

Возможности кратковременной зрительно-пространственной памяти разных возрастных групп с точки зрения обработки информации

Е.А. Гольцова^а, М.А. Бакаев^а, О.М. Разумникова^{а,б}

^а Новосибирский государственный технический университет, 630073, пр. К. Маркса, 20, Новосибирск, Россия

^б НИИ физиологии и фундаментальной медицины, 630117, ул. Тимакова, 4, Новосибирск, Россия

Аннотация

Статья посвящена изучению возможностей человека по обработке информации – в частности, при задействовании зрительно-пространственной памяти у лиц молодого и пожилого возраста. Предлагаемый метод основывается на известном законе Фиттса, но в ходе анализа мы предлагаем собственные формулировки индекса сложности задачи и производительности (пропускной способности) человека как информационного канала (ТРМ). Анализ данных экспериментального исследования, проведённого с 90 участниками различных возрастных групп, показал, что при запоминании и воспроизведении объектов молодые пользователи достигают производительности в два раза более высокой, чем пожилые. Также предложена регрессионная модель для ТРМ в зависимости от фактора возраста, причём дополнительный год возраста участников снижал производительность работы зрительно-пространственной памяти приблизительно на 1%.

Ключевые слова: человеко-компьютерное взаимодействие; кратковременная память; индекс сложности; закон Фиттса; производительность; сложность интерфейса

1. Введение

Операторы-люди остаются неотъемлемой частью большинства систем управления, получая, обрабатывая и выдавая информацию аналогично другим компонентам систем. Хотя известен ряд широко признаваемых достоинств людей по сравнению с машинами, таких как целостность, адаптивность и возможность к саморазвитию, в то же время участие человека остаётся отчасти ограничивающим фактором в процессах автоматизации. Представляется, что основная причина этого – не решённая проблема организации оптимального взаимодействия между человеком и компьютером. В частности, когнитивный аспект в ЧКВ остаётся менее изученным по сравнению с физическим (эргономическим), поскольку полное понимание работы человеческого мозга пока не достигнуто. Следовательно необходимо развитие теорий, описывающих как именно люди осуществляют обработку информации, каковы их производительность и ограничения при этом.

Известно, что объём рабочей памяти и скорость восприятия объектов, отражая способности временного хранения и манипуляций с информацией для организации целенаправленного действия, представляют важные компоненты интеллекта, который в свою очередь рассматривается как психометрический показатель успешности адаптации [1]. Одним из компонентов рабочей памяти является контур обработки зрительно-пространственной информации [2], представленный широко распределенной нейронной системой, в которой ключевой структурой является гиппокамп, в первую очередь повреждающийся при старении или функциональной гипоксии мозга. Для активации компенсаторных ресурсов мозга и профилактики ослабления памяти в последнее время активно используются компьютеризированные программы тренировки когнитивных функций [3]. Несмотря на ряд критических замечаний относительно эффективности таких программ применительно к ежедневной деятельности, в ходе многочисленных исследований получены убедительные доказательства повышения скорости ментальных процессов и улучшения памяти вследствие формирования новых функциональных нейронных сетей мозга в результате тренировки.

Оценка потенциального диапазона ресурсов кратковременной зрительно-пространственной памяти важна не только для направленной коррекции ее возрастных нарушений, но и для эффективной операторской деятельности в условиях нарастающей информационной емкости программных продуктов. Это указывает на перспективность изучения параметров предъявления аллоцентрической информации для оптимизации зрительно-пространственных процессов ее обработки с учетом индивидуально комфортных или предельно возможных временных параметров безошибочных действий в системе человек-компьютер. В связи с этим целью нашей работы стала оценка обусловленных возрастом различий при выполнении задач, требующих использования кратковременной зрительно-пространственной памяти. Предложенный нами метод исследования основывается на хорошо известном законе Фиттса, который описывает психомоторный уровень поведения (соответствующий физическому и когнитивному аспектам взаимодействия).

