

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

## Сравнительный анализ адаптации человека к росту объема зрительной информации в задачах распознавания формальных символов и содержательных изображений

А. В. Коганов<sup>1,а</sup>, Т. А. Ракчеева<sup>2</sup>, Д. И. Приходько<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Россия, 117218, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36, корп. 1

<sup>2</sup> Имаш РАН, Россия, 117334, г. Москва, ул. Бардина, д. 4

E-mail: <sup>а</sup>akoganov@yandex.ru

*Получено 23.11.2020, после доработки — 14.02.2021.*

*Принято к публикации 15.03.2021.*

Мы описываем инженерно-психологический эксперимент, продолжающий исследование способов адаптации человека к росту сложности логических задач методом предъявления серий задач нарастающей сложности, которая определяется объемом исходных данных. Задачи требуют вычислений в ассоциативной или неассоциативной системе операций. По характеру изменения времени решения задачи в зависимости от числа необходимых операций можно делать вывод о чисто последовательном способе решения задач или о подключении к решению дополнительных ресурсов мозга в параллельном режиме. В ранее опубликованной экспериментальной работе человек в процессе решения ассоциативной задачи распознавал цветные картинки с содержательными изображениями. В новом исследовании аналогичная задача решается для абстрактных монохромных геометрических фигур. Анализ результата показал, что для второго случая значительно снижается вероятность перехода испытуемого на параллельный способ обработки зрительной информации. Метод исследования основан на предъявлении человеку задач двух типов. Один тип задач содержит ассоциативные вычисления и допускает параллельный алгоритм решения. Другой тип задач контрольный, содержит задачи, в которых вычисления неассоциативные и параллельные алгоритмы решения неэффективны. Задача распознавания и поиска заданного объекта ассоциативна. Параллельная стратегия значительно ускоряет решение при сравнительно малых дополнительных затратах ресурсов. В качестве контрольной серии задач (для отделения параллельной работы от ускорения последовательного алгоритма) используется, как и в предыдущем эксперименте, неассоциативная задача сравнения в циклической арифметике, представленной в наглядной форме игры «камень, ножницы, бумага». В этой задаче параллельный алгоритм требует работы большого числа процессоров с малым коэффициентом эффективности. Поэтому переход человека на параллельный алгоритм решения этой задачи практически исключен и ускорение обработки входной информации возможно только путем повышения быстродействия. Сравнение зависимости времени решения от объема исходных данных для двух типов задач позволяет выявить четыре типа стратегий адаптации к росту сложности задачи: равномерная последовательная, ускоренная последовательная, параллельные вычисления (там, где это возможно) или неопределенная (для данного метода) стратегия. Уменьшение части испытуемых, которые переходят на параллельную стратегию при кодировании входной информации формальными изображениями, показывает эффективность кодов, вызывающих предметные ассоциации. Они повышают скорость восприятия и переработки информации человеком. Статья содержит предварительную математическую модель, которая объясняет это явление. Она основана на появлении второго набора исходных данных, который возникает у человека в результате узнавания изображенных предметов.

Ключевые слова: параллельные вычисления, инженерная психология, тестирование, алгебра, ассоциативность, распознавание визуальных образов

Работа выполнена по теме государственного задания научно-исследовательских работ № 0065-2019-0007.

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

## Comparative analysis of human adaptation to the growth of visual information in the tasks of recognizing formal symbols and meaningful images

A. V. Koganov<sup>1,a</sup>, T. A. Rakcheeva<sup>2</sup>, D. I. Prihodko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> FGU FNC NIISI RAN, 36/1 Nakhimovsky st., Moscow, 117218, Russia

