

Исследование решения когнитивных задач с учетом визуальной неопределенности

Е. Е. Котова¹, И. А. Писарев²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹eekotova@gmail.com, ²pisarevivan@yandex.ru

Аннотация. Точность принятия решений и время реакции являются определяющими характеристиками продуктивности интеллектуальной деятельности в любой профессиональной сфере. Особенность данных характеристик проявляется в современной информационно насыщенной электронной среде, в частности в учебной, научной деятельности, в которой присутствует информационный контент, характеризующийся визуальной неопределенностью. Следствием наличия визуальной неопределенности в информационных стимулах является увеличение когнитивной нагрузки, что может привести к ошибкам восприятия, обработки информации и принятия решений человеком. В докладе предложен метод автоматизированного анализа точности и времени решения тестовых когнитивных задач в условиях визуальной неопределенности представления информации. Метод основан на применении вычислительной теории сложности, в частности на оценке количества алгоритмической энтропии А.Н. Колмогорова в представлении визуальной информации. Приводятся результаты исследований на примерах решения когнитивных задачах в автоматизированной среде с применением интеллектуальных агентов.

Ключевые слова: визуальная неопределенность, продуктивность интеллектуальной деятельности, когнитивная нагрузка, электронная среда, алгоритмическая энтропия

I. ВВЕДЕНИЕ

В современных информационных системах (ИС) применяются мультимодальные формы взаимодействия человека и компьютера (Human-Computer Interaction, HCI). Информация представляется в различных форматах и модальностях, преимущественно в виде графических изображений, текстов, видео. Отдельную задачу представляет исследование количественных показателей эффективности ИС, направленное на анализ и совершенствование процессов автоматизированной обработки данных и принятия решений человеком в информационно насыщенной среде.

Исследования когнитивных стилей и их влияния на производительность пользователей человеко-машинных систем (ЧМС) – точности принятия решений (accuracy, A), времени реакции (reaction time, RT) представлено в трудах отечественных и зарубежных ученых: В.П. Зинченко, Д.А. Леонтьева, А.В. Либина, М.А. Холодной, Дж. Р. Струпа, П. Фиттса, У. Хика и др. В настоящее время

влияние когнитивных процессов на восприятие информации продолжено в исследованиях когнитивной нагрузки.

За последние десятилетия получены подтверждения наличия связи между персональным перцептивно-когнитивным потенциалом человека при восприятии информации и скоростью обработки элементарных когнитивных задач (elementary cognitive task, ECT) [1, 2]. Однако, вопросы анализа производительности решения последовательностей когнитивных задач (Serial Reaction Time, SRT) с комплексными стимулами в условиях визуальной неопределенности когнитивной нагрузки исследованы недостаточно [3].

В докладе представлен метод автоматизированного анализа производительности (продуктивности) решения серии когнитивных задач выбора со сложной моделью стимулов в условиях визуальной неопределенности.

Метод предполагает подтверждение существования количественной зависимости времени и точности выполнения SRT от факторов когнитивных стилей – «импульсивности-рефлексивности» [4, 5] и когнитивной нагрузки, вычисляемой на основе теоретико-информационного подхода и меры алгоритмической энтропии А.Н. Колмогорова.

II. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ РЕШЕНИЙ КОГНИТИВНЫХ ЗАДАЧ

Метод основан на проведение автоматизированного анализа индивидуальных когнитивных характеристик обучающихся, показателей решения тестовых когнитивных задач (точности и времени решения) в условиях визуальной неопределенности.

A. Оценка визуальной неопределенности стимулов и времени реакции выбора

Элементарные когнитивные задачи и оценка визуальной неопределенности элементарных стимулов при выборе решения на основе теоретико-информационного подхода К. Шеннона впервые были исследованы и представлены британским психологом У. Хиком (W.E. Hick) в статье в 1952 году (известна как закон Хика, [6]), где ученый представил данные исследований времени реакции и скорости решения задач в проведенных экспериментах. Значение статьи в научном сообществе подтверждается тем фактом, что статья занимает третье место по цитируемости в истории журнала QJEP [7].

