КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ 2019 Т. 11 № 2 С. 311–327
DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-311-327

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ЖИВЫХ СИСТЕМ

УДК: 004.5, 004.9, 612.821, 519.8, 519.1, 519.6, 51.7

Экспериментальное выявление организации мысленных вычислений человека на основе алгебр разной ассоциативности

А. В. Коганов[1,a], Т. А. Ракчеева[2,b], Д. И. Приходько[1,c]

[1] ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН,
Россия, 117218, г. Москва, Нахимовский п-т, д. 36-1

[2] ИМАШ РАН,
Россия, 117334, г. Москва, ул. Бардина, д. 4

E-mail: [a] koganow@niisi.msk.ru, [b] rta_ra@list.ru, [c] mitry1205@mail.ru

Получено 13.10.2018, после доработки — 15.01.2019.
Принято к публикации 18.01.2019.

Работа продолжает исследования по способности человека повышать производительность обработки информации, используя параллельную работу или повышение быстродействия анализаторов. Человек получает серию задач, решение которых требует переработки известного количества информации. Регистрируются время и правильность решения. По правильно решенным задачам определяется зависимость среднего времени решения от объема информации в задаче. В соответствии с предложенной ранее методикой задачи содержат вычисления выражений в двух алгебрах, одна из которых ассоциативная, а другая неассоциативная. Для облегчения работы испытуемых в опыте были использованы образные графические изображения элементов алгебры. Неассоциативные вычисления реализовывались в форме игры «Камень, ножницы, бумага». Надо было определить символ-победитель в длинной строке этих рисунков, считая, что они возникают последовательно слева направо и играют с предыдущим символом победителем. Ассоциативные вычисления были основаны на распознавании рисунков из конечного набора простых изображений. Надо было определить, какого рисунка из этого набора в строке не хватает, либо констатировать, что все рисунки присутствуют. В каждой задаче отсутствовало не более одной картинки. Вычисления в ассоциативной алгебре допускают параллельный счет, а при отсутствии ассоциативности возможны только последовательные вычисления. Поэтому анализ времени решения серий задач позволяет выявить последовательную равномерную, последовательную ускоренную и параллельную стратегии вычислений. В экспериментах было установлено, что для решения неассоциативных задач все испытуемые применяли равномерную последовательную стратегию. Для ассоциативных задач все испытуемые использовали параллельные вычисления, а некоторые использовали параллельные вычисления с ускорением по мере роста сложности задачи. Небольшая часть испытуемых при большой сложности, судя по эволюции времени решения, дополняла параллельный счет последовательным этапом вычислений (возможно, для контроля решения). Разработан специальный метод оценки скорости переработки входной информации человеком. Он позволил оценить уровень параллельности расчета в ассоциативных задачах. Была зарегистрирована параллельность уровня от двух до трех. Характерная скорость обработки информации в последовательном случае (примерно полтора символа в секунду) вдвое меньше типичной скорости распознавания изображений человеком. Видимо, разница времени обработки расходуется собственно на процесс вычислений. Для ассоциативной задачи в случае минимального объема информации время решения либо близко к неассоциативному случаю, либо меньше до двух раз. Вероятно, это связано с тем, что для малого числа символов распознавание практически исчерпывает вычисления для использованной неассоциативной задачи.

Ключевые слова: параллельный счет, инженерная психология, тестирование, алгебра, ассоциативность, распознавание зрительных образов

Работа выполнена по теме государственного задания НИР 0065-2018-0004.

© 2019 Александр Владимирович Коганов, Татьяна Александровна Ракчеева, Дмитрий Игоревич Приходько
Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Unported License.
Чтобы получить текст лицензии, посетите вебсайт http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/
или отправьте письмо в Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

COMPUTER RESEARCH AND MODELING
2019 VOL. 11 NO. 2 P. 311–327
DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-311-327

MODELS OF ECONOMIC AND SOCIAL SYSTEMS

UDC: 004.5, 004.9, 612.821, 519.8, 519.1, 519.6, 51.7

Experimental identification of the organization of mental calculations of the person on the basis of algebras of different associativity

A. V. Koganov[1,a], T. A. Rakcheeva[2,b], D. I. Prihodko[1,c]

[1] Federal Science Center Science Research Institute of system Analysis RAN (FGU FNC NIISI RAN), 36/1 Nakhimovsky st., Moscow, 117218, Russia

[2] IMASH RAN, 4 Bardina st., Moscow, 117334, Russia

E-mail: [a] koganow@niisi.msk.ru, [b] rta_ra@list.ru, [c] mitry1205@mail.ru

Received 13.10.2018, after completion — 15.01.2019.
Accepted for publication 18.01.2019.

The work continues research on the ability of a person to improve the productivity of information processing, using parallel work or improving the performance of analyzers. A person receives a series of tasks, the solution of which requires the processing of a certain amount of information. The time and the validity of the decision are recorded. The dependence of the average solution time on the amount of information in the problem is determined by correctly solved problems. In accordance with the proposed method, the problems contain calculations of expressions in two algebras, one of which is associative and the other is nonassociative. To facilitate the work of the subjects in the experiment were used figurative graphic images of elements of algebra. Non-associative calculations were implemented in the form of the game "rock-paper-scissors". It was necessary to determine the winning symbol in the long line of these figures, considering that they appear sequentially from left to right and play with the previous winner symbol. Associative calculations were based on the recognition of drawings from a finite set of simple images. It was necessary to determine which figure from this set in the line is not enough, or to state that all the pictures are present. In each problem there was no more than one picture. Computation in associative algebra allows the parallel counting, and in the absence of associativity only sequential computations are possible. Therefore, the analysis of the time for solving a series of problems reveals a consistent uniform, sequential accelerated and parallel computing strategy. In the experiments it was found that all subjects used a uniform sequential strategy to solve non-associative problems. For the associative task, all subjects used parallel computing, and some have used parallel computing acceleration of the growth of complexity of the task. A small part of the subjects with a high complexity, judging by the evolution of the solution time, supplemented the parallel account with a sequential stage of calculations (possibly to control the solution). We develop a special method for assessing the rate of processing of input information by a person. It allowed us to estimate the level of parallelism of the calculation in the associative task. Parallelism of level from two to three was registered. The characteristic speed of information processing in the sequential case (about one and a half characters per second) is twice less than the typical speed of human image recognition. Apparently the difference in processing time actually spent on the calculation process. For an associative problem in the case of a minimum amount of information, the solution time is near to the non-associativity case or less than twice. This is probably due to the fact that for a small number of characters recognition almost exhausts the calculations for the used non-associative problem.

Keywords: parallel counting, engineering psychology, testing, algebra, associativity, recognition of visual images

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 311–327 (Russian).

Работа выполнена по теме государственного задания НИР 0065-2018-0004.

© 2019 Alexander V. Koganov, Tatyana A. Rakcheeva, Dmitry I. Prikhodko
This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Unported License.
To view a copy of this license, visit http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/
or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

1. Введение

Работы по изучению способов и параметров переработки информации человеком в рамках инженерной психологии началось в середине двадцатого века. В шестидесятые годы началось исследование возможности параллельной обработки информации человеческим мозгом. Основные усилия были сосредоточены на выявлении бессознательных реакций человека на несколько одновременных или близких по времени стимулов. Считалось, что сознательные действия человека могут быть только однозадачными. Это связывалось с речевым представлением сознательной деятельности. Однако позднее, примерно с конца шестидесятых годов прошлого века, понятие сознательной деятельности уже не связывали с обязательным вербальным дублированием, и возникло представление о целенаправленном решении осознанных человеком задач.

