – value	2p – value	Медиана	Среднее значение	VAS-F, %	СЗМР, %	Изменение СЗМР, %
Частота появления новой области фиксации, Гц	86	65	–82,86	–52,48	21,20	15,81	7,34
Максимальная частота появления новой области фиксации в секундном интервале, Гц	86	100	–64,93	–43,42	7,99	10,69	15,10
Общая длительность фиксаций короче 180 мс	96	50	–80,36	–55,40	21,85	24,43	–9,78
Количество саккад с амплитудой более 6 угловых градусов в минуту	93	65	–67,86	–20,92	6,44	4,22	6,54
Максимальная скорость движения взгляда в секундном интервале, град/с	93	100	–4	–9	–4,51	3,47	–4,44
Общая длительность саккад, с	100	82	–86,43	–55,46	5,35	14,07	–3,80
Модуль минимального мгновенного ускорения, град/с ²	100	100	–56,25	–19,10	1,33	0,83	–4,19
Модуль минимального ускорения в секундном интервале, град/с ²	100	100	–56,25	–19,10	1,33	0,84	–4,19

В основу разметки всего набора данных легли результаты корректурной пробы «Кольца Ландольта» [22]. Одним из показателей этого теста является умственная работоспособность. Значения этого параметра в рамках набора данных лежали в интервале от –0,5 до 4. Для обучения нейросетей было выполнено преобразование числовых значений целевой переменной – умственной работоспособности в категории. Таким образом, умственная работоспособность была классифицирована как низкая или высокая на основе выбранного порога 1,5, так как это значение позволяет разбить все данные в равных пропорциях. Если испытуемый имел значение умственной работоспособности 1,5 или выше, то его работоспособность считалась высокой, в противном случае – низкой.

Далее было проанализировано несколько типов реализованных в программе классификаторов, чтобы определить оптимальный. В число оцениваемых классификаторов входили метод случайного леса, метод деревьев решений, метод

k -ближайших соседей, многослойный перцептрон, логистическая регрессия и метод опорных векторов (SVM). Набор данных состоял из 1112 образцов, которые были разделены на 912 образцов для обучения и 200 образцов для тестирования. Набор для тестирования состоял из 100 образцов из класса «низкая умственная работоспособность» и 100 образцов из класса «высокая умственная работоспособность». Такие размеры выборки были выбраны для того, чтобы максимально увеличить количество данных, доступных для обучения, без ущерба для надежности результатов тестирования.

Для каждого классификатора было оценено несколько конфигураций параметров, чтобы определить оптимальный классификатор из доступных вариантов. Цель состояла в том, чтобы выбрать конфигурацию, обеспечивающую наилучшую производительность в соответствии с критериями оценки.

На рис. 3 представлен разработанный сценарий определения состояния утомления с использованием координат взгляда и характеристик глазных движений. По координатам взгляда вычисляются характеристики глазных движений, и после корреляций с результатами тестов экспертами были выбраны скоростные характеристики, доля характеристик от общего числа, характеристики длины саккады, характеристики кривизны траектории движения взгляда.



Рис. 3. Сценарий определения состояния утомления

Fig. 3. The scenario for determining the state of fatigue

При выборе наилучшего классификатора для каждого алгоритма было необходимо оценить достигнутую точность. Чтобы улучшить работу классификаторов, к каждой характеристике была применена нормализация. Для этого из каждой характеристики вычиталось среднее значение и результат делился на стандартное отклонение. Для подготовки к процессу кросс-валидации координаты взгляда и выбранные характеристики разделяют на пять равных последовательных частей и собирают пять разных наборов обучающей и тестирующей выборки.