Исследования времени реакции выбора при наличии некоторого числа альтернатив стимула-реакции (или степени неопределенности) в задачах приобретает особую актуальность ввиду все большей перенасыщенности информационных ресурсов в различных сферах учебной и профессиональной деятельности. Закон Хика упоминается во многих исследованиях. Время реакции RT при выборе линейно зависит от количества информационной энтропии, которая вычисляется с использованием двоичного логарифма количества равновероятных вариантов ответов [1, 8–10].

$$T = mH \quad (1)$$

$$H = \log_2(N + 1),$$

где T – время реакции, H – информационная энтропия, m – коэффициент пропорциональности, N – число вариантов ответов.

В случае различных вероятностей для i -х альтернатив выбора применяется формула К. Шеннона:

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i, \quad (2)$$

где p_i – вероятность i -й альтернативы выбора.

Применение представленного выше подхода на основе меры информационной энтропии К. Шеннона ограничено случаями элементарных когнитивных задач. Для анализа когнитивных задач с комплексными визуальными стимулами, представленными в компьютере в виде текстов, графиков, изображений, предлагается использовать оценку количества алгоритмической энтропии А.Н. Колмогорова [11], которая заключается в оценке минимальной длины программы, описывающей эту информацию.

В. Оценка времени выполнения действий человеком при реализации выбора

После этапа выбора, лицо, принимающее решение (ЛПР) осуществляет активные действия по реализации принятого решения. Наряду с командами выбора, например, формируемыми голосом, операции выбора, осуществляются с помощью кнопок «мыши» или клавиатуры компьютера. В ряде исследований времени выбора, в отличие от подхода в нашем докладе, применяются методики регистрации движения глаз человека [12–14].

Время движения T_m , необходимое для осуществления человеком действий по перемещению к области выбора при помощи «мыши» компьютера, рассматривается в виде линейной зависимости от индекса сложности ID , логарифма отношения видимого на экране расстояния до цели D к ее ширине W , как было показано Дж. Фиттсом в предиктивной модели взаимодействия человека и машины HCI [15, 16]:

$$T_m = a + b ID$$

$$T_m = a + b \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right), \quad (3)$$

где a, b – коэффициенты регрессии.

С. Оценка времени анализа текстов

При выполнении контрольных тестов у студентов могут возникать трудности при поиске ответов, что выражается в увеличении времени реакции и снижении точности. В моделях, основанных на теоретико-информационном подходе, затраты времени на лексический, синтаксический и семантический анализ предложений текста объясняются с помощью критериев оценки собственной информации слов, условной и совместной энтропии [17–20].

При предсказании времени анализа текстов используется модель (1). Энтропия H вычисляется для каждой задачи теста как количество собственной информации слов, представленных в словаре терминов из области знаний по дисциплине. Собственная информация слова W_{i+1} определяется с учетом условной вероятности встречаемости слов в контексте предложения W_i .

$$H_s(W_{i+1}) = -\log_2(p(W_{i+1} | W_i)) \quad (4)$$

Отмеченные способы оценки времени реакции и реализации выбора применены при исследовании серии когнитивных задач.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Учебный материал, представленный в графическом или текстовом виде, вызывает активацию вербального и визуального каналов восприятия информации. Влияние этих двух типов модальности представляемой информации не совпадают как по уровню когнитивной нагрузки, так и по уровню индивидуальных различий когнитивно-стилевого потенциала обучающихся. Поэтому их следует изучать раздельно. Далее представим наши исследования в задачах графического и текстового формата.

А. Исследование серии когнитивных задач графического формата в тесте Дж. Кагана

Гипотеза исследования. В задачах графического формата время выбора решения зависит от фактора алгоритмической энтропии предъявляемых стимулов.

