

УДК 612.08

## АНАЛИЗ КОГНИТИВНОЙ НАГРУЗКИ В ЗАДАЧЕ СТЕРНБЕРГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОКУЛОГРАФИИ

© 2023 г. Н. А. Брусинский<sup>1, \*</sup>, А. А. Бадарин<sup>1, 2</sup>, А. В. Андреев<sup>1, 2</sup>,  
В. М. Антипов<sup>1, 2</sup>, С. А. Куркин<sup>1, 2</sup>, А. Е. Храмов<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта”,  
Балтийский центр нейротехнологий и искусственного интеллекта, Калининград, Россия

<sup>2</sup>Автономная некоммерческая организация высшего образования  
“Университет Иннополис”, Лаборатория нейронауки и когнитивных технологий,  
Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, Иннополис, Россия

\*E-mail: nikita@brusinskii.ru

Поступила в редакцию 29.08.2022 г.

После доработки 16.09.2022 г.

Принята к публикации 26.09.2022 г.

Изучены физиологические и поведенческие характеристики человека во время продолжительного решения когнитивной задачи, основанной на парадигме Стернберга. Выявлена взаимосвязь между субъективной усталостью испытуемого и такими физиологическими характеристиками как длительность морганий и диапазон движения размера зрачка во время решения задачи.

DOI: 10.31857/S0367676522700235, EDN: JUNVSW

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение принципов и физических закономерностей работы головного мозга является одной из наиболее важных и активно исследуемых задач современной науки [1–4]. Одним из наиболее перспективных и мощных инструментов для изучения активности головного мозга является окулография (eyetracking) [5, 6]. Глазодвигательная активность является важным компонентом психических процессов человека, благодаря которым происходит получение, преобразование и использование зрительной информации. Регистрация и анализ движений глаз позволяет получить доступ к внутренним формам активности, которые протекают быстро и неосознанно. Сегодня одним из основных направлений исследований с помощью системы трекинга взгляда является изучение быстрых движений глаз (саккад) и морганий. В недавнем исследовании группы профессора Мартина Рольфса было показано, что визуальная информация внутри саккад (след объекта на сетчатке) информирует о характеристиках объекта и позволяет быстро выполнить коррекцию взгляда [6]. В другом исследовании с предъявлением неоднозначного стимула было показано, что моргания и микросаккады не способствуют переключению восприятия, более того, обнаружено, что переключению восприятия, напротив, предшествует уменьшение движения глаз [7].

Также с использованием технологии слежения за взглядом были выявлены факторы, определяющие высокий уровень обучения младенцев [8].

Данная работа посвящена изучению когнитивной нагрузки, вызванной продолжительным монотонным решением когнитивных задач, требующих высокого уровня внимания. Представлены результаты изучения поведенческой и глазодвигательной активности, а также их корреляций, в процессе продолжительного решения когнитивных задач.

### МЕТОДЫ

Был проведен нейрофизиологический эксперимент, в котором принимали участие условно здоровые волонтеры без истории нейрофизиологических заболеваний в возрасте от 19 до 21 г. (всего 15 человек). Основная экспериментальная часть начинается и заканчивается записью фоновой активности в течение 60 с. Эксперимента состоит из четырех одинаковых блоков заданий, перед и после каждого блока заданий испытуемый проходит тест на визуальную субъективную оценку усталости [9]. Каждый блок состоит из 72 заданий в форме теста Стернберга [10]. Тест Стернберга был реализован в следующей форме. Каждое задание начинается с черного экрана, на котором затем в течение 1.5–2.5 с демонстрируется белый крест, привлекающий внимание испы-