Исследования способности человека решать несколько задач одновременно со второй половины двадцатого века ведутся во всем мире. Это обусловлено повышением требований к операторам технологических процессов, а также увеличением потока логической информации в социуме по мере развития средств коммуникации и связи. Кроме того, это важная научная информация о структуре мозга. Обзор работ содержит [Fischer, Plessow, 2015]. С точки зрения анализа работы человека наиболее сложно отделить действительно одновременное решение задач от быстрого и многократного переключения внимания с одной задачи на другую в последовательном режиме. В информатике этот способ называется псевдопараллельным или режимом разделенного времени. Большинство исследователей сосредоточились на исследовании решения двух задач, поданных человеку с малым интервалом времени, например [Sigman, Dehaene, 2008]. В основе лежит принцип выявления истинной параллельности по общему времени решения двух задач, которое должно быть достоверно меньше, чем сумма времен раздельного решения этих задач. Кроме того, используются компьютерная томография и энцефалография мозга испытуемого во время решения задач для наблюдения за возбужденными участками мозга. Иногда удается выявить появление нескольких сходных ядер возбуждения при решении двух задач [Georgiou, 2014]. Большинство исследователей пришло к выводу о способности человека к полной или частично параллельной работе, к которой он не всегда прибегает. Частично параллельный способ решения заключается в одновременном выполнении некоторых подготовительных операций в обеих задачах при последовательном формировании окончательных ответов. Отмечается, что при высокой ответственности за правильное решение (велика цена ошибки) человек, как правило, действует последовательно, решая задачи по очереди. А параллельные стратегии решения обычно связаны со стремлением уменьшить психическое напряжение. Иногда обнаруживается увеличение числа ошибок при быстром решении двух задач.

В семидесятые годы двадцатого века в лаборатории математических методов в биологии МГУ им. М. В. Ломоносова начались работы по выявлению способности человека выполнять одновременно несколько логических операций над символьной информацией при решении достаточно сложных задач. Такой (гипотетический) способ решения задач был назван «запараллеленностью». Тогда же, в рамках этой темы, было предложено использовать тестовые задачи нарастающей сложности, в которых использование параллельного счета дает существенный выигрыш времени решения при большой сложности задачи. Анализируя зависимость времени решения задачи от ее сложности, можно было зарегистрировать возможные случаи реализации параллельного счета. Первые эксперименты показали, что в предложенных задачах (поиск максимума в строке чисел) некоторая часть испытуемых показывает результаты, которые возможны при запараллеленности [Коганов и др., 1971; Коганов, 1972]. Оставался открытым вопрос, как отличить переход на параллельный счет от ускорения работы соответствующих отделов мозга с ростом сложности задачи. Эта трудность была преодолена в последующих работах, проведенных уже в двадцать первом веке, путем введения в эксперимент задач, при решении которых параллельный счет не дает преимущества, точнее, чтобы немного выиграть во времени решения задачи, надо использовать очень много процессоров с малой загрузкой каждого. При этом требуется, чтобы элементарные операции в задачах обоих типов были сходны.

Тогда снижение (по мере роста объема исходных данных) удельного времени обработки одного символа исходных данных в таких задачах будет означать ускорение выполнения элементарной операции, а не переход на параллельный счет. Проведенные опыты показали наличие у некоторой части людей такой стратегии адаптации к росту сложности задачи (наряду с запараллеленностью или равномерной последовательной работой у других испытуемых) [Коганов, 2010; Коганов и др., 2013, 2014].

Данная работа продолжает указанное направление исследований на основе нового класса задач. В работах [Коганов, 2017; Koganov, Rakcheeva, 2017] была теоретически разработана методика тестирования человека с целью определения стратегии его мозга при адаптации к росту сложности вычислительных задач, основанная на использовании вычислений двух разных типов: ассоциативных и неассоциативных. Для этого предлагалось обучить испытуемого двум разным алгебрам соответствующих типов. Однако последующие исследования привели к выводу, что для человека более естественно работать в игровой среде, где вычисления замаскированы под работу с узнаваемыми образами. Ранее были поставлены эксперименты с задачами поиска максимума в числовой таблице и вычисления траектории движения по числовой таблице [Коганов, 2010; Коганов и др., 2013, 2014]. Оказалось, что работа в формальной среде вызывала у некоторых людей дезориентацию и снижала сосредоточенность. Это приводило к недостоверным результатам, которые не позволяли выявить стратегию адаптации примерно для 25 % испытуемых. В новой серии опытов человеку предъявлялась задача в игровой образной форме, которая скрывала вычисления в нужной алгебре. Результаты оказались значительно более стабильными и достоверными.

Методика исследования основана на различии возможных способов ускорения ассоциативных и неассоциативных вычислений. В ассоциативном случае можно разбить строку на отрезки и провести одновременные вычисления на каждом отрезке, а потом завершить вычисления на малом множестве полученных результатов. Это параллельная стратегия, дающая ускорение примерно во столько раз, сколько было отрезков. В неассоциативном случае допустимы только последовательные вычисления от первого до последнего операнда в строке. Единственный способ ускорить процесс вычисления в этом случае состоит в ускорении работы тех областей мозга, которые заняты в вычислениях. Однако этот метод дает ускорение и в ассоциативном случае. Поэтому если уменьшение удельного времени на одну операцию с ростом числа операций наблюдается в обоих типах задач, то, скорее всего, мы наблюдаем стратегию последовательного решения с ускорением. Если же в ассоциативной задаче удельное время уменьшается с ростом числа операций, а в неассоциативном случае остается практически постоянным, то можно говорить о регистрации стратегии параллельного счета. В случае постоянного удельного времени в обоих случаях наблюдается равномерная последовательная стратегия решения без ускорения и без запараллеленности по мере роста сложности вычислений. Остальные варианты соответствуют недостоверной информации о стратегии адаптации. Чаще всего это связано с низкой сосредоточенностью испытуемого, обычно по причине малой вовлеченности в решение задач.

Отличие проводимых нами исследований от описанных выше работ данного направления состоит в том, что человек в каждом акте решения получает только одну задачу, но ее структура либо допускает, либо не допускает параллельную обработку исходной информации (два типа задач). В работах других авторов человек получал либо одну, либо несколько задач в явном виде. В предлагаемой схеме человек сам выбирает интерпретацию задачи как совокупности относительно независимых подзадач либо как одну задачу с последовательной инструкцией решения. Такой выбор у испытуемого есть в случае ассоциативной задачи. Это позволило выявить случаи ускорения последовательной процедуры решения, отделив их от параллельного выполнения операций, используя зависимость времени решения от объема исходной информации в задачах двух типов. Заметим, что в работах других авторов не встречается анализ возможного ускорения работы мозга при появлении дополнительных задач, хотя эта версия не исключается самой постановкой опыта. Это еще один вариант ложной параллельности. В ранее

проведенных экспериментах по нашей схеме с задачами формального вычисления такие случаи имели место [Коганов и др., 2013, 2014]. В опытах, описанных в этой статье, такая последовательная стратегия с ускорением не наблюдалась. Возможно, это связано с образным представлением информации, что позволило человеку сразу выходить на максимальный темп решения задач.

2. Математическая основа эксперимента

С точки зрения математики были использованы две алгебры универсального класса. Одна из них не обладает ассоциативностью, что делает неэффективными параллельные алгоритмы решения. Другая алгебра ассоциативная и допускает эффективный параллельный счет. Именно эти свойства необходимы для реализации описанной выше методики эксперимента. Ниже приводятся описание этих алгебр и доказательство указанных свойств. В последующих разделах описаны техническая постановка и результаты эксперимента на этой основе.