Процедура исследования. Исследование проводится в компьютерной версии модифицированного теста «Сравнение сходных фигур» Дж. Кагана (MFFT) [4], включает 12 задач, в каждой из которых необходимо принять решение, выбрать одно из 8 изображений, которое полностью соответствует изображению предъявленной фигуры-эталона [21]. В тестировании принимали участие 87 студентов факультета компьютерных технологий и информатики. Кроме времени первого ответа и числа ошибок при выборе, что изначально предложено автором методики Дж. Каганом для диагностирования параметра когнитивного стиля «импульсивность-рефлексивность», в компьютерной версии вычисляются дополнительные параметры. Общее время решения задач не

ограничивается, но фиксируется таймером. Результаты тестирования изображены на рис. 1. По оси абсцисс указано среднее время первого ответа. По оси ординат показано среднее число ошибок.

По результатам выполнения методики в результате применения модели классификатора студенты классифицированы на 4 подкласса (рис. 1):

1. «быстрый и неточный» (верхний левый квадрант), 24.1 %;
2. «медленный и точный» (нижний правый квадрант), 57.5 %;
3. «быстрый и точный» (нижний левый квадрант), или импульсивный (I), 11.5 %;
4. «медленный и неточный» (верхний правый квадрант), или рефлексивный (R), 6.9 %.

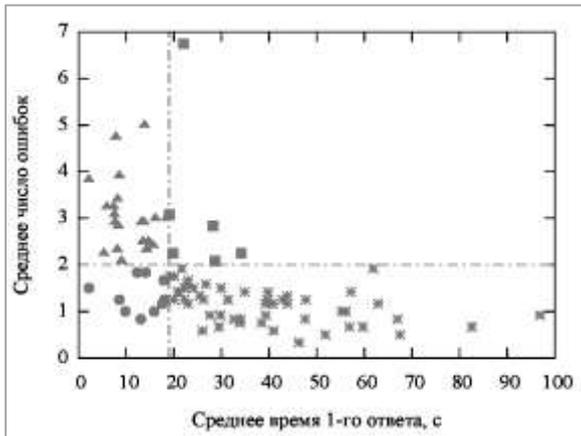


Рис. 1. Результаты классификации рефлексивных и импульсивных студентов

Определяется группа студентов подкласса 3, быстро и точно выполняющих задания. Это 11.5 % всей выборки. Для остальной группы обучающихся необходимо провести дальнейшее исследование по решению отдельных задач. Анализ среднего времени решения задач (рис. 2) в двух группах студентов гуманитарного и технического профиля обучения показал наличие заметных отклонений от среднего значения, например, в задачах № 4, 5, 7, 8.

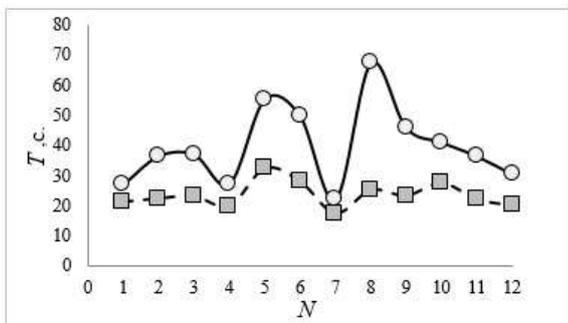


Рис. 2. Среднее время решения серии задач теста Дж. Кагана для двух групп студентов (квадратные символы – группа технического профиля обучения, круглые символы – группа гуманитарного профиля обучения)

Из графика визуально заметно, что группе испытуемых, которые относятся к гуманитарному профилю обучения, требуется большее время для решения задач, что не противоречит полученным ранее результатам различий когнитивно-стилевого потенциала [21]. Для дальнейшего анализа проявившихся отклонений времени решения задач интерес представляет группа испытуемых гуманитарного профиля обучения.