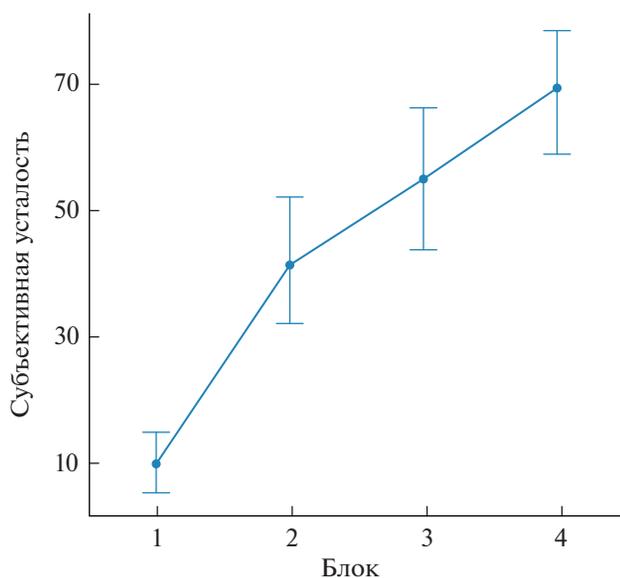


Рис. 1. Зависимость степени субъективной усталости от стадии эксперимента.

туемого. Далее появляется стимул в виде набора из 7 символов, в котором от 2 до 7 символов представляют собой заглавные буквы кириллицы, а остальные — “\*”. Предъявление набора букв происходит в течение 1.5–2.5 с, при этом испытуемому необходимо запомнить показанные буквы. Затем в течение 3–7 с демонстрируется черный экран, после чего на экране предъявляется одна строчная буква и испытуемому необходимо ответить, была ли эта буква в показанном ранее наборе или нет. Отметим, что показ строчной буквы необходим, для того чтобы удостовериться, что испытуемый запомнил семантическое значение буквы, а не ее визуальный образ. Ответ испытуемому предлагается дать с помощью двух одинаковых пультов, предварительно ассоциированных с наличием и отсутствием буквы в наборе. В каждом блоке содержится всего 72 задания, которые разделены в равной степени между шестью сложностями в зависимости от количества букв в наборе от 2 до 7 букв.

В качестве оборудования для регистрации движения глаз использовался EyeLink 1000 Plus.

Для анализа морганий они были разбиты на 4 категории: короткие длительностью 50–150 мс, средние — 150–350 мс, длинные — 350–700 мс, и моргания, которые были классифицированы как микросон — 700–2000 мс. Для среднего размера зрачка и для пробы, и для набора букв была проведена процедура коррекции базовой линии, чтобы устранить различия между испытуемыми.

Были выделены две сложности, определяемые количеством букв в демонстрируемом наборе. Легкой сложности соответствовали наборы букв, содержащие от 2 до 4 букв, а сложной — содержащие от 5 до 7 букв.