2.1. Алгебра циклической упорядоченности (АЦУ). Конечный набор элементов (носитель) циклически упорядочен:

$$x_1 < x_2 < \ldots < x_n < x_1. \tag{1}$$

На носителе задана бинарная операция (циклический максимум):

$$(x_i, x_j) = \mathrm{cicmax}\{x_i, x_j\} = \begin{cases} x_i & \Leftarrow j \le i \wedge i, j \in \overline{1; n-1}; \\ x_j & \Leftarrow i \le j \wedge i, j \in \overline{1; n-1}; \\ x_n & \Leftarrow (i \ne 1 \wedge j = n) \vee (j \ne 1 \wedge i = n); \\ x_1 & \Leftarrow (i = 1 \wedge j = n) \vee (j = 1 \wedge i = n); \end{cases}$$

Правильным выражением в этой алгебре считается произвольная конечная строка, состоящая из элементов носителя. Вычисление производится последовательными бинарными операциями над левой парой элементов и, далее, над последним результатом и очередным элементом строки слева направо до последнего правого элемента:

$$z = y_1 y_2 y_3 \ldots y_{m-1} y_m = (((\ldots((y_1, y_2), y_3), \ldots), y_{m-1}), y_m) \tag{2}$$

или в развернутой форме:

$$\begin{aligned} &z_1 = (y_1, y_2), \\ &z_2 = (z_1, y_3), \\ &z_3 = (z_2, y_4), \\ &\ldots \\ &z_{m-2} = (z_{m-3}, y_{m-1}), \\ &z = z_{m-1} = (z_{m-2}, y_m). \end{aligned} \tag{3}$$

Здесь $y_1, y_2, y_3, \ldots, y_{m-1}, y_m \in \{x_1; \ldots; x_n\}$.

Алгебра циклической упорядоченности является неассоциативной.

$$\begin{aligned} &(x_n x_1) x_2 = x_2, \\ &x_n (x_1 x_2) = x_n. \end{aligned} \tag{4}$$

Таким образом, в АЦУ вычисление выражения (2) требует последовательной процедуры (3). В работах [Коганов, 2017; Koganov, Rakcheeva, 2017] показано, что параллельный счет в таких задачах порождает очень низкий коэффициент использования вычислительных элементов. Психологически это соответствует большим неэффективным затратам энергии.

2.2. Алгебра распознавания (АР). Задан конечный набор элементов (носитель)

$$\{x_1; x_2; \ldots; x_n; 0; 1\}.$$

Правильное выражение — это строка

$$\begin{gathered} y_1 y_2 \dots y_{m-1} y_m, \\ y_1, \dots, y_m \in \{x_1; \dots; x_n\}. \end{gathered} \tag{5}$$

Элементы $\{x_1; \dots; x_n\}$ назовем основным носителем, а элементы $\{0;1\}$ — логическим носителем.

На основном носителе определены одноместные операции распознавания символа $f_1, \dots, f_n$, которые отображают элемент в логический носитель.

$$f_i(y) = \begin{cases} 1 & \Leftarrow y = x_i, \\ 0 & \Leftarrow y \neq x_i. \end{cases} \tag{6}$$

Операция распознавания символа в строке определена как

$$f_i(y_1 \dots y_m) = \max\{f_i(y_1); \dots; f_i(y_m)\}.$$

Эта операция значением результата 1 распознает заданный элемент носителя среди аргументов. С точки зрения психологии она моделирует акт распознавания заданного объекта среди множества объектов.

Характеристикой выражения (5) назовем набор тех элементов основного носителя, которых в этой строке нет. Если строка (5) содержит весь основной носитель, то характеристика определена как 0.

Задача вычисления характеристики сводится к вычислению значения всех операций распознавания применительно ко всей строке (5).

$$z = f_i(y_1 \dots y_m), \quad i = 1, \dots, n. \tag{7}$$

Возможно параллельное вычисление распознавания на разных участках последовательности. Это связано с ассоциативностью бинарной операции распознавания.

$$\max\{f_i(y_1, y_2), y_3\} = \max\{y_1, f_i(y_2, y_3)\}. \tag{8}$$

Например, выражение (7) можно записать в эквивалентной форме с параллельностью 2 и 3.

$$\begin{gathered} z = f_i(y_1 y_2 y_3 \dots y_{m-1} y_m) = \max\{f_i(y_1 \dots y_k); f_i(y_{k+1} \dots y_m)\} = \\ = \max\{f_i(y_1 \dots y_k); f_i(y_{k+1} \dots y_{k+l}); f_i(y_{k+l+1} \dots y_m)\}. \end{gathered} \tag{9}$$

Кроме того, возможно одновременное вычисление в строке всех распознаваний для $i = \overline{1, n}$. Поэтому вычисление характеристики строки возможно в параллельном режиме при высокой и эффективной загруженности параллельных блоков. Это позволяет наращивать удельную производительность вычислений на единицу информации исходных данных. Заметим, что если характеристика не нулевая, то вычисление требует обработки всех элементов строки. Это важно для оценки реально переработанной информации.

Как показано в работах [Коганов, 2001, 2010, 2017; Koganov, Rakcheeva, 2017], с помощью описанных алгебр АЦУ и АР можно поставить эксперимент по выявлению способности человека переходить к параллельным вычислениям, когда это эффективно.

3. Описание эксперимента

В эксперименте мы предлагали испытуемому серии задач вычислений в указанных выше алгебрах. В каждой серии длины последовательностей были одинаковы. Испытуемый решал несколько серий задач с разными длинами строк, которые росли от серии к серии. Вначале решалась задача в АЦУ (неассоциативная), а потом задача вычисления характеристики в АР (ас-

социативная). Перед сериями в каждой алгебре испытуемый проходил тренировку на серии с максимальной длиной строки. Тренировка останавливалась по желанию испытуемого. Рабочие серии содержали по 10 задач каждой длины.

Технически эксперимент был реализован на экране компьютера в специальном окне в среде MATLAB. В качестве элементов носителя алгебры предлагался набор простых картинок, изображающих известные предметы с понятными названиями. Это важно для распознавания. Картинки располагались в стандартных небольших квадратиках. Из этих квадратов формировалась строка с левым переносом, как при письме. Длина графической строки составляла 7 квадратов. На экране возникала таблица в несколько строк, которую надо было интерпретировать как одну длинную строку. Проверка показала, что это не вызывает затруднений у человека, умеющего читать.

В том же окне располагалось несколько кнопок и окон, которыми испытуемый или экспериментатор оперировали с помощью компьютерной мыши и клика или клавиатуры. Экспериментатор задавал в специальном окне длину строки в серии. Испытуемый с помощью клика на специальной кнопке «старт» запускал очередную задачу. При этом на экране возникала строка картинок-символов, и одновременно начинался отсчет времени. Испытуемый решал задачу в уме (слежение по строке курсором запрещалось) и останавливал отсчет времени кликом на кнопке «стоп», когда вычислял ответ. При нажиме строка сразу исчезала. Испытуемый в спокойном режиме записывал результат в специальном окне, используя клавиатуру. На отсчет времени эта операция не влияла, и испытуемый об этом знал. После этого он мог отдохнуть и запустить следующую задачу. В специальном окне высвечивался номер текущей задачи в серии. Когда решалась последняя договорная (десятая) задача, испытуемый мог попросить следующую серию. Если при решении задач возникала внешняя помеха, серия могла содержать дополнительные задачи для замены «испорченных». В специальной зоне экрана всегда присутствовало изображение всего алфавита с номерами картинок. При выдаче ответа достаточно было указать номер результирующей картинки. Время измерялось с точностью до секунды, что оказалось достаточно, учитывая разброс времени механической реакции при выдаче ответа. Использовались часы компьютера. Схема расположения зон на экране показана на рис. 1, *в*. Время решения на экран не выводилось, а записывалось в скрытый файл результатов вместе с правильным ответом, выданным ответом, номером задачи в серии, а также с длиной серии и индексом испытуемого.