Затем модули «Выбранные характеристики» и «Координаты взгляда» передаются в модуль «Обученная модель», которая содержит один классификатор из таких, как случайный лес, дерево решений, многослойный перцептрон. И в результате работы одного из трех алгоритмов определяется состояние утомления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным показателем качества выполняемой оценки является F -мера, представляющая собой совокупность точности и полноты оценок, выдаваемых классификатором. Были проведены эксперименты с использованием различных наборов и комбинаций групп, чтобы изучить влияние конкретных групп признаков на эффективность классификации. Цель состояла в том, чтобы определить, будет ли использование одной группы или комбинации нескольких групп давать лучшие результаты. Для задачи было использовано три классификатора и три набора признаков (а именно, группа 1, группа 2, группа 3), представленных в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Результаты экспериментов

Experimental results

Признаки	Алгоритм	F -мера	Точность
Группа 1	Случайный лес	0,84	0,80
Группа 2	Случайный лес	0,84	0,79
Группа 3	Случайный лес	0,84	0,80
Все	Случайный лес	0,84	0,79
Группа 1 + группа 3	Случайный лес	0,85	0,80
Группа 1	Дерево решений	0,77	0,73
Группа 2	Дерево решений	0,78	0,73
Группа 3	Дерево решений	0,76	0,72
Все	Дерево решений	0,76	0,74
Группа 1 + группа 3	Дерево решений	0,77	0,73
Группа 1	Многослойный перцептрон	0,83	0,78
Группа 2	Многослойный перцептрон	0,83	0,79
Группа 3	Многослойный перцептрон	0,83	0,78
Все	Многослойный перцептрон	0,83	0,78
Группа 1 + группа 3	Многослойный перцептрон	0,83	0,77

Таким образом, для того чтобы оценить производительность предложенных моделей классификации, были исследованы три различных классификатора с различными параметрами. Кроме того, для повышения производительности был применен метод отбора признаков и анализа главных компонент (РСА).

В ходе многочисленных экспериментов каждая группа признаков систематически изучалась отдельно и в сочетании с другими группами, чтобы выявить наиболее эффективное объединение. Также для всесторонней оценки моделей использовались несколько стратегий работы с тестовыми наборами. Сначала случайным образом был выбран тестовый набор для оценки эффективности различных моделей и признаков. Затем был создан сбалансированный тестовый набор, основанный на действиях, выполняемых во время сессий. Была проведена пятифолдовая кросс-валидация. Результаты этих экспериментов показали, что использование признаков группы 1 и группы 3 в классификаторе на основе случайного леса дало наиболее многообещающие результаты. Этот подход позволил добиться самых высоких показателей F -меры и наилучшей средней точности, что говорит об общей надежности модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zargari Marandi R. et al. Eye movement characteristics reflected fatigue development in both young and elderly individuals / R. Zargari Marandi, P. Madeleine, Ø. Omland, N. Vuillerme, A. Samani // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8 (1). – P. 1–10. – DOI: 10.1038/s41598-018-31577-1.
2. Real-time identification of eye fixations and saccades using radial basis function networks and Markov chains / R. Lobão-Neto, A. Brilhault, S. Neuschwander, R. Rios // *Pattern Recognition Letters*. – 2022. – Vol. 162. – P. 63–70. – DOI: 10.1016/j.patrec.2022.08.013.
3. Driver fatigue detection based on saccadic eye movements / M.C. Catalbas, T. Cegovnik, J. Sodnik, A. Gulten // 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). – IEEE, 2017. – P. 913–917.
4. Di Stasi L. L. et al. Towards a driver fatigue test based on the saccadic main sequence: A partial validation by subjective report data // *Transportation research part C: emerging technologies*. – 2012. – Т. 21. – №. 1. – С. 122–133.
5. Saccadic velocity as an arousal index in naturalistic tasks / L.L. Di Stasi, A. Catena, J.J. Canas, S.L. Macknik, S. Martinez-Conde // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. – 2013. – Vol. 37 (5). – P. 968–975.
6. Saccadic eye movement metrics reflect surgical residents' fatigue / L.L. Di Stasi, M.B. McCamy, S.L. Macknik, J.A. Mankin, N. Hooft, A. Catena, S. Martinez-Conde // *Annals of Surgery*. – 2014. – Vol. 259 (4). – P. 824–829.
7. Fatigue in the military: towards a fatigue detection test based on the saccadic velocity / C. Diaz-Piedra, H. Rieiro, J. Suárez, F. Rios-Tejada, A. Catena, L.L. Di Stasi // *Physiological Measurement*. – 2016. – Vol. 37 (9). – P. N62–N75.
8. Fit-for-duty test for estimation of drivers' sleepiness level: Eye movements improve the sleep/wake predictor / C. Ahlstrom, M. Nyström, K. Holmqvist, C. Fors, D. Sandberg, A. Anund, G. Kecklund, T. Åkerstedt // *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. – 2013. – Vol. 26 (4). – P. 20–32. – DOI: 10.1016/j.trc.2012.07.008.
9. Dynamics of saccade parameters in multiple sclerosis patients with fatigue / C. Finke, L.M. Pech, C. Sömmmer, J. Schlichting, S. Stricker, M. Endres, F. Ostendorf, C.J. Ploner, A.U. Brandt, F. Paul // *Journal of Neurology*. – 2012. – Vol. 259 (12). – P. 2656–2663. – DOI: 10.1007/s00415-012-6565-8.
10. Galley N. An enquiry into the relationship between activation and performance using saccadic eye movement parameters // *Ergonomics*. – 1998. – Vol. 41 (5). – P. 698–720.
11. Investigation on the correlation between eye movement and reaction time under mental fatigue influence / V. Renata, F. Li, C.-H. Lee, C.-H. Chen // 2018 International Conference on Cyberworlds (CW). – IEEE, 2018. – P. 207–213. – DOI: 10.1109/CW.2018.00046.
12. Fatigue and arousal modulations revealed by saccade and pupil dynamics / J.-T. Chen, Y.-C. Kuo, T.-Y. Hsu, C.-A. Wang // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2022. – Vol. 19 (15). – P. 9234. – DOI: 10.3390/ijerph19159234.
13. Blinks and saccades as indicators of fatigue in sleepiness warnings: looking tired? / R. Schleicher, N. Galley, S. Briest, L. Galley // *Ergonomics*. – 2008. – Vol. 51 (7). – P. 982–1010. – DOI: 10.1080/00140130701817062.

14. Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness / G. Borghini, L. Astolfi, G. Vecchiato, D. Mattia, F. Babiloni // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. – 2014. – Vol. 44. – P. 58–75. – DOI: 10.1016/J.NEUBIOREV.2012.10.003.
15. Eye movement characteristics reflected fatigue development in both young and elderly individuals / R. Zargari Marandi, P. Madeleine, Ø. Omland, N. Vuillerme, A. Samani // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – P. 13148. – DOI: 10.1038/s41598-018-31577-1.
16. Shifts in attention during mental fatigue: Evidence from subjective, behavioral, physiological, and eye-tracking data / J.F. Hopstaken, D. van der Linden, A.B. Bakker, M.A.J. Kompier, Y.K. Leung // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. – 2016. – Vol. 42 (6). – P. 878–889. – DOI: 10.1037/xhp0000189.
17. Schweizer T., Wyss T., Gilgen-Ammann R. Detecting soldiers' fatigue using eye-tracking glasses: practical field applications and research opportunities // *Military Medicine*. – 2022. – Vol. 187 (11–12). – P. e1330–e1337. – DOI: 10.1093/milmed/usab509.
18. Identification and classification of construction equipment operators' mental fatigue using wearable eye-tracking technology / J. Li, H. Li, W. Umer, H. Wang, X. Xing, S. Zhao, J. Hou // *Automation in Construction*. – 2020. – Vol. 109. – P. 103000. – DOI: 10.1016/j.autcon.2019.103000.
19. Millodot M. Dictionary of optometry and visual science E-Book. – Elsevier Health Sciences, 2014.
20. Яндекс игры. Классический тетрис. – URL: <https://yandex.ru/games/app/165620> (дата обращения: 26.11.2024).
21. OperatorEYEVF: operator dataset for fatigue detection based on eye movements, heart rate data, and video information / S. Kovalenko, A. Mamonov, V. Kuznetsov, A. Bulygin, I. Shoshina, I. Brak, A. Kashevnik // *Sensors (Basel)*. – 2023. – Vol. 23 (13). – P. 6197. – DOI: 10.3390/s23136197.
22. Landolt E. Méthode optométrique simple // *Bulletins et Mémoires de la Société Française d'Ophtalmologie*. – 1888. – Vol. 6. – P. 213–214.