2. Методы исследования

2.1. Закон Фиттса

Закон Фиттса, фактически, проводит аналогию между выполнением человеком быстрых прицельных движения и передачей информации в электронной системе и базируется на 17-й теореме Шеннона (также называемой теоремой Шеннона-Хартли), постулирующей, что ёмкость канала C равна разнице между энтропиями сигнала и шума:

$$C = H_S - H_N = B \log_2((S + N)/N) = B \log_2(S/N + 1), \quad (1)$$

где C – ёмкость канала, означающая теоретическую верхнюю границу скорости передачи данных (бит в секунду),

H_S – энтропия сигнала,

H_N – энтропия шума,

B – полоса пропускания канала (в герцах),

S – мощность сигнала (в ваттах),

N – мощность белого гауссовского шума (в ваттах).

Фиттс предложил измерять сложность совершаемого человеком движения в битах, а сам человек (точнее, его нервная система), таким образом, выступает аналогом канала, выполняющего передачу данных. Далее, он предположил, что электронный сигнал аналогичен расстоянию, на которое производится движение (A), а шум – допустимому отклонению или размеру региона (W), в пределах которого движение должно быть завершено и задан индекс сложности (ID) движения. Впоследствии было показано [4], что наиболее предпочтительной формулировкой индекса сложности является вид:

$$ID = \log_2((A + W)/W) = \log_2(A/W + 1) \quad (2)$$

По аналогии с ёмкостью канала, передающего электронный сигнал, Фиттс стремился получить возможность вычисления «ёмкости» двигательной системы человека и в качестве её показателя ввёл индекс производительности (IP), равный отношению индекса сложности движения ко времени, затраченному на его выполнение (MT):

$$IP = ID / MT \quad (3)$$

Нетрудно заметить, что выражение (3) аналогично (1), причем IP соответствует C , а MT – величина, обратная B . В экспериментальных исследованиях A и W выступают в качестве независимых переменных, а MT является зависимой. Тогда возможно построение зависимости MT от ID при помощи регрессии, где a и b – регрессионные коэффициенты:

$$MT = a + b * ID = a + b \log_2(A/W + 1) \quad (4)$$

Индекс производительности (IP), введенный Фиттсом (3), в настоящее время часто называют просто производительностью (англ. throughput) и обозначают как TP . Индекс рассчитывается как усредненная производительность каждого из K участников, которая, в свою очередь, вычисляется как среднее значение отношения эффективного индекса сложности (учитывающего точность выполнения движений, см. [5]) к затраченному на движение время (MT), для каждого из M возможных сочетаний значений независимых переменных (A и W):

$$TP = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left(\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{ID_{eij}}{MT_{ij}} \right) \quad (5)$$

Рассчитанная с использованием «эффективного» индекса сложности производительность является объективной и полной мерой для заданных условий эксперимента, учитывающей как скорость, так и точность выполнения движения. На практике было показано [6], что TP не изменяется в зависимости от того, делают ли участники эксперимента сознательный акцент на скорости или на точности.

2.2. Индекс сложности и производительность в других задачах

На практике коэффициенты детерминации (R^2), получаемые для регрессий (4), как правило, превышают 0,9, причем применимость закона Фиттса была продемонстрирована на широком диапазоне условий – при совершении движений пальцами, руками, головой, глазами, и даже под водой [7]. Неудивительно, что интерес исследователей к этой закономерности не ослабевает, в том числе касательно применения закона Фиттса в сфере информационных технологий [8]. Кроме того, вообще способ определения производительности выполнения некоторых заданий пользователем как соотношение сложности задания к затратам времени на его выполнение, заслуживает особого рассмотрения.

Так, в известном законе Хика, описывающем время реакции (RT) при выборе из нескольких (N) возможных альтернатив, производительности соответствует скорость переработки информации (i):

$$i \sim \log_2(N + 1) / RT \quad (6)$$

При этом помимо теоретического обоснования, критерием удачности формулировки индекса сложности является величина значения R^2 в соответствующем уравнении регрессии. В одной из наших предыдущих работ [9] мы рассматривали задачи по выбору (визуальному поиску) объектов и предложили несколько вариантов индекса сложности таких задач (IDS), остановившись в итоге на том, для которого R^2 оказался наивысшим:

$$IDS = N * \log(V), \quad (7)$$

где V – размер «словаря», из которого выбираются отображаемые объекты (показатель их разнообразия).