Параметры эксперимента

3.1. В задаче циклической упорядоченности использовался алфавит из трех картинок: «камень», «ножницы», «бумага» (рис. 1, *а*). Их упорядочение соответствовало известной игре: ножницы режут бумагу, бумага обертывает камень, камень разбивает ножницы. Надо было определить «победителя» в случайной строке этих картинок при действии слева направо (рис. 2). Картинки на каждой позиции возникали равновероятно и статистически независимо, возможно, с повторами рядом. Ответ выдавался в форме номера картинки победителя. Алфавит картинок с номерами всегда был на экране в поле зрения под строкой задачи. Далее, эту задачу назовем «Камень, ножницы, бумага» или КНБ.

Число серий задач — 4.

Длины строк в сериях: 8, 12, 16, 20.

Представление на экране: таблица рисунков с длиной строки 7. Последняя строка могла содержать пустые клетки справа.

Число задач в одной серии — 10.

3.2. В задаче вычисления характеристики использовался алфавит из шести картинок: «корабль», «паровоз», «автомобиль», «дом», «дерево», «лошадь» (рис. 1, *б*). Испытуемого предупреждали, что в предъявляемой строке либо нет ровно одной картинки, либо есть все картинки (рис. 3). Генерация задач происходила по следующему вероятностному алгоритму. Вначале равновероятно выбиралась одна «отброшенная» картинка из алфавита. Затем генерировалась

строка, в которой все картинки, кроме отброшенной, на каждой позиции возникали равновероятно и статистически независимо. На второй стадии в начальные позиции строки «принудительно» вводились подряд все картинки, кроме отброшенной, и производились случайные перестановки каждой из этих первых позиций со случайно выбранной позицией. Выбор позиции обмена производился равновероятно по всей строке и статистически независимо от остальных случайных выборов. Перед второй стадией с заданной вероятностью (использовалась 1/10) определялось, что в строке не должно быть отсутствующей картинки. Тогда отброшенная картинка вводилась в строку на второй стадии перед перемешиванием. Этот способ генерации гарантировал, что в строке нет ровно одной картинки или есть весь алфавит. Испытуемый выдавал ответ в форме номера отсутствующей картинки или 0, если все присутствовали. Алфавит картинок с номерами всегда был на экране в поле зрения под строкой задачи. Далее назовем эту серию «задача распознавания».

Число серий задач — 4.

Длины строк в сериях: 8, 12, 16, 20.

Представление на экране: таблица рисунков с длиной строки 7. Последняя строка могла содержать пустые клетки справа.

Число задач в одной серии — 10.

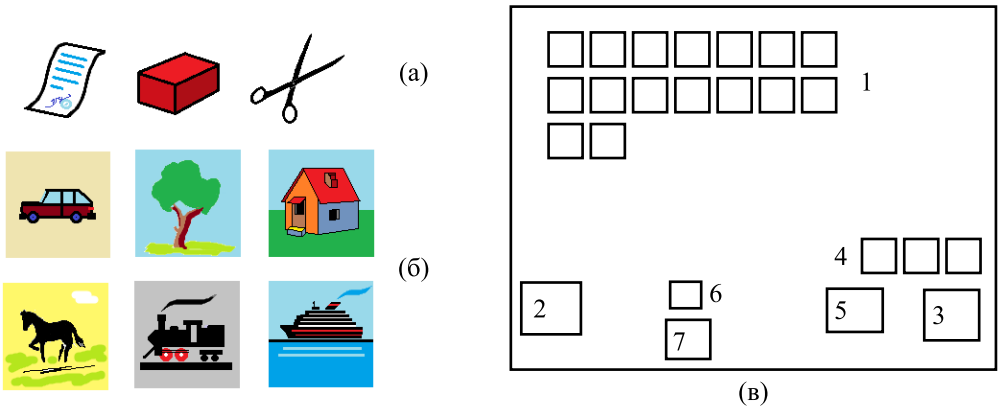

Рис. 1. Алфавиты в форме рисунков, использованные в задачах: а) задача «Камень, ножницы, бумага»; б) задача вычисления характеристики (в реальном эксперименте использованы цветные клеммы); в) схема представления задачи на экране: 1 — строка задачи, 2 — кнопка «старт», 3 — кнопка «стоп», 4 — алфавит задачи с номерами картинок, 5 — окно для ввода номера ответа, 6 — окно для ввода длины строки (устанавливает экспериментатор), 7 — номер текущей задачи в серии одной длины строки

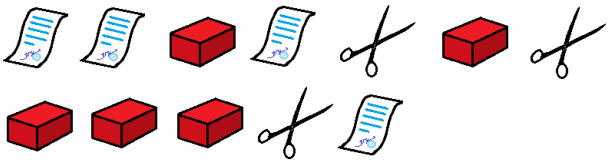

Рис. 2. Пример строки в задаче «Камень, ножницы, бумага» (ответ: «бумага»)

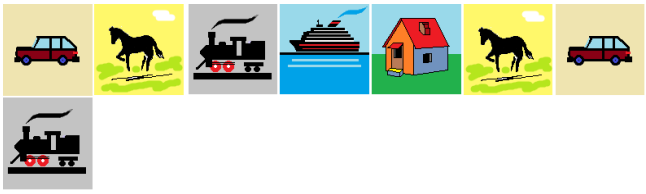

Рис. 3. Пример строки в задаче вычисления характеристики (ответ: «дерево»)

Установка, которую получал испытуемый перед началом тренировки, кроме описания задач содержала требование правильного решения задачи и оценку результата по времени правильного решения. Испытуемому сообщалось, что после обработки результатов будет дана оценка его способности к работе с большими объемами информации. Опыт, как в данном, так и в ранее проведенном исследовании, показал, что эта установка достаточна для сосредоточенной и заинтересованной работы испытуемых в присутствии экспериментатора. Описание задач проводилось на содержательном языке: «определить победителя в последовательных боях камня, ножниц и бумаги» и «найти отсутствующую картинку из набора». В процессе тренировки иногда приходилось объяснять, что нельзя менять порядок «стычек» в задаче КНБ, поскольку это может изменить результат. Эта проблема появлялась, если у испытуемых возникало ощущение, что решать задачу можно с конца, когда ответ несколько раз совпадал с результатом «стычки» крайних правых символов. Термины «ассоциативность» и «неассоциативность», в установке не употреблялись. Иногда в ответах на вопросы испытуемых им сообщалось, что определяется их способность к одновременному проведению нескольких вычислений. Влияние этой информации на результат не проявилось. По опросу после опыта, все испытуемые подтвердили, что занимались вычислением ответа, а не интуитивным угадыванием. При этом некоторые считали более сложной или интересной задачу КНБ, а другим сложнее было искать отсутствующую картинку. Но на время решения эти субъективные оценки не влияли. Некоторые испытуемые говорили, что в задаче распознавания больше ориентировались на цвет картинки. Опыт с монохромными картинками в этой серии не проводился.