Для объяснения полученных данных на рис. 2 можно применить модель (1). Однако, модель (1) не учитывает, что во всех заданиях принято одинаковое число выборов для принятия решений. Поскольку число вариантов выбора во всех 12 задачах постоянно и равно 8, то необходимо применить другие способы оценки количества информационной энтропии изображений. Рассмотрим два способа.

1 способ. Оценка энтропии по формуле К. Шеннона (2). При оценке по формуле Шеннона среднего количества информации, приходящегося на один пиксель изображения, используется метод вычисления частот двоичных последовательностей кодировки на основе гистограммы интенсивностей символов источника [22].

2 способ. Оценка алгоритмической энтропии по методу А.Н. Колмогорова. В качестве алгоритмической меры энтропии изображения используется длина описания этого изображения на языке масштабируемой векторной графики (Scalable Vector Graphics, SVG) [23], сжатого при помощи универсального алгоритма сжатия данных Лемпеля-Зива-Уэлча (Lempel-Ziv-Welch, LZW).

Элементами языка SVG являются, например, команды рисования фигур: прямоугольник (rectangle), окружность (circle), эллипс (ellipse), полигон (polygon), линия (line), атрибуты которых задают координаты, толщину линий и др. Результаты, известные из исследований, показывают, что при обработке зрительной информации используются структуры, меры сложности которых сильно коррелированы с показателями эффективности их обработки человеком [24]. Далее определяется корреляции между величинами энтропии каждого задания из 12 и временем решения (рассчитываются коэффициенты Пирсона).

По способу 1 получена слабая корреляция, $r=0.35$. По способу 2 получена сильная корреляция: наибольшая корреляционная связь времени решения задач установлена с размерами изображений в SVG формате, $r=0.883$, и с размерами SVG-изображений, сжатыми при помощи алгоритма LZW, $r=0.896$.

Для серии из 12 задач построена кумулятивная зависимость (рис. 3) времени решения (T_c) задач от энтропии (H_k). На графике окружностями показаны значения времени, полученные в группе студентов, квадратами отмечены значения времени, реконструированные по модели (1). Полученная линейная регрессия характеризуется значением коэффициента $m=1.5$ (с/Кб) при коэффициенте детерминации $R^2=0.999$, значимом по критерию Фишера.

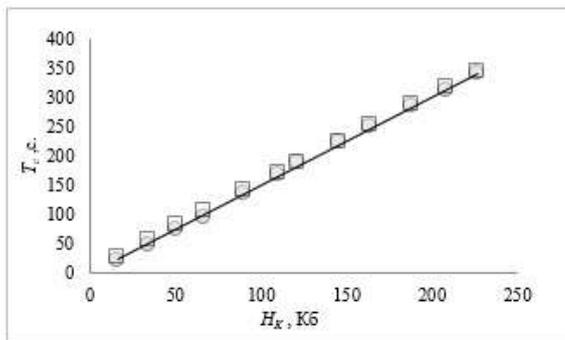


Рис. 3. Кумулятивная зависимость времени решения серии задач теста Дж. Кагана от энтропии и реконструкция времени по регрессионной модели (линия)

Полученный коэффициент детерминации подтверждает гипотезу о зависимости времени выбора решений от фактора алгоритмической энтропии предъявляемых графических стимулов.

В. Исследование серии когнитивных задач текстового формата в тесте Дж.Р. Струпа

Гипотеза исследования. Время выбора зависит от фактора алгоритмической энтропии предъявляемых стимулов в задачах текстового формата и от фактора активности выбора.