Что касается производительности, то её значения обычно варьируются в диапазоне от единиц до десятков бит/с, который соответствует когнитивным возможностям человека по обработке информации. Так, ТР Фиттса для задач по движению обычно находится в пределах от 2 до 10 бит/с в зависимости от используемого интерфейсного устройства (для компьютерной мыши – около 5 бит/с). Существует мнение, что верхний предел скорости сознательной обработки информации у человека составляет около 10^2 бит/с, хотя нервная система может обрабатывать до 10^9 бит/с подсознательно (этот факт, вероятно, является основой для популярной идеи об огромных скрытых резервах человеческого мозга). Эта скорость может быть увеличена до определённой степени посредством использования многомерных сигналов вместо простых одномерных, – например, тон и громкость вместо просто громкости, или же размер, яркость и цвет вместо лишь одного изменяемого визуального стимула, – но эффект не является аддитивным. В целом можно предположить, что чем в большей степени задача требует задействования «высокоуровневых» когнитивных способностей человека, тем более высокое значение производительности достигается. Так, в нашем экспериментальном исследовании [9] при выборе из словаря размера $V=2$ достигалась производительность $TPS=41,9$ бит/с, а из словаря $V=29$ – уже $TPS=77,6$ бит/с.

Известно, что ряд факторов может существенно влиять на производительность для различных категорий пользователей. Так, фактором, повышающим скорость обработки информации, является тренировка, которая в частности и позволяет опытным операторам воспринимать информацию на более высоком уровне, имея возможность обрабатывать меньшее количество единиц информации. Например, в то время как пилотам-новичкам приходится проверять каждое из показаний приборов индивидуально, опытным требуется лишь общий взгляд на приборную панель, чтобы понять, всё ли в порядке с объектом управления (летательным аппаратом). Напротив, возраст является фактором, как правило, снижающим скорость обработки информации: так, в моделях, полученных в [9], каждый дополнительный год возраста уменьшал производительность в задачах по движению на 0,54%, а в задачах по выбору объектов – на 0,71%.

3. Экспериментальное исследование

Для решения поставленной задачи определения возрастных особенностей в эффективности запоминания зрительных стимулов с учетом их количества и пространственного расположения, мы провели экспериментальное исследование с молодыми и пожилыми участниками.

3.1. Участники эксперимента

В исследовании приняли участие 30 молодых людей (3 мужчины и 27 женщин), средний возраст которых составил 19 лет (диапазон от 17 до 21 года) и 60 пожилых (6 мужчин и 54 женщины), средний возраст 63 года (диапазон от 56 до 72 лет). Уровень образования между группами достоверно не различался. Молодые участники являлись студентами Новосибирского государственного технического университета, пожилые участники обучались в этом же университете на курсах компьютерной грамотности Народного факультета.

3.2. План эксперимента и процедура проведения

На первом этапе эксперимента участникам на сенсорном экране монитора, с дисплеем площадью 38,10 см., была представлена инструкция, после прочтения которой, в порядке возрастания сложности, было запущено специально разработанное экспериментальное программное обеспечение. Перед участниками была представлена матрица 4x4 на первом уровне сложности, 5x5 – на втором и 6x6 – на третьем уровне сложности эксперимента. Каждое испытание начиналось, когда участник оповещал систему о готовности, путем нажатия кнопки на экране, после чего в матрице в течение 1 секунды появлялись стимулы: окрашенные зеленые клетки (Рис. 1). За это время участник эксперимента должен был запомнить расположение закрасенных квадратов, количество которых зависело от итерации и уровня эксперимента. Сразу после исчезновения стимулов участники должны были отметить места, где появлялись целевые стимулы. Правильно отмеченные клетки становились зелеными, неверно отмеченные – красными (Рис. 2). Количество правильных ответов и ошибок, а также общее время ответов сохранялось в базе данных. Количество закрасенных клеток увеличивалось последовательно, начиная с 3 до 8 на первом уровне сложности задач (на поле 4x4), с 3 до 12 на втором уровне (поле 5x5), и от 3 до 15 на третьем уровне (поле 6x6) сложности задачи. Расположение закрасенных клеток генерировалось случайным образом.

Таким образом, независимыми переменными в нашем эксперименте были возраст участника, размер поля, количество закрасенных клеток и количество шагов в сессии; зависимыми – время выполнения задачи (T) и процент ошибочных указаний клеток (E).