4. Результат эксперимента

На момент написания этой статьи в эксперименте приняли участие 8 человек. Длительность тестирования одного человека, включая тренировку, составляла 30–40 минут. В результирующей обработке данных вычислялось среднее время правильного решения задачи по каждой серии и оценивалось стандартное отклонение этого среднего по эмпирической дисперсии времен решения задач одной серии. Средние времена решения задач в двух сериях одной алгебры считались достоверно различными, если интервалы плюс-минус стандартное отклонение у них не пересекались. Обработка данных велась индивидуально для каждого испытуемого, поскольку усреднение по людям в данном случае не отражает индивидуальных стратегий решения задачи.

Во всех экспериментах не зафиксировано ни одной ошибки в решении задач. Это позволяет оценивать скорость обработки входной информации непосредственно как отношение длины строки к среднему времени решения в серии с данной длиной строки.

Все испытуемые показали достоверный рост среднего времени решения задачи КНБ в зависимости от длины строки. График средних времен у всех испытуемых близок к линейной функции. Отклонение экспериментальных точек от линейной аппроксимации не превосходит стандартного отклонения. При этом наклон аппроксимирующей прямой линии был различен у разных испытуемых. Это позволяет уверенно говорить о последовательном и равномерном способе решения неассоциативной задачи КНБ у всех испытуемых. Но скорость решения у разных людей различная (рис. 4). На рисунках или в подписях указаны коды испытуемых (P1, …, P8) для удобства ссылок и сравнения графиков. Коды соответствуют последовательности участия в опыте.

В задаче распознавания все испытуемые показали недостоверные колебания среднего времени решения вокруг некоторого уровня в зависимости от длины строки в серии. Это говорит о параллельном механизме распознавания у человека. Однако у некоторых испытуемых наблюдалась небольшая и недостоверная тенденция к снижению времени решения по мере роста длины строки (рис. 5). Может быть, это следствие повышения концентрации человека с ростом сложности задачи. Кроме того, у двоих испытуемых (P1, P7) наблюдалось достоверное небольшое увеличение среднего времени решения при длине строки 20 (рис. 4-P7, 6-P1). Возмож-

но, это говорит о переходе на частично последовательный способ решения, например при дополнительных проверках уже полученного результата.

В экспериментальной работе [Коганов и др., 2013, 2014] было показано, что в задаче вычисления траектории по числовой таблице, которая не допускает эффективного параллельного решения, некоторые испытуемые применяли последовательный счет с ускорением по мере роста сложности. В задаче КНБ этого не наблюдалось. Возможно, это связано с чисто логической структурой задачи КНБ. В задаче траектории использовалось зрительное слежение по таблице, которое человек мог ускорить.

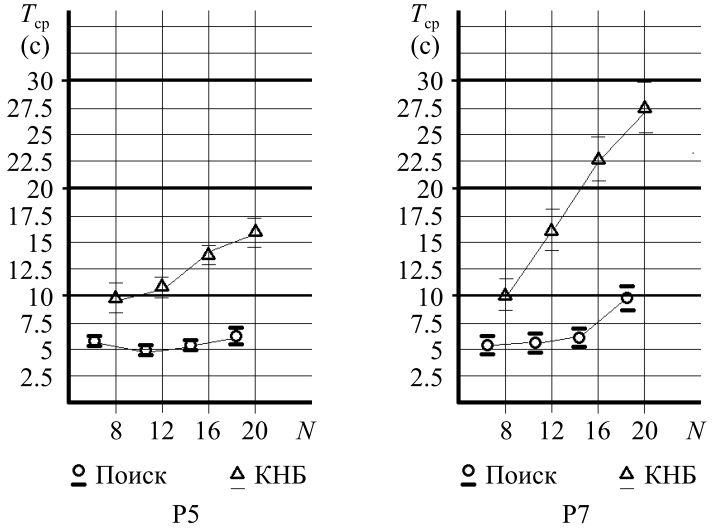

Рис. 4. Характерный вид зависимости среднего времени решения (секунды) от сложности задачи. Круги — задача распознавания, треугольники — задача КНБ. (Коды испытуемых — P5, P7.) В задаче поиска отсутствующего элемента алфавита время не зависит от сложности с точностью до стандартного отклонения. В задаче циклического сравнения (КНБ) время растет линейно по сложности (длина строки) с точностью до стандартного отклонения. У испытуемого P7 имеется достоверный скачок времени решения задачи поиска для максимальной сложности, который, вероятно, связан с дополнительной проверкой результата. Это единственное наблюдение

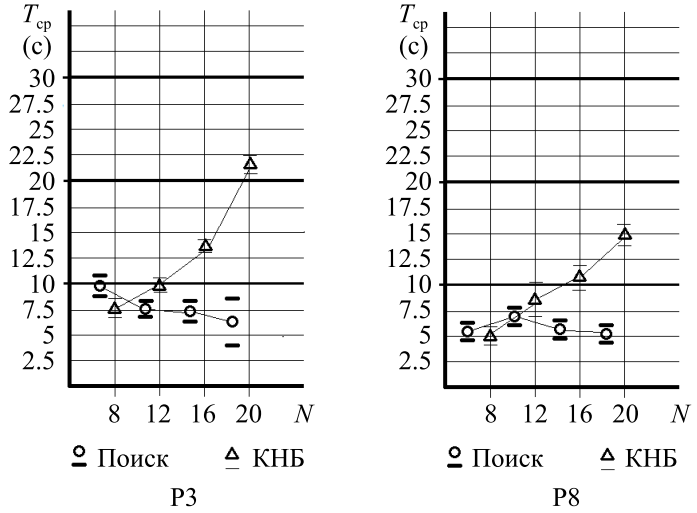

Рис. 5. Вариант с недостоверным ускорением распознавания. (Коды испытуемых — P3, P8.) У этих испытуемых наблюдалось ускорение решения задачи поиска с ростом сложности. Но изменение укладывается в стандартное отклонение

Остальные полученные графики представлены на рис. 6. Они отражают уже описанные тенденции. Убывание времени вычисления характеристики с ростом сложности у испытуемого Р6, вероятно, связано с недостаточной начальной тренировкой. Это объясняет и аномально высокое время решения задачи при минимальной (начальной) сложности. Но и в этом случае различие среднего времени решения при всех сложностях задачи недостоверно, поскольку большим временам соответствует и большой разброс.

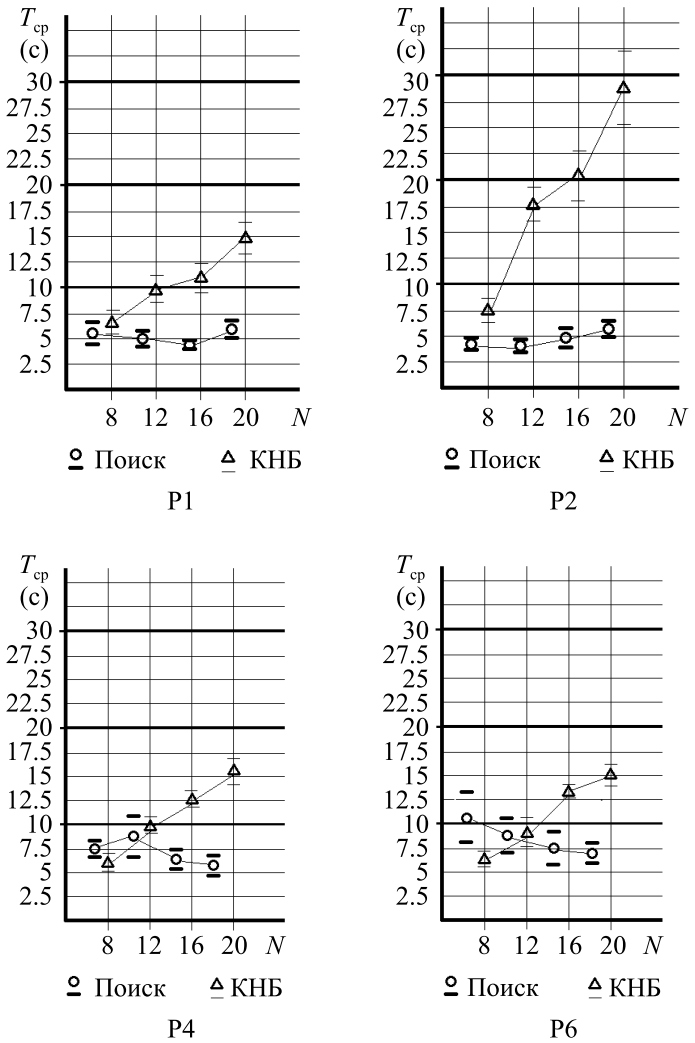

Рис. 6. Зависимость среднего времени решения (секунды) от сложности (длина строки). (Коды испытуемых — Р1, Р2, Р4, Р6.) Подтверждаются описанные выше тенденции