Булыгин Александр Олегович, младший научный сотрудник, аспирант Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Основное направление научных исследований: глубокое обучение, компьютерное зрение, распознавание образов. E-mail: alexandr_bulygin@mail.ru

Bulygin Alexandr O., junior researcher, postgraduate student, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). His research interests are currently focused on deep learning, computer vision, and pattern recognition. E-mail: alexandr_bulygin@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2024-3-7-24

The method of dynamic detection of PC operator fatigue based on eye movement characteristics*

A.O. BULYGIN

Saint Petersburg, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), 4th line. V.I., 199178, Russian Federation

alexandr_bulygin@mail.ru

Abstract

The onset of fatigue is dangerous in areas of activity that require high concentration of human attention, such as air traffic controllers, nuclear power plant operators, etc. It should be noted that these types of activities are characterized by the fact that most of the time the employee

* Received 06 March 2024.

sits at the workplace and his gaze is directed at the monitor. The paper presents a method for dynamic detection of PC operator fatigue based on eye movement characteristics. The method for dynamic detection of fatigue implements a training scenario for a fatigue detection model and a fatigue detection scenario. Within the training scenario, eye movement characteristics are calculated and correlations with fatigue test results are searched for. Within the fatigue detection scenario, eye movement characteristics that most strongly correlate with fatigue are selected. These characteristics can also be divided by the types of physical events on which they are based. We can distinguish such characteristics as speed, time, quantity, size, percentage, frequency and ratio characteristics. To find correlations between eye movement characteristics and fatigue, a dataset of eye movements and the results of tests and questionnaires such as the go/no-go task, the Landolt ring test, and the VAS-F questionnaire were analyzed. The dataset consists of gaze coordinate recordings from 15 participants acting as PC operators. To determine the degree of fatigue, the participant completed the VAS-F questionnaire. The Landolt ring correction test is a test used to measure attention concentration. The labeled dataset is used to train a machine learning model that detects fatigue. The experimental results showed that using the characteristics selected in the study yielded the most promising results. This approach allowed us to achieve the highest F-measure and the best average accuracy, indicating the overall reliability of the model.

Keywords: eye tracking, gaze movements, characteristics of gaze movements, fatigue, fatigue detection, questionnaire, VAS-F, correlation with fatigue

REFERENCES

1. Zargari Marandi R., Madeleine P., Omland Ø., Vuillerme N., Samani A. Eye movement characteristics reflected fatigue development in both young and elderly individuals. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8 (1), pp. 1–10. DOI: 10.1038/s41598-018-31577-1.
2. Lobão-Neto R., Brilhault A., Neuenschwander S., Rios R. Real-time identification of eye fixations and saccades using radial basis function networks and Markov chains. *Pattern Recognition Letters*, 2022, vol. 162, pp. 63–70. DOI: 10.1016/j.patrec.2022.08.013.
3. Catalbas M.C., Cegovnik T., Sodnik J., Gulten A. Driver fatigue detection based on saccadic eye movements. *2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, IEEE, 2017, pp. 913–917.
4. Di Stasi L. L. et al. Towards a driver fatigue test based on the saccadic main sequence: A partial validation by subjective report data // *Transportation research part C: emerging technologies*. – 2012. – T. 21. – №. 1. – С. 122–133.
5. Di Stasi L.L., Catena A., Canas J.J., Macknik S.L., Martinez-Conde S. Saccadic velocity as an arousal index in naturalistic tasks. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2013, vol. 37 (5), pp. 968–975.
6. Di Stasi L.L., McCamy M.B., Macknik S.L., Mankin J.A., Hooft N., Catena A., Martinez-Conde S. Saccadic eye movement metrics reflect surgical residents' fatigue. *Annals of Surgery*, 2014, vol. 259 (4), pp. 824–829.
7. Diaz-Piedra C., Rieiro H., Suárez J., Rios-Tejada F., Catena A., L.L. Di Stasi. Fatigue in the military: towards a fatigue detection test based on the saccadic velocity. *Physiological Measurement*, 2016, vol. 37 (9), pp. N62–N75.
8. Ahlstrom C., Nyström M., Holmqvist K., Fors C., Sandberg D., Anund A., Kecklund G., Åkerstedt T. Fit-for-duty test for estimation of drivers' sleepiness level: Eye movements improve the sleep/wake predictor. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, 2013, vol. 26 (4), pp. 20–32. DOI: 10.1016/j.trc.2012.07.008.
9. Finke C., Pech L.M., Sömmmer C., Schlichting J., Stricker S., Endres M., Ostendorf F., Ploner C.J., Brandt A.U., Paul F. Dynamics of saccade parameters in multiple sclerosis patients with fatigue. *Journal of Neurology*, 2012, vol. 259 (12), pp. 2656–2663. DOI: 10.1007/s00415-012-6565-8.
10. Galley N. An enquiry into the relationship between activation and performance using saccadic eye movement parameters. *Ergonomics*, 1998, vol. 41 (5), pp. 698–720.
11. Renata V., Li F., Lee C.-H., Chen C.-H. Investigation on the correlation between eye movement and reaction time under mental fatigue influence. *2018 International Conference on Cyberworlds (CW)*. IEEE, 2018, pp. 207–13. DOI: 10.1109/CW.2018.00046.