3.3. Анализ данных и результаты

Для начала был определен индекс сложности (IDM) для всех трёх уровней эксперимента. Мы воспользовались следующей формулой:

$$IDM = \log_2(N_{эк.сп} * N_{общ}), \quad (8)$$

где $N_{\text{эк.ср}}$ – среднее количество закрашенных клеток на уровне сложности;
 $N_{\text{общ}}$ – «обобщенное» количество клеток для уровня сложности, рассчитываемое как произведение количества клеток в поле на каждом шаге (16, 25, 36) на количество итераций на данном уровне сложности (k).

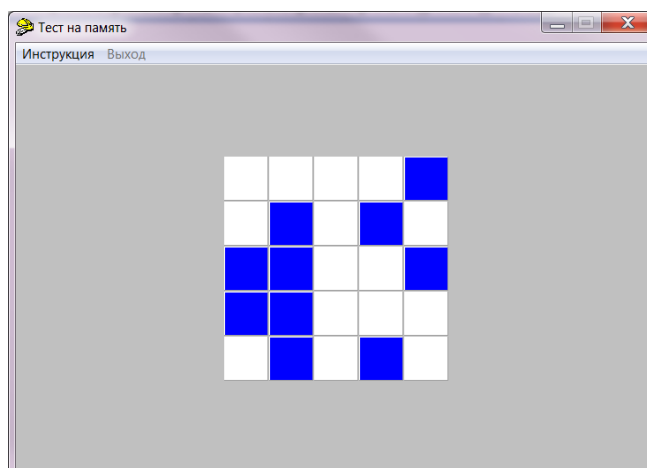


Рис. 1. Пример экрана тестового ПО с закрашенными клетками для запоминания участником (уровень сложности – второй).

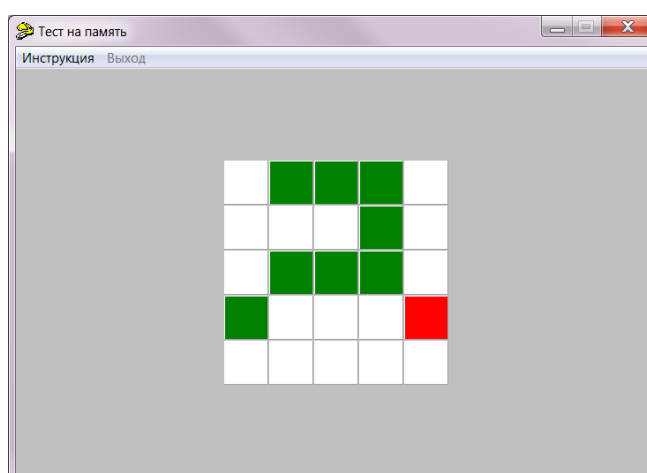


Рис. 2. Пример экрана тестового ПО при ошибке в выборе клеток в ходе испытания (уровень сложности – второй).

Полученные значения зависимых и независимых переменных (а также рассчитанный IDM) для 3-х уровней сложности эксперимента и обеих групп участников представлены в Табл. 1.

Таблица 1. Значения факторов и зависимых переменных в эксперименте

		Уровень сложности		
		Первый	Второй	Третий
k		6	10	13
$N_{\text{общ}}$		96	250	468
$N_{\text{эк.ср}}$		33	75	117
IDM		12	14	16
T , с	Молодые	32,8	64,0	136,1
	Пожилые	63,9	109,5	181,3
E , %	Молодые	1,2	9,1	21,5
	Пожилые	8,7	17,0	33,4

Были построены уравнения линейной регрессии для молодых (9) и пожилых (10) участников:

$$T_{\text{мол}} = -284 + 25,8 * IDM \quad (9)$$

$$T_{\text{пож}} = -293 + 29,4 * IDM \quad (10)$$

Обе регрессионных модели показали высокую значимость ($p < 0,05$) и коэффициенты детерминации: $R^2 = 0,975$ для (9) и $R^2 = 0,992$ для (10).

Для расчёта производительности в задачах по выбору объектов на основе зрительно-пространственной памяти (ТРМ), применим следующую формулу, учитывающую процент допущенных ошибок (E):

$$TPM = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left(\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{IDM_{ij}}{T_{ij}} \right) * (1 - E_i), \quad (11)$$

где K – количество участников, M – количество уровней сложности эксперимента.