5. Оценка скорости переработки входной информации

Анализ зависимости времени решения задачи от объема символьной информации в представлении задачи при условии безошибочного решения всех задач позволяет оценить скорость обработки информации человеком (в единицах бит/с). Эти результаты полезны с точки зрения оценки уровня параллельности или равномерности последовательной работы испытуемого. При параллельных вычислениях следует ожидать роста скорости обработки информации, а при последовательной и равномерной работе скорость обработки должна быть примерно постоянной. Как будет видно ниже, эти ожидания оправдались.

Способ оценки скорости переработки информации (СПИ) основан на оценке количества информации в одной задаче из серии (биты) и оценке среднего чистого времени решения одной задачи из серии (секунды). Для этого необходимо вычесть из среднего зарегистрированного времени решения задачи оценку времени двигательной реакции на остановку секундомера перед выдачей ответа. Оценка времени реакции осуществлялась в данной работе путем вычисления линейной интерполяции (линейной регрессии) эмпирических средних времен как функции длины строки в серии неассоциативных задач. Значение интерполяции в точке «единичной длины» принималось как оценка времени реакции на один символ и времени реакции при выдаче вычисленного ответа в обеих задачах. Оценка скорости переработки информации строилась как отношение количества информации в одной задаче к среднему чистому времени решения задачи в серии с одной длиной строки. Таким образом, были получены графики зависимости скорости переработки информации от сложности задачи для каждого испытуемого. Оценка информации одной задачи (сложность) определялась как произведение энтропии алфавита (двоичный логарифм числа символов алфавита) на длину строки.

Ниже приводятся формулы, по которым велись вычисления, и оценки погрешности полученных интерполяций (таблица 1). Потом представлены графики зависимости скорости переработки информации от сложности в обеих задачах для каждого испытуемого (рис. 7). Завершает этот раздел обсуждение полученных результатов.

Введем обозначения.

Данные опыта: n — размер алфавита, N — длина строки (размер таблицы). Задачи обозначим как NA (неассоциативная, «Камень, ножницы, бумага») и AS (ассоциативная, определение характеристики). Эти обозначения будут использоваться в формулах.

$T(N, task, n)$ — среднее время решения задачи $task = NA, AS$ для данных N и n (при фиксированной задаче $T(N)$).

n ($task$) — размер алфавита в задаче.

h ($task$) — пропускная способность мозга при решении задачи.

τ — время механической реакции при выдаче ответа.

$$h = \frac{N\log(n)}{T(N) - \tau}. \tag{10}$$

Методика эксперимента определяет некоторые параметры непосредственно.

$$\begin{aligned} &n(NA) = 3, \\ &\log(n(NA)) \approx 1.585, \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} &n(AS) = 6, \\ &\log(n(AS)) \approx 2.585, \end{aligned} \tag{12}$$

$$N(NA) = N(AS) = 8, 12, 16, 20 \text{ (пробегает значения).} \tag{13}$$

Значения $T(N, task, n)$ известны непосредственно из результатов эксперимента.

Значение τ требуется оценить исходя из полученных данных. Время механической реакции (прочтение символа и выдача его значения в формате эксперимента) в данном опыте непосредственно не измерялось, чтобы не утомлять испытуемых еще одной серией задач практически нулевой логической сложности. Для оценки этого параметра была использована линейная экстраполяция среднего времени решения задачи NA в область сложности $N = 1$.

Линейная регрессия $t(N)$ значений $T(N, NA, 3)$ строилась методом наименьших квадратов, исходя из естественной гипотезы $T(0, NA, 3) = 0$.

$$t(N) = \Delta N; \quad \Delta = \arg\min\left\{ \sum_{N=8,12,16,20} \left(T(N) - \Delta N\right)^2 \right\} = \tau. \tag{14}$$

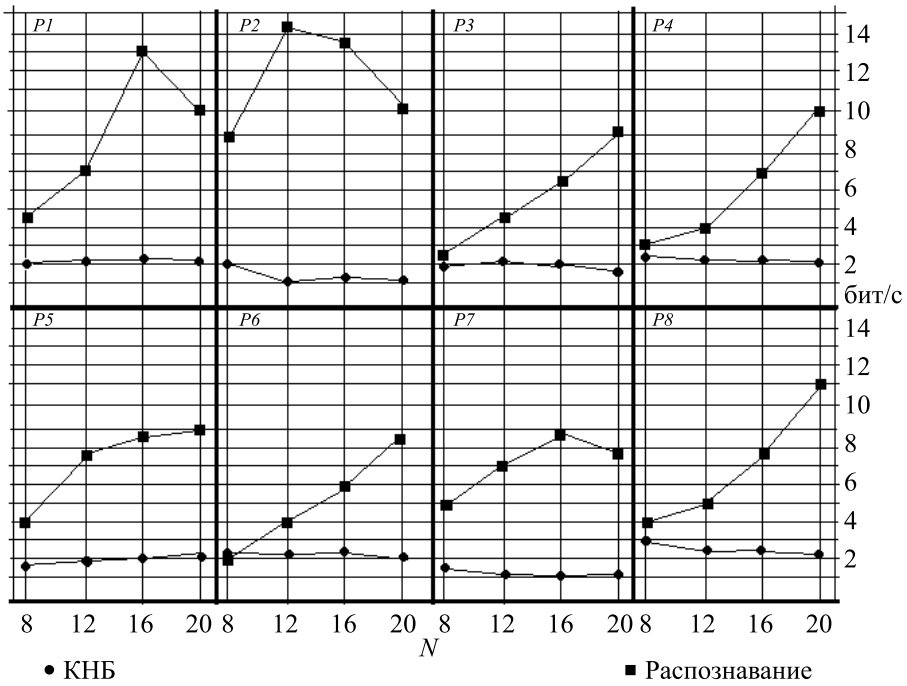

Рис. 7. Сводный график: зависимость скорости обработки информации (бит/с) от числа символов (N) в исходных данных. Задача *NA* соответствует КНБ, а задача *AS* соответствует распознаванию

Таблица 1. Параметры погрешности математической модели для неассоциативной задачи (КНБ)

Испытуемый	Δ (с)	σ (с)	ρ (1)
P1	0.7093	0.4376	0.0419
P2	1.3519	2.0523	0.1027
P3	0.9436	0.9503	0.1393
P4	0.7625	0.1458	0.0130
P5	0.8690	1.3655	0.1063
P6	0.7718	0.4746	0.0418
P7	1.3542	0.6567	0.0330
P8	0.7102	0.5100	0.0488

Расчет по формуле (14) ведется стандартными средствами регрессионного анализа. Результаты расчета по формулам (14) и (10) для всех испытуемых показаны на рис. 7. В таблице 1 представлены расчетные характеристики математической модели для всех испытуемых:

$$\Delta, \sigma = \|T(n) - \Delta n\|, \quad \rho = \sigma / \|T(n)\|, \quad n = 8, 12, 16, 20, \tag{15}$$

$$\|T(n)\| = \sqrt{T(8)^2 + T(12)^2 + T(16)^2 + T(20)^2},$$

$$\sigma = \sqrt{(T(8) - 8\Delta)^2 + (T(12) - 12\Delta)^2 + (T(16) - 16\Delta)^2 + (T(20) - 20\Delta)^2}.$$

Δ — коэффициент регрессии (размерность — время, деленное на число знаков), σ — среднеквадратичная погрешность линейной регрессии (секунды), ρ — относительная погрешность регрессии (безразмерная).