Процедура исследования. Исследование проводится в компьютерной версии модифицированного теста Дж.Р. Струпа «Словесно-цифровая интерференция» [25]. Первая серия заданий представлена последовательностью из 100 слов, обозначающих определенный цвет. Испытуемому необходимо в меню выбора отметить предъявляемое слово, соответственно обозначающее цвет. Слова представлены в виде таблицы из 10 строк и 10 столбцов. Под таблицей располагается меню выбора с четырьмя образцами слов. Время выполнения не ограничено, но фиксируется таймером. В эксперименте принимали участие 120 студентов факультета компьютерных технологий и информатики. На основе мониторинга данных времени выполнения теста и числа совершенных ошибок определены средние значения и стандартные отклонения по каждой из 100 задач. Построена регрессионная модель, основанная на факторах алгоритмической энтропии изображений стимулов H_K (1) и индекса сложности движения выбора ID (3) (фактор активности выбора). Определены значения факторов и рассчитаны значения коэффициентов регрессионной модели $b=0.18475301$ (ID) и $m=0.18$ (H_K):

$$T = mH + b ID$$

На рис. 4 изображено среднее время решения серии задач Струпа. Корреляция между реконструированной по регрессионной модели и экспериментально полученной кумулятивной зависимостью времени решения 1-й серии задач Струпа составила $r=0.999$, что подтверждает гипотезу.

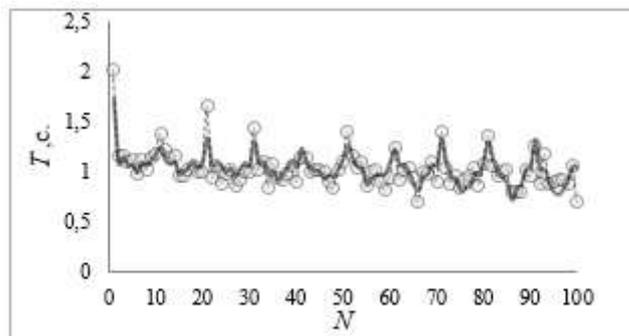


Рис. 4. Среднее время решения 1-й серии задач теста Струпа (точки) и реконструкция времени по регрессионной модели (линия)

С. Исследование серии когнитивных задач при проверке знаний в среде СДО Moodle

Процедура исследования. В контрольном тесте на проверку знаний по дисциплине «Инженерия знаний» в системе дистанционного обучения (СДО) Moodle принимали участие 63 студента. Тест представляет собой серию из 23 когнитивных задач, в каждой из которых задан вопрос и 4 варианта ответов. Продолжительность времени выполнения теста ограничена 15 минутами. Время ответов фиксируется таймером. Результаты теста оцениваются по количеству правильных ответов и времени выполнения.

В отличие от тестов Дж. Кагана и Дж.Р. Струпа, в которых когнитивная обработка ограничивалась сопоставлением эталонов с образцами, в контрольном тесте необходим учет дополнительного фактора, связанного с понятийной организацией предметной области, или обработкой смысла, передаваемого с помощью в среднем 20 слов в каждой задаче. По результатам тестирования рассчитывается среднее время решения задач. Получено среднее время ответов по группе $T_{cp.} = 30.2$ с.

Для объяснения полученного $T_{cp.}$ применена модель, основанная на факторах алгоритмической энтропии изображений стимулов H_K (1), индекса сложности движения выбора ID (3) и поиска ответа из предметной области знаний H_s .

Предварительно формируется понятийная база знаний, из которой составляется словарь контрольного теста. Фрагмент (пример) облака тегов словаря контрольного теста изображен на рис. 5. Модель понятийной базы знаний предметной области формируется экспертами в программном комплексе ОнтоПроект-Тезаурус [26].

Оцениваются значения факторов H_K , ID , H_s в регрессионной модели:

$$T = mH_K + b ID + zH_s \quad (5)$$

Для 1 задачи получены средние значения энтропии $H_K = 44.92$ (Кб), идентификатора сложности $ID = 2.246$ (бит). Значения коэффициентов m и b в регрессионной

модели взяты из методики исследования теста Струпа: $b=0.185, m=0.18$.