Расчитанный показатель производительности для молодых участников составил $TPM=0,23$ бит/с, для пожилых – $TPM=0,11$ бит/с.

Было построено уравнение линейной регрессии для производительности, в зависимости от фактора возраста участников (Age):

$$TPM = 0,282 - 0,0027 * Age \quad (12)$$

Регрессионная модель показала высокую значимость ($p < 0,05$). Исходя из полученных коэффициентов, можно отметить, что для возрастных диапазонов участников, задействованных в эксперименте, дополнительный год возраста снижает производительность работы зрительно-пространственной памяти на 0,96%.

4. Заключение

В результате исследования с применением компьютеризированной версии запоминания зрительных стимулов с использованием заданий разной информационной сложности зарегистрирована эффективность воспроизведения в группах молодых и пожилых людей. Предложен способ расчета производительности эксперимента «Определение зрительно-пространственной памяти», включающий в себя расчет индекса сложности. Результаты анализа показали, что производительность молодых людей в таких задачах приблизительно в два раза выше, чем производительность пожилых людей. Примечательно, что это хорошо соотносится с ранее полученными результатами для задач по движению (классического закона Фиттса) [10].

Результаты психометрических и нейрофизиологических исследований свидетельствуют об устойчивом генерализованном эффекте снижения ментальной скорости и кратковременной памяти при старении, но его весьма высокой вариативности на индивидуальном уровне [11]. Следовательно, анализ производительности воспроизведения следа пространственной памяти в разных экспериментальных условиях предъявления зрительных стимулов у лиц молодого и пожилого возраста может дать полезную информацию для выяснения путей управления информационной сложностью при проектировании интерфейсов в системах человек-машина. Полученные нами результаты могут помочь в дальнейшем определении количественной меры информационной сложности и её применении для оптимизации взаимодействия в человеко-машинных системах

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-00184 мол_а.

Литература

- [1] Conway, A.R.A., Cowan, N., Bunting, M.F., Theriault, D.J., Minkoff, S.R.B. A latent variable analysis of working memory capacity, short-term memory capacity, processing speed, and general fluid intelligence / *Intelligence* – 2002. – Vol. 30(2) – P. 163-183.
- [2] Baddeley, A.D. Logie, R.H. Working memory: The multiple-component model. / In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory*. Cambridge, UK: Cambridge University Press – 1990. – P. 28-61.
- [3] Jaeggi, S.M., Buschkuhi, M., Jonides, J., et al. Improving fluid intelligence with training on working memory / *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* – 2008. – P. 6829-6833.
- [4] MacKenzie, I.S. Fitts' law as a performance model in human-computer interaction. / *Doctoral dissertation* (ISBN 0315659858), University of Toronto – 1991. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.yorku.ca/mack/phd.html> (05.02.2017).
- [5] Soukoreff, R.W., MacKenzie, I.S. Towards a standard for pointing device evaluation: Perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI. / *International Journal of Human-Computer Studies* – 2004 – Vol. 61. – P. 751-789.
- [6] MacKenzie, I.S., Isokoski, P. Fitts' throughput and the speed-accuracy tradeoff. / In *Proc. of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2008)*, New York, ACM – 2008. – P. 1633-1636.
- [7] Plamondon, R., Alimi, A.M. Speed/accuracy trade-offs in target-directed movements. / *Behavioural and Brain Sciences* – 1997 – Vol. 20. – P. 279-349.
- [8] Seow, S. Information theoretic models of HCI: A comparison of the Hick-Hyman law and Fitts' law / *Journal of Human-computer interaction* – 2005. – vol. 20 (3) – P. 315-352.
- [9] Bakaev, M., Avdeenko, T. A quantitative measure for information transfer in human-machine control systems / In *Proc. IEEE International Siberian conference on control and communications (SIBCON-2015)*, 21–23 May, 2015. – Omsk: IEEE. – 4 p.
- [10] Bakaev, M. Fitts' law for older adults: considering a factor of age. / In *Proc. of the VIII Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems. Sociedade Brasileira de Computação, Porto Alegre, RS, Brazil* – 2008. – P. 260-263.
- [11] Разумникова, О.М. Закономерности старения мозга и способы активации его компенсаторных ресурсов // *Успехи физиол. наук.* – 2015. – Т. 46, № 2. – С. 3–16.