Апробация метрики «Средняя разница фактической и оптимальной траекторий движений глаз» при выполнении таблиц Горбова-Шульте

К. М. Рысева*, В. Е. Педашенко‡, А. И. Ковалев§

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки объективных методов выделения когнитивной нагрузки. Целью работы является апробация количественного показателя для оценки когнитивной нагрузки по окулометрическим данным — средняя разница фактической и оптимальной траекторий движений глаз (РФОТ). В исследовании приняли участие 95 респондентов. Стимульный материал включал три таблицы Горбова–Шульте. Движения глаз регистрировались с помощью EyeLink 1000 Plus. Показано, что в экспериментальной группе отклонение РФОТ было в среднем меньше, чем в контрольной. При увеличении внутренней когнитивной нагрузки происходило увеличение РФОТ. Полученные результаты свидетельствуют о чувствительности предложенного показателя к изменениям когнитивной нагрузки и позволяют интерпретировать увеличение РФОТ как вероятный маркер истощения когнитивных ресурсов.

Ключевые слова: зрительный поиск, когнитивная нагрузка, зрительное внимание, айтрекинг.

* *Рысева Ксения Михайловна* — научный сотрудник лаборатории виртуальной реальности и полимодального восприятия, Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований, e-mail: `rysevakm@my.msu.ru`, ORCID: 0009-0000-8258-5177.

Ryseva Ksenia Mikhailovna — researcher at the Laboratory of VR and Polymodal Perception, Federal Scientific Centre of Psychological and Multidisciplinary Research.

‡ *Педашенко Владислав Евгеньевич* — аспирант факультета Вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В.Ломоносова, e-mail: `pedashenkove@my.msu.ru`, ORCID: 0009-0001-5599-9355.

Pedashenko Vladislav Evgenevich — PhD student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics.

§ *Ковалев Артем Иванович* — д.п.н., доцент кафедры психофизиологии Факультета психологии, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, e-mail: `artem.kovalev.msu@mail.ru`, ORCID: 0000-0003-1592-2035.

Kovalev Artem Ivanovich — Doctor of Psychology, associate professor of Psychophysiology Department, Lomonosov Moscow State University.

Опубликовано на условиях лицензии CC-BY 4.0
Published under CC-BY 4.0

1. Введение

Своевременная и точная оценка когнитивной нагрузки позволяет оптимизировать среду, предотвращать перегрузку, проектировать рабочую среду оператора в зависимости от его индивидуальных характеристик. Анализ параметров движений глаз при этом позволяет зафиксировать распределение внимания, глубину переработки информации и момент возникновения перегрузки в реальном времени [1].

2. Средняя разница фактической и оптимальной траекторий (РФОТ)

Был разработан показатель РФОТ - средняя разница между фактической и оптимальной траекторией движения глаз между посещенными зонами интереса в пикселях, который вычислялся по формуле: $\frac{D_{fact}-D_{opt}}{n-1}$, где n - количество кликов, которое совершил респондент, D_{fact} - длина траектории движении глаза, D_{opt} - наименьшая длина траектории, проходящей через середины зон интереса, на которые кликнул респондент, строится в порядке кликов испытуемого. D_{fact} рассчитывается по исходным отсчётам с частотой 500 Гц.

3. Методика и выборка исследования

В исследовании приняли участие 95 респондентов: средний возраст 22,3 года (SD = 5,68). Среди них были 22 мужчины и 73 женщины. Испытуемые были случайно распределены в экспериментальную (48 человек) и контрольную (47 человек) группы.

3.1. Описание использованной стимуляции

Респондентам были представлены три таблицы Горбова-Шульте, размер 7x7 клеток. Каждый квадрат был обозначен как зона интереса со стороной 150 пикселей. Экспериментальная группа выполняла задания под метроном 60 уд./мин и с псевдо-ограничением времени, что увеличивало внешнюю когнитивную нагрузку. Испытуемые нажимали на числа в черных квадратах в 1-й таблице в порядке возрастания, на числа в красных квадратах во 2-й таблице в порядке убывания и в 3-й таблице, чередуя черные (возрастание) и красные (убывание) цифры в квадратах - увеличение внутренней когнитивной нагрузки.