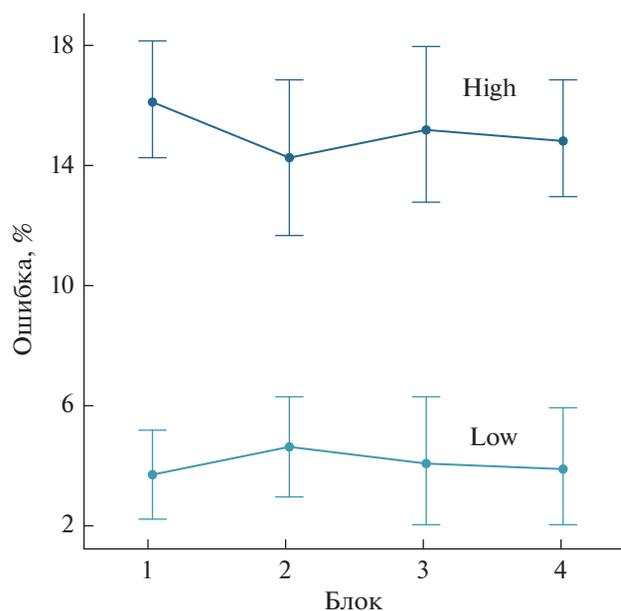


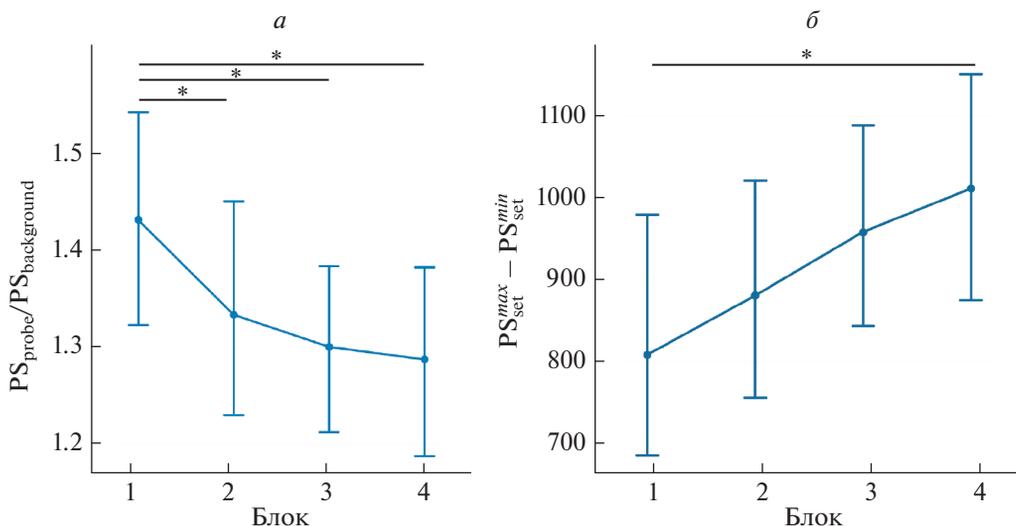
Рис. 2. Зависимость процента совершаемых ошибок от стадии эксперимента для высокой (High) и низкой (Low) сложностей.

Изменения в рассматриваемых поведенческих и физиологических характеристиках в ходе эксперимента оценивались с помощью дисперсионного анализа с повторными измерениями (RM ANOVA). Post-hoc анализ проводился с помощью парного выборочного *t*-теста с поправкой Холма для множественных сравнений; корреляция на групповом уровне между наблюдаемыми изменениями в субъективной оценке усталости и различными регистрируемыми физиологическими характеристиками была определена с помощью метода корреляции повторных мер (RM CORR) [11] в статистическом пакете Pingouin для Python.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведено исследование поведенческих характеристик испытуемых в процессе прохождения эксперимента. Обнаружено, что с течением эксперимента человек сильнее уставал (рис. 1), что было подтверждено с помощью RM-Anova с высокой достоверностью ( $p < 0.01$ ). Post-hoc анализ показал значимые различия между всеми фазами эксперимента ( $p < 0.01$ ).

Был проведен анализ процента совершаемых ошибок, с целью изучения их зависимости — от сложности и в течении эксперимента. В результате было выяснено, что в случае высокой сложности процент ошибок значительно выше, чем при решении задач низкой сложности ( $p < 0.0001$ ) (рис. 2). Однако статистически значимого изменения процента ошибок с ходом эксперимента обнаружено не было.



**Рис. 3.** Зависимость среднего размера зрачка, нормированного на средний размер зрачка во время записи фона, от стадии эксперимента (а). Зависимость амплитуды колебаний зрачка от стадии эксперимента (б). PS<sub>probe</sub> – средний размер зрачка во время демонстрации пробы; PS<sub>background</sub> – средний размер зрачка во время демонстрации фона; PS<sub>set</sub><sup>max</sup> – максимальный размер зрачка во время демонстрации набора букв; PS<sub>set</sub><sup>min</sup> – минимальный размер зрачка во время демонстрации набора букв; символом “\*” выделены статистически значимые различия между условиями в post-hoc анализе ( $p < 0.05$ ).

Анализ морганий показал, что все выделенные типы морганий различаются между собой. В тоже время, изменение количества морганий в течение эксперимента обнаружено только для длинных и средних морганий, а именно их количество в каждом блоке в течении эксперимента возросло ( $p < 0.05$ ).

Проведено изучение динамики зрачка, а именно изменение его среднего размера и амплитуды в течение эксперимента. Выявлено, что средний размер зрачка во время демонстрации пробы уменьшался в течении эксперимента ( $p < 0.05$ ). В тоже время, во время показа набора букв такой зависимости обнаружено не было. Обнаружено, что амплитуда колебаний зрачка во время демонстрации набора букв и пробы растет в течение эксперимента ( $p < 0.05$ , рис. 3).