база, взаимосвязь, вывод, данные, знание, идентификатор, информация, класс, концептуализация, концепция, лексико, метод, моделирование, модель, наименование, область, объект, онтология, описание, отношение, поиск, представление, принцип, пространство, прототип, ресурс, решение, свойство, словарь, слово, создание, спецификация, сущность, тезаурус, уровень, цель, часть, язык,

Рис. 5. Фрагмент облака тегов словаря контрольного теста

В соответствии с факторами модельное время визуального восприятия условия одной задачи (5) составило в среднем $mH_K = 8.1$, а время перехода к следующей задаче $bID = 0.5$ с. Часть остального времени (21.6 с.) объясняется далее на основе фактора H_s . Значение фактора рассчитано в виде суммы значений собственной информации слов в задании к тесту (4): $H_s = 79.88$ (бит). При расчете собственной информации используются частоты слов из корпуса текстов учебной литературы и лекций по дисциплине. Если предположить, что студент не знаком с терминологией, то времени на ментальную обработку будет потрачено гораздо больше. Оценка модельного времени на основе фактора H_s и приблизительного значения коэффициента $z=0.04$ (с/бит) [27] составляет $zH_s = 3.2$ с.

$$\theta = T - mH_K - bID - zH_s \quad (6)$$

Таким образом, при расчете по формуле (6) получено оставшееся время $\theta = 18.4$ с. – неучтенное время случайных действий, что является вполне естественным при выполнении любых контрольных тестов обучающимися, и представляет отдельный вопрос для исследования.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод автоматизированного анализа продуктивности решения серий когнитивных задач выбора, подтверждает существование количественной зависимости времени и точности выполнения SRT от факторов когнитивных стилей – «импульсивности-рефлексивности» и когнитивной нагрузки, вычисляемой на основе теоретико-информационного подхода и меры алгоритмической энтропии А.Н. Колмогорова.

В каждом исследовании добавляются факторы. 1 исследование – фактор алгоритмической энтропии, 2 – индекс сложности движения, 3 – дополнительный третий фактор количества энтропии модели понятийной организации предметной области (освоенных знаний)

человеком. Важно заметить, что третий фактор применяется при условии достижения понятийной согласованности (в нашем случае – минимально достигнутого уровня знаний, которым обладает обучающийся после изучения какой-либо дисциплины).

Метод реализован в программе «Эксперт-Аналитик ART» при помощи интеллектуальных программных агентов [21]. Полученные результаты подтверждают применимость закона Дж. Хика к предсказанию времени решения серии задач со сложной моделью стимулов, отличающихся визуальной неопределенностью. Дальнейшие исследования предполагается расширить включением интерференции в задачи выбора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Wu T., Dufford A. J., Egan L. J., Mackie M. A., et al. Hick-Hyman law is mediated by the cognitive control network in the brain. *Cerebral Cortex*. 2018. V. 28. No. 7. Pp. 2267-2282.
- [2] Bakaev M., Goltsova E., Khvorostov V., Razumnikova O. Data Compression Algorithms in Analysis of UI Layouts Visual Complexity // International Andrei Ershov Memorial Conference on Perspectives of System Informatics. Springer, Cham, 2019. Pp. 167-184.
- [3] Frank S.L. Uncertainty reduction as a measure of cognitive load in sentence comprehension. *Topics in cognitive science*. 2013. V. 5. No. 3. Pp. 475-494.
- [4] Kagan J. Reflection-impulsivity: The generality and dynamics of conceptual tempo // *Journal of abnormal psychology*. 1966. V. 71. No. 1. Pp. 17-24.
- [5] Nisa N.A., Setiyadi B., Huzairin H. The Comparative Study between Reflectivity and Impulsivity Cognitive Style in Using Learning Strategy in Reading and Reading Comprehension // *U-JET*. 2018. V. 7. No. 3. Pp.1-62.
- [6] Hick W.E. On the rate of gain of information // *Quarterly Journal of experimental psychology*. 1952. vol. 4. no. 1. Pp. 11-26. Hick W. E. On the rate of gain of information // *Quarterly Journal of experimental psychology*. 1952. V. 4. No. 1. Pp. 11-26.
- [7] Brysbaert M. Editorial QJEP classics revisited // *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 2016. V.69. Pp. 1861-1863.
- [8] Hyman R. Stimulus information as a determinant of reaction time // *Journal of experimental psychology*. 1953. VI. 45. No. 3. Pp. 188. doi:10.1037/h0056940
- [9] Jamieson R.K., Mewhort D.J.K. Applying an exemplar model to the serial reaction-time task: Anticipating from experience // *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 2009. V. 62. No. 9. Pp. 1757-1783.
- [10] Rammsayer T.H., Pahud O., Troche S.J. Decomposing the functional relationship between speed of information processing in the Hick paradigm and mental ability: A fixed-lisks modeling approach // *Personality and individual differences*. 2017. V. 118. Pp. 17-21.
- [11] Kolmogorov A.N. Three approaches to the quantitative definition of information // *International journal of computer mathematics*. 1968. V. 2. No. 1-4. Pp. 157-168.
- [12] Duchowski A.T. Gaze-based interaction: A 30 year retrospective // *Computers & Graphics*. 2018. V. 73. Pp. 59-69.
- [13] Kangasraasio A., Jokinen J. P., Oulasvirta A., et al. Parameter inference for computational cognitive models with Approximate Bayesian Computation // *Cognitive Science*. 2019. V. 43. N. 6. 40 p.
- [14] Choe M., Choi, Y., Park, J., & Kim, H. K. Comparison of gaze cursor input methods for virtual reality devices // *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2019. V. 35. No. 7. Pp. 620-629.
- [15] Fitts P.M. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement // *Journal of experimental psychology*. 1954. V. 47. No. 6. Pp. 381-391. doi:10.1037/h0055392
- [16] Soukoreff R.W., Zhao J., Ren X. The entropy of a rapid aimed movement: Fitts' index of difficulty versus Shannon's entropy // *IFIP*