3.2. Используемое оборудование

Движения левого глаза респондента регистрировались с помощью айтрекера SR Research Eye Link 1000 Plus (частота-500 ГЦ) монокулярно.

4. Результаты апробации

Однофакторный дисперсионный анализ Уэлча по среднему значению трех таблиц показал, что в экспериментальной группе значения РФОТ были меньше, чем в контрольной (F=4.74, p=0.032, df1=1, df2=87.3). Дисперсионный анализ «группа × таблица» с повторными измерениями показал, что контрольная группа при выполнении таблицы 3 показала большие показатели РФОТ, чем в 1-й (t=15.2, $p < .001$, df=93.0) и во 2-й (t=15.4, $p < .001$, df=93.0) таблицах. Экспериментальная группа при выполнении 3-ей таблицы показала большие показатели РФОТ, чем в 1-й (t=12.7, $p < .001$, df=93.0) и во 2-й (t=13.6, $p < .001$, df=93.0) таблицах. Средние значения и стандартные отклонения РФОТ, правильности ответов и времени выполнения[1].

5. Обсуждение и заключение

Наибольшая внешняя когнитивная нагрузка (метроном) экспериментальной группы привела к мобилизации когнитивных ресурсов и выбору более оптимального пути сканирования, при этом добавление внутренней когнитивной и перцептивной нагрузок (условия задачи в таблице 3), вероятно, привело к истощению ресурсов и последующему увеличению отклонения от оптимальной траектории [2]. Различие между группами может отражать скорость выполнения, и вопрос о том, что показатель даёт сверх времени, остаётся для дальнейшей работы.

[1]Средние и стандартные отклонения РФОТ, (контрольная / экспериментальная):

Контр./эксп.	T1 M 3871/3601	T1 SD 1367/1173	T2 M 3876/3370	T2 SD 1493/1183	T3 M 8954/7801	T3 SD 2880/2212

Правильность ответов, (контрольная / экспериментальная):

Контр./эксп.	T1 M 0.980/0.981	T1 SD 0.0332/0.0330	T2 M 0.969/0.967	T2 SD 0.144/0.144	T3 M 0.810/0.759	T3 SD 0.183/0.209

Длительность, (контрольная / экспериментальная):

Контр./эксп.	T1 M 59191/55551	T1 SD 16870/14576	T2 M 58723/52358	T2 SD 19346/15208	T3 M 232880/207767	T3 SD 56444/55656

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2024-526.

Список литературы

[1] Xiaoxiao, L., Ying, C., "Eye tracking technology for examining cognitive processes in education: A systematic review", *Comput. Educ.*, **229** (2025. DOI: 10.1016/j.compedu.2025.105263).

[2] Dewhurst, R., Foulsham, T., Jarodzka, H., Johansson, R., Holmqvist, K., Nyström, M., "How Task Demands Influence Scanpath Similarity in a Sequential Number-Search Task", Vision research, **149** (2018), 9–23.. DOI: 10.1016/j.visres.2018.05.006 .

Статья поступила 12 октября 2026 г.

Testing the metric "Average Difference between Actual and Optimal Trajectories of Eye Movements" during completion of the Gorbov–Schulte tables

K. M. Ryseva, V. E. Pedashenko, A. I. Kovalev

The relevance of this study stems from the need to develop objective methods for identifying cognitive load. The aim of the work is to validate a quantitative indicator for assessing cognitive load based on oculomotor data — the average difference between the actual and optimal eye movement trajectories (RFOT). The study involved 95 participants. The stimulus material included three Gorbov–Schulte tables. Eye movements were recorded using an EyeLink 1000 Plus. It was shown that in the experimental group the deviation of the actual oculomotor trajectory from the optimal one was significantly smaller than in the control group. An increase in intrinsic cognitive load led to an increase in RFOT. The obtained results indicate that the proposed indicator is sensitive to changes in cognitive load and allow the increase in RFOT to be interpreted as a marker of cognitive resource depletion.

Keywords: visual search, cognitive load, visual attention, eye tracking.

Received on October 12, 2026