Проведен анализ взаимосвязи рассматриваемых физиологических и поведенческих характеристик. Обнаружены статистически значимые корреляции субъективной усталости со следующими характеристиками: количеством коротких морганий ( $r = 0.3$ ), количеством средних морганий ( $r = 0.46$ ), количеством длинных морганий ( $r = 0.53$ ), средним размером зрачка во время демонстрации пробы ( $r = -0.54$ ), средним размером зрачка во время демонстрации набора букв ( $r = -0.35$ ), амплитудой колебаний размера зрачка во время демонстрации пробы ( $r = 0.52$ ), амплитудой колебаний размера зрачка во время демонстрации набора букв ( $r = 0.54$ ).

Полученные результаты хорошо согласуются с известными ранее. В частности, известно, что увеличение усталости сопровождается ростом амплитуды колебаний размера зрачка и ростом длительности моргания и соответственно увеличением количества длинных морганий [12].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были обнаружено, что продолжительная монотонная когнитивная нагрузка вызывает сильный рост субъективной усталости в ходе эксперимента, что сопровождается увеличением количества морганий средней и длинной длительности в ходе эксперимента. Показано, что количество совершаемых ошибок зависит от сложности задания. Обнаружено, что в течение эксперимента наблюдается уменьшение среднего размера зрачка во время демонстрации пробы и увеличение амплитуды колебаний зрачка, как во время демонстрации набора букв, так и пробы.

В дальнейшем планируется исследовать быстрые движения глаз (саккады) и фиксации зрачка, и провести поиск их взаимосвязей с уже полученными в данной статье результатами.

Работы по разработке методов и проведению нейрофизиологических экспериментов выполнены при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект № МК-2142.2022.1.2). Работы по анализу данных поддер-

жаны Российским научным фондом (проект № 21-72-10121).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hramov A.E., Maksimenko V.A., Pisarchik A.N. // Phys. Reports. 2021. V. 918. P. 1.
2. Maksimenko V., Khorev V., Grubov V. et al. // Proc. SPIE. 2020. V. 11459. Art. No. 1145903.
3. Badarin A.A., Antipov V.M., Grubov V.V. et al. // Comput. Biophys. Nanobiophoton. 2022. V. 12194. P. 142.
4. Бадарин А.А., Грубов В.В., Андреев А.В. и др. // Изв. вузов. Прикл. нелинейн. динам. 2022. Т. 30. № 1. С. 96.
5. Hessels R.S., Hooge I.T. // Dev. Cogn. Neurosci. 2019. V. 40. Art. No. 100710.
6. Schweitzer R., Rolfs M. // Sci. Adv. 2021. V. 7 Art. No. 30.
7. Bryc M., Murali S., Händel B. // Front. Psychol. 2021. V. 12. Art. No. 647256.
8. Poli F., Serino G., Mars R.B., Hunnius S. // Sci. Adv. 2020. V. 6. No. 39. Art. No. eabb5053.
9. Lee K.A., Hicks G., Nino-Murcia G. // Psychiatry Res. 1991. V. 36. No. 3. P. 291.
10. Klages J., Babilon S., Zandi B. et al. // Vision. 2021. V. 5. P. 21.
11. Bakdash J.Z., Marusich L.R. // Front. Psychol. 2017. V. 8. P. 456.
12. Zargari Marandi R., Madeleine P., Omland Ø. et al. // Sci. Reports. 2018. V. 8. Art. No. 13148.

### Analysis of cognitive load in the Sternberg problem: eye-tracker study

N. A. Brusinsky<sup>a,\*</sup>, A. A. Badarin<sup>a,b</sup>, A. V. Andreev<sup>a,b</sup>, V. M. Antipov<sup>a,b</sup>,  
S. A. Kurkin<sup>a,b</sup>, A. E. Hramov<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, Center for Neurotechnology and Machine Learning, Kaliningrad, 236041 Russia

<sup>b</sup>Innopolis University, Neuroscience and Cognitive Technology Laboratory, Innopolis, 420500 Russia

\*e-mail: nikita@brusinskii.ru

We studied physiological and behavioral characteristics of a person during prolonged solution of a cognitive task based on Sternberg paradigm. We found that evaluation of subjective fatigue and physiological characteristics such as blink duration and pupil size range of motion during the task solution are correlated to each other.