- Conference on Human-Computer Interaction. Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. Pp. 222-239.
- [17] Futrell R., Gibson E., Levy R.P. Lossy-context surprisal: An information-theoretic model of memory effects in sentence processing // *Cognitive science*. 2020. V. 44. No. 3. Pp. 1-54.
- [18] Frank S.L., Monsalve I.F., Thompson R.L., Vigliocco G. The ERP response to the amount of information conveyed by words in sentences // *Brain and language*. 2015. V. 140. Pp. 1-11.
- [19] Pavao R., Savietto J.P., Sato J.R., Xavier G.F., Helene A.F. On sequence learning models: Open-loop control not strictly guided by Hick's law // *Scientific reports*. 2016. V. 6. No. 1. Pp. 1-9.
- [20] Smith N.J., Levy R. The effect of word predictability on reading time is logarithmic // *Cognition*. 2013. V. 128. No. 3. Pp. 302-319.
- [21] Котова Е.Е., Писарев А.С. Программа интеллектуального анализа продуктивности решения когнитивных задач в электронной среде (Эксперт-Аналитик ART). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667345 от 22.12.2020.
- [22] Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MatLab. М.: Техносфера. 2006. 616 с.
- [23] Larsen R. Mastering SVG. Packt Publishing. 2018. 312 p.
- [24] Wagemans J., Feldman J., Gepshtein S., Kimchi R., Pomerantz J.R., Van der Helm P.A., Van Leeuwen C. A century of Gestalt psychology in visual perception: II. Conceptual and theoretical foundations // *Psychological bulletin*. 2012. V. 138. No. 6. Pp. 1218.
- [25] Stroop J.R. Studies of interference in serial verbal reactions // *J. of Exper. Psychology*. 1935. V. 18. Pp. 643-662.
- [26] Котова Е.Е., Писарев И.А. Программно-инструментальная среда разработки динамических тезаурусов областей знаний ОнтоМАСТЕР-Тезаурус. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018611109 от 24.01. 2018 г.
- [27] Nolte D.D. Mind at light speed: A new kind of intelligence. Simon and Schuster. 2001. Pp.1-293