Можно видеть, что относительная погрешность модели (параметр ρ) находится в интервале от 4 % до 11 %. При этом скорость обработки данных (параметр Δ) находится в интервале от 0.7 до 1.4 символов в секунду. Стандартная скорость распознавания графических символов по многочисленным публикациям около 2-3 символов в секунду (например, [Психологическая

энциклопедия…] или [Материалы по психологии…, 2012]). Таким образом, вычисления снижают скорость обработки символьной информации в 2-3 раза для предложенной задачи.

Производительность обработки исходных данных в ассоциативной задаче растет у всех испытуемых, и у большинства — почти линейно по объему данных. У трех испытуемых (P1, P2, P7) наблюдается более сложная форма изменения производительности, с некоторым падением для больших объемов информации. Как мы отмечали выше, это связано с дополнительными проверками результата после решения задачи. Наблюдался характерный рост производительности в 2-3 раза по мере роста сложности задач. Вероятно, это соответствует числу параллельных процессов вычисления (распознавания) в мозге испытуемых.

Для малых значений сложности задач скорости обработки данных в обеих задачах либо близки, либо для ассоциативной задачи примерно вдвое выше. Возможно, это означает, что у этих испытуемых двукратная параллельность начинает использоваться в распознавании уже для восьми символов. Для испытуемого P2 можно предположить высокий уровень параллельности вычислений уже на минимальной сложности задач. Поэтому с ростом сложности изменение производительности не имеет четкой тенденции.

Для неассоциативной задачи производительность практически не зависит от объема исходных данных, что означает последовательный и равномерный для всех сложностей задачи способ решения. Таким образом, результат эксперимента вполне соответствует теоретическим предсказаниям [Коганов, 2017; Koganov, Rakcheeva, 2017].

6. Заключение

В данной статье представлен эксперимент с предъявлением человеку двух серий задач. В одной серии предъявлялись задачи, вычисления в которых были неассоциативными, а в другой серии действовал ассоциативный закон. Математическая теория показывает, что во втором случае возможны эффективные параллельные вычисления. В каждой серии присутствовали задачи разной вычислительной сложности, определяемой (в данном случае) объемом исходных данных (длиной строки символов операндов). Надо отметить, что в общем случае алгебраических вычислений объем перерабатываемой информации может быть существенно больше числа операндов, если сами операции достаточно сложные и требуют промежуточных вычислений (например, извлечение корня из числа или предельный переход в заданной последовательности). В эксперименте предлагались операции, которые человек легко выполняет как элементарные, непосредственно по заданной таблице результатов, что позволяло оценивать сложность вычислений числом заданных операндов.

Изучалась зависимость среднего времени решения задачи от ее вычислительной сложности. Для последовательного метода решения это время должно расти линейно по сложности. А в случае параллельного решения задачи должен наблюдаться интервал различных сложностей с постоянного времени решения. Соответственно, скорость обработки информации для последовательного алгоритма решения не зависит от сложности задачи, а для параллельного алгоритма растет с ростом сложности.

Полученные результаты позволяют утверждать, что предложенная методика позволяет выявлять последовательные и параллельные методы обработки символьной информации мозгом человека. Конкретно в данном эксперименте показано, что неассоциативные логические вычисления человек интуитивно проводит последовательно, а ассоциативные задачи распознавания человек после тренировки начинает решать параллельными методами.

Вопрос о том, на каком этапе решения серии задач формируется параллельный алгоритм решения в ассоциативном случае, в данном эксперименте не разрешается, поскольку рост сложности задач начинается только на основном этапе эксперимента после тренировки. Тренировка велась на максимальной длине строки 20 и занимала примерно 15–25 предъявлений задач. На этих задачах регистрировался большой разброс времен решения. Когда время решения стабилизировалось, испытуемые сообщали о своей готовности к основным сериям. В ранее по-

ставленных экспериментах с цифровой кодировкой в ассоциативной задаче поиска максимума наблюдался переход к параллельной обработке, начиная со сложности выше шести символов. Для низкой сложности наблюдался рост времени решения как при последовательном алгоритме [Коганов и др., 1971, 1972]. В данном эксперименте длина строки была не ниже восьми и участок последовательной обработки информации в ассоциативной задаче не наблюдался у всех испытуемых.

Хорошие результаты дал метод кодирования алгебраических знаков содержательными рисунками. Это значительно сократило время тренировки и уменьшило число ошибок по сравнению с ранее проведенными опытами. Возможно, при таком представлении информации к решению задач подключаются дополнительные структуры мозга, обычно не участвующие в решении логических задач. Причины такого положения вещей, когда формальное усложнение кодировки данных приводит к ускорению их обработки, вероятно, кроются в способности мозга эффективно использовать избыточность кодирования путем привлечения ассоциативной памяти. Тенденцию к такому полезному усложнению кодировки можно заметить в разговорных языках у всех народов и в искусстве. Исследование этого эффекта выходит за рамки данной работы.

Список литературы (References)

Злобин А. И., Коганов А. В., Ракчеева Т. А. Исследование скорости переработки информации человеком в серии задач растущей сложности // Девятые Курдюмовские чтения: международная междисциплинарная научная конференция «Синергетика в общественных и естественных науках», труды, 17–21 апреля 2013 г., Тверской государственный университет, Тверь. — С. 57–60.

Zlobin A. I., Koganov A. V. Rakcheeva T. A. Issledovanie skorosti pererabotki informacii chelovekom v serii zadach vysokoj slozgnosti [The research of the speed of the information processing in the serios of the tasks of the high complexity] // 9-e Kurdumovskie chteniya: mezgdunarodnaya nauchnaya konferenciya “Sinergetika v obtshestvennyh i estestvennyh naukah” [9-th Kurdumov reading: international interdisciplinary science conference “Synergetic in social and natural sciences”], 17–21 aprelya 2013, TvGU. — P. 57–60 (in Russian).

Классические методы исследования времени реакции человека (Psychology OnLine.Net, редакция 2012) [Электронный ресурс]. — URL: http://www.psychology-online.net/articles/doc-1988.html (дата обращения: 10.09.2018).

Klassicheskie metody issledovaniya vremeni reakcii cheloveka (Psychology OnLine.Net, редакция 2012) [Classical research methods of the time of human reaction (Psychology OnLine.Net, редакция 2012)] [Electronic resource]. — URL: http://www.psychology-online.net/articles/doc-1988.html (accessed: 10.09.2018).

Коганов А. В. Исследование возможности параллельного выполнения логических операций человеком. Параллельные вычисления и задачи управления // Труды международной конференции PACO – 2001, Москва, 2–4 октября 2001 г., на компакт-диске. — М.: ИПУ РАН, 2001.