<sup>2</sup> IMash RAN, 4 Bardina st., 117334, Moscow, Russia

E-mail: <sup>a</sup>akoganov@yandex.ru

*Received 23.11.2020, after completion — 14.02.2021.*

*Accepted for publication 15.03.2021.*

We describe an engineering-psychological experiment that continues the study of ways to adapt a person to the increasing complexity of logical problems by presenting a series of problems of increasing complexity, which is determined by the volume of initial data. Tasks require calculations in an associative or non-associative system of operations. By the nature of the change in the time of solving the problem, depending on the number of necessary operations, we can conclude that a purely sequential method of solving problems or connecting additional brain resources to the solution in parallel mode. In a previously published experimental work, a person in the process of solving an associative problem recognized color images with meaningful images. In the new study, a similar problem is solved for abstract monochrome geometric shapes. Analysis of the result showed that for the second case, the probability of the subject switching to a parallel method of processing visual information is significantly reduced. The research method is based on presenting a person with two types of tasks. One type of problem contains associative calculations and allows a parallel solution algorithm. Another type of problem is the control one, which contains problems in which calculations are not associative and parallel algorithms are ineffective. The task of recognizing and searching for a given object is associative. A parallel strategy significantly speeds up the solution with relatively small additional resources. As a control series of problems (to separate parallel work from the acceleration of a sequential algorithm), we use, as in the previous experiment, a non-associative comparison problem in cyclic arithmetic, presented in the visual form of the game “rock, paper, scissors”. In this problem, the parallel algorithm requires a large number of processors with a small efficiency coefficient. Therefore, the transition of a person to a parallel algorithm for solving this problem is almost impossible, and the acceleration of processing input information is possible only by increasing the speed. Comparing the dependence of the solution time on the volume of source data for two types of problems allows us to identify four types of strategies for adapting to the increasing complexity of the problem: uniform sequential, accelerated sequential, parallel computing (where possible), or undefined (for this method) strategy. The Reducing of the number of subjects, who switch to a parallel strategy when encoding input information with formal images, shows the effectiveness of codes that cause subject associations. They increase the speed of human perception and processing of information. The article contains a preliminary mathematical model that explains this phenomenon. It is based on the appearance of a second set of initial data, which occurs in a person as a result of recognizing the depicted objects.

Keywords: parallel computing, engineering psychology, testing, algebra, associativity, visual image recognition

The work was performed on the topic 0065-2019-0007 of the state task of research works.

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2021, vol. 13, no. 3, pp. 571–586 (Russian).

## 1. Введение

Эта работа продолжает исследование, описанное в работах [Коганов, 2001, 2010, 2017; Коганов и др., 2013, 2014, 2019; Koganov, Rakcheeva, 2017, 2018, 2019], где изучалась стратегия изменения способов решения человеком вычислительных задач в условиях роста сложности вычислений. Главное направление исследований состояло в определении способности человека при росте сложности вычислений переходить на параллельные вычисления, когда задача это допускала. Мы поставили инженерно-психологический эксперимент, где поставленная задача решалась методом предъявления серий задач нарастающей сложности. Эти задачи требуют вычислений в ассоциативной или неассоциативной системе операций. По характеру изменения времени решения задачи в зависимости от числа необходимых операций и их алгебраической ассоциативности можно делать вывод о чисто последовательном способе решения задач либо о подключении к решению дополнительных ресурсов мозга в параллельном режиме. Подробно данный метод исследования описан в работах [Коганов, 2001, 2010, 2017; Коганов, Ракчеева, 2018]. В ранее опубликованной экспериментальной работе [Коганов и др., 2019] человек в процессе решения ассоциативной задачи распознавал цветные картинки с содержательными изображениями.

Исследование того, как может меняться алгоритм решения однотипных задач при изменении сложности их исходных данных, имеет большое значение при разработке систем искусственного интеллекта. В работах этого направления, например в [Popov et al., 2010; Kant, 2012; Karamath Ali, Amalarethinam, 2013; Fischer, Plessow, 2015; Ajay, Singh, 2015; Tran, Le, 2015; Nandi et al., 2018; Marouf et al., 2019], важно не только научить машину решать некоторый класс задач, но и приблизить работу машины к способам решения аналогичных задач человеком. Для решения этой проблемы необходимо сочетать работы в области совершенствования технических систем с исследованиями в инженерной психологии.

В нашем новом исследовании аналогичная задача решается для абстрактных монохромных геометрических фигур. В математическом и логическом смысле обе задачи эквивалентны. Человек запоминает набор стандартных объектов, которые легко различимы визуально. Потом он получает таблицы с вариативным числом клеток, в каждой из которых стоит один из стандартных объектов, и должен определить, какой из этих объектов в таблице отсутствует, или установить, что все объекты имеются. Имеется гарантия, что отсутствует не более одного объекта. Такая задача допускает эффективное решение с параллельным анализом разных участков таблицы и с параллельным распознаванием разных объектов.

В качестве контрольной серии задач (для отделения параллельной работы от ускорения последовательного алгоритма) используется, как и в предыдущем эксперименте, неассоциативная задача сравнения в циклической арифметике, представленной в наглядной форме известной игры «камень, ножницы, бумага». Человек получал таблицу, в клетках которой нарисованы в случайном порядке камень, ножницы или лист бумаги. Эту таблицу следовало интерпретировать как одну строку с переносом по строкам, как в книге. Последовательно применяя правила «камень сильнее ножниц», «ножницы сильнее бумаги», «бумага сильнее камня», надо было определить «победителя» первой пары клеток, победителя между ним и следующей клеткой и так далее до последней клетки. Окончательный победитель является решением задачи.

В обеих задачах ответ выдавался в форме номера, присвоенного стандартному объекту в отдельной таблице, находящейся в поле зрения человека. Человек мог остановить отсчет времени, когда находил ответ в графической форме. При этом задача исчезала. После этого можно было искать номер ответа в таблице без изменения регистрируемого времени решения задачи.