12. Chen J.-T., Kuo Y.-C., Hsu T.-Y., Wang C.-A. Fatigue and arousal modulations revealed by saccade and pupil dynamics. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19 (15), p. 9234. DOI: 10.3390/ijerph19159234.
13. Schleicher R., Galley N., Briest S., Galley L. Blinks and saccades as indicators of fatigue in sleepiness warnings: looking tired? *Ergonomics*, 2008, vol. 51 (7), pp. 982–1010. DOI: 10.1080/00140130701817062.
14. Borghini G., Astolfi L., Vecchiato G., Mattia D., Babiloni F. Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2014, vol. 44, pp. 58–75. DOI: 10.1016/J.NEUBIOREV.2012.10.003.
15. Zargari Marandi R., Madeleine P., Omland Ø., Vuillerme N., Samani A. Eye movement characteristics reflected fatigue development in both young and elderly individuals. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, p. 13148. DOI: 10.1038/s41598-018-31577-1.
16. Hopstaken F., van der Linden D., Bakker A.B., Kompier M.A.J., Leung Y.K. Shifts in attention during mental fatigue: Evidence from subjective, behavioral, physiological, and eye-tracking data. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2016, vol. 42 (6), pp. 878–889. DOI: 10.1037/xhp0000189.
17. Schweizer T., Wyss T., Gilgen-Ammann R. Detecting soldiers' fatigue using eye-tracking glasses: practical field applications and research opportunities. *Military Medicine*, 2022, vol. 187 (11–12), pp. e1330–e1337. DOI: 10.1093/milmed/usab509.
18. Li J., Li H., Umer W., Wang H., Xing X., Zhao S., Hou J. Identification and classification of construction equipment operators' mental fatigue using wearable eye-tracking technology. *Automation in Construction*, 2020, vol. 109, p. 103000. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.103000.
19. Millodot M. *Dictionary of optometry and visual science E-Book*. Elsevier Health Sciences, 2014.
20. Yandex igry. *Klassicheskii tetris* [Yandex Games. Classic Tetris]. Available at: <https://yandex.ru/games/app/165620> (accessed 26.11.2024).
21. Kovalenko S., Mamonov A., Kuznetsov V., Bulygin A., Shoshina I., Brak I., Kashevnik A. OperatorEYEV: operator dataset for fatigue detection based on eye movements, heart rate data, and video information. *Sensors (Basel)*, 2023, vol. 23 (13), p. 6197. DOI: 10.3390/s23136197.
22. Landolt E. Méthode optométrique simple. *Bulletins et Mémoires de la Société Française d'Ophtalmologie*, 1888, vol. 6, pp. 213–214. (In France).

Для цитирования:

Булыгин А.О. Метод динамической оценки утомления оператора ПК на основе характеристик глазных движений // Системы анализа и обработки данных. – 2024. – № 3 (95). – С. 7–24. – DOI: 10.17212/2782-2001-2024-3-7-24.

For citation:

Bulygin A.O. Metod dinamicheskoi otsenki utomleniya operatora PK na osnove kharakteristik glaznykh dvizhenii [The method of dynamic detection of PC operator fatigue based on eye movement characteristics]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2024, no. 3 (95), pp. 7–24. DOI: 10.17212/2782-2001-2024-3-7-24.