Koganov A. V. Issledovanie vozmozgnosti parallel’nogo vypolneniya logicheskih operacij chelovekom. Parallel’nye vychsleniya I zadachi upravleniya [The research of the possibility of the parallel calculations by the man. The parallel calculations and the tasks of the control] // Trudy mezgdunarodnoj konferencii PACO – 2001, Moskva, 2–4 oktyabrya 2001 g., na compact-diske [The works of The international conference PACO-2001, Moscow, 2-4 October 2001, on compact-disk]. — Moscow: IPU RAN, 2001 (in Russian).

Коганов А. В. Коллективы автоматов в детерминированных и случайных средах и приложение к психологическим тестам: диссертация на соискание ученой степени к.ф-м.н. — М., 1972.

Koganov A. V. Kollektivy avtomatov v determinirovannyh i sluchajnyh sredah i prilozgenie k sluchajnym sredam. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni k. a.-m. n. [The collectives of the automates in the determine and probability mediums and the application to the psychological testes: The dissertation at phys. math. sciences]. — Moscow, 1972 (in Russian).

Коганов А. В. Растущие индукторные пространства и анализ параллельных алгоритмов // Программные продукты и системы, приложение к международному журналу «Проблемы теории и практики управления». — 2010. — № 2. — С. 33–38.

Koganov A. V. Rastucshie inductornye prostranstva i analis parallelnyh algoritmov [The growing inductor spaces and the analysis of the parallel algorithms] // Programmnye producty i sistemy, prilozgenie k mezgdunarodnomu zgurnalu “Problemy teorii i practiki upravleniya” [The programming products and systems, the application to the international journal “The problems of the theory and practicum of the control”]. — 2010. — No. 2. — P. 33–38 (in Russian).

Коганов А. В. Тесты проверки параллельной организации логических вычислений, основанные на алгебре и автоматах // Компьютерные исследования и моделирование. — 2017. — Т. 9, № 4. — С. 621–638.

Koganov A. V. Testy proverki parallel’noj organizacii logicheskih vychislenij, osnovannye na algebre i avtomatah [The tests for checking of the parallel organization in logical calculation which are based on the algebra and the automats] // Komputernye issledovaniya i modelirovanie [The Computer research and modeling]. — 2017. — Vol. 9, No. 4. — P. 621–638 (in Russian).

Коганов А. В., Злобин А. И., Ракчеева Т. А. Задача вычисления траектории с равномерным распределением ответов // Компьютерные исследования и моделирование. — 2014. — Т. 6, № 5. — С. 803–828.

Koganov A. V., Zlobin A. I., Rakcheeva T. A. Zadacha vychisleniya traectorii s ravnomernym raspredeleniem otvetov [The task of the calculation of the trajectory with homogenous the distribution of solutions] // Komputernye issledovaniya i modelirovanie [The Computer research and modeling]. — 2014. — Vol. 6, No. 5. — P. 803–828 (in Russian).

Коганов А. В., Злобин А. И., Ракчеева Т. А. Исследование возможности параллельной переработки информации человеком в серии задач высокой сложности // Компьютерные исследования и моделирование. — 2013. — Т. 5, № 5. — С. 845–861.

Koganov A. V., Zlobin A. I., Rakcheeva T. A. Issledovanie vozmozgnosti parallel’noj pererabotki informacii chelovekom v serii zadach vysokoj slozgnosti [The research of the possibility of the parallel processing of the information by man in the series of the tasks of the high complexity] // Komputernye issledovaniya i modelirovanie [The Computer research and modeling]. — 2013. — Vol. 5, No. 5. — P. 845–861 (in Russian).

Коганов А. В., Пятецкий-Шапиро И. И., Фейгенберг И. М. Зависимость скорости решения от сложности и способа кодирования исходных данных // Вопросы экспериментального исследования скорости реагирования: сборник. — Тарту, 1971.

Koganov A. V., Pyatecky-Shapiro I. I., Fejgenberg I. M. Zavisimost’ skorosti resheniya ot slozgnosti i sposoba kodirovaniya ishodhyh dannyh [The depending of the speed of the soluteion from the complexity and the coding method of initial dates] // Voprosy Heksperimental’nogo issledovaniya skorosti reagirovaniya: sbornik [The equations of the experimental investigation of the reacting speed: compendium]. — Tartu, 1971 (in Russian).

Котик М. Л. Курс инженерной психологии. — Таллин: Валгус, 1978.

Kotik M. L. Kurs inzgenernoj psihologii [The course of the engineering psychology]. — Tallin: Valgus, 1978 (in Russian).

Крылов А. А. Организация целостной деятельности функциональных механизмов обработки информации. Хрестоматия по инженерной психологии. — М.: Высшая школа, 1991.

Krylov A. A. Organizaciya celostnoj deyatel’nosty funkcional’nyh mehanozmov obrabotki informacii. hrestomatiya po inzgenernoj psihologii [The organization of the whole activity of the functional mechanisms in the information processing. The Reader at the engineering psychology]. — Moscow: Vysshaya shkola, 1991 (in Russian).

Материалы по психологии. Psychology OnLine.Net [Электронный ресурс]. — URL: http://www.psychology-online.net/ (дата обращения: 08.04.2019).

Materialy po psikhologii. Psychology OnLine.Net [Electronic resource]. — URL: http://www.psychology-online.net/ (accessed: 08.04.2019).

Психологическая энциклопедия. Инженерная психология [Электронный ресурс]. — URL: http://wiki.1vc0.ru/enciklopediya/psixologiya/otrasli-psixologii/inzhenernaya-psixologiya.html (дата обращения: 10.09.2018).

Psihologicheskaya enciklopediya. Psychological encyclopaedia [Electronic resource]. — URL: http://wiki.1vc0.ru/enciklopediya/psixologiya/otrasli-psixologii/inzhenernaya-psixologiya.html (accessed: 10.09.2018).

Суходольский Г. В. К вопросу о формировании у человека-оператора навыка слежения за движущейся целью // Проблемы общей и инженерной психологии. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1964. — С. 80–89.

Suhodolsky G. V. K voprosu o formirovanii u cheloveka-operatora navyka slezgeniya za dvizgutshejsya cel’yu [The problem of the forming the habit of the moving target watch at the man-operator] // Problemy obtshej i ingenernoj psihologii [The problems of the common and engineering psychology]. — Leningrad: LGU, 1964. — P. 80–89 (in Russian).

Fischer R., Plessow F. Efficient multitasking: parallel versus serial processing of multiple tasks // Front Psychol. — 2015. — Vol. 6. — P. 1366. — DOI:10.3389/fpsyg.2015.01366. — URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4561751 (accessed: 20.10.2018).

Georgiou H. V. Estimating the intrinsic dimension in fMRI space via dataset fractal analysis — Counting the 'cpu cores' of the human brain // Submitted on 27 Oct 2014. — URL: https://arxiv.org/abs/1410.7100 (accessed: 20.10.2018).

Koganov A. V., Rakcheeva T. A. Tests of Parallel Information Processing on the Basis of Algebra and Formal Automata // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2017. — Vol. 658. — Advances in Artificial Systems for Medicine and Education; Series editor Janusz Kacprzyk, Polish Academy of Sciences, Springer, Warsaw, Poland. — P. 68–78.

Sigman M., Dehaene S. Brain Mechanisms of Serial and Parallel Processing during Dual-Task Performance // Journal of Neuroscience. — 23 July 2008. — Vol. 28 (30). — P. 7585–7598. — DOI: https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0948-08.2008 (accessed: 19.10.2018).