Задачи предъявлялись на экране компьютера в стандартной форме. Необходимые команды «старт», «стоп», «запомнить ответ» формировались кликом мыши на соответствующую виртуальную кнопку. Набор ответа в каждой задаче и задание размера таблицы для серии задач производились клавиатурой.

Задачи в форме таблицы определенного размера предъявлялись сериями по 10 задач. Номер задачи в серии выводился на экран. Серий для каждой задачи было четыре, с размером таб-

лиц 8, 12, 16, 20. Далее размер таблицы будем называть сложностью задачи. Число необходимых операций распознавания и сравнения в обеих задачах пропорционально сложности. Первой предъявлялась неассоциативная задача «камень, ножницы, бумага».

Форма предъявления задач была стандартизована. Исходные данные задачи выдавались на экран компьютера в форме нескольких строк на специальном поле внутри диалогового окна. Окно содержало кнопки запуска новой задачи и секундомера (старт), остановки отсчета времени (стоп), окно ввода ответа и кнопку записи ответа в файл результатов, окно задания параметра задачи (число символов в исходных данных) и окно счетчика числа задач в серии с одним значением параметра. Схема окна интерфейса показана на рис. 1.

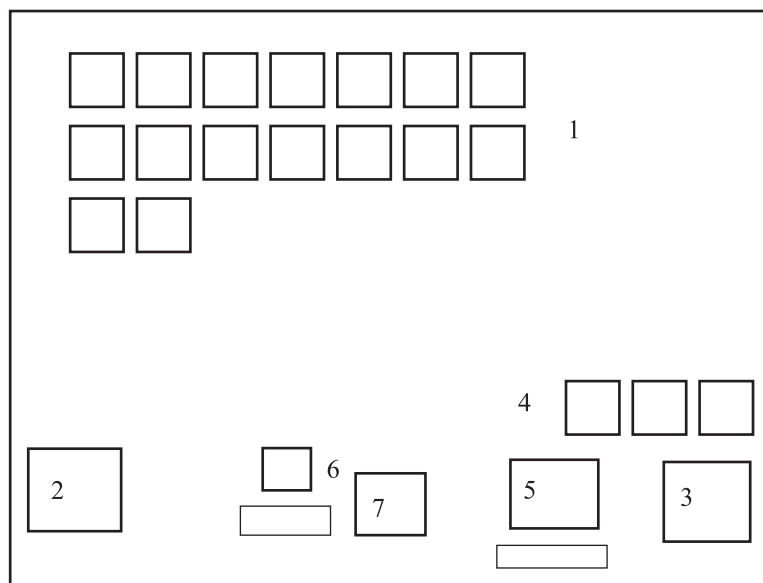


Рис. 1. Окно интерфейса: 1 — поле предъявления исходных данных задачи; 2 — кнопка «старт»; 3 — кнопка «стоп»; 4 — поле предъявления алфавита задачи с номерами символов для записи ответа; 5 — окно для записи ответа с кнопкой записи в файл; 6 — окно задания параметра серии задач с кнопкой записи; 7 — счетчик задач в текущей серии после последнего задания параметра

Авторы выражают благодарность сотрудникам и учащимся Российского государственного университета им. А. Н. Косыгина за содействие в постановке экспериментов.

## 2. Способ обработки результата эксперимента

В процессе эксперимента запоминались значения времени решения задачи. По каждой серии задач вычислялись среднее время решения и стандартное отклонение этого среднего. Далее мы будем называть два значения среднего времени решения строго различными, если не пересекаются их интервалы (плюс-минус стандартное отклонение), и условно различными, если каждое из них находится вне этого интервала партнера.

Если средние времена растут с ростом сложности в обеих задачах, то регистрируется равномерный последовательный способ решения в ассоциативной задаче. Если в неассоциативной задаче время растет, а в ассоциативной задаче нет достоверного (строго или условно) роста времени, то регистрируется параллельный способ решения ассоциативной задачи. Если нет достоверного роста в обеих задачах, то регистрируется последовательное решение обеих задач с ускорением вычислений по мере роста сложности. Если нет достоверного роста в неассоциативной задаче, но есть рост среднего времени в ассоциативной задаче, то регистрируется наличие существенных помех в эксперименте (неадекватность результата).

Математическая мотивировка такой системы обработки данных дана в работах [Коганов, 2001, 2010; Koganov, Rakcheeva, 2017, 2018].

Если мозг человека последовательно выполняет стандартные операции при неизменном быстродействии, то время решения задачи растет пропорционально числу необходимых для решения операций (сложность задачи).

Если рост числа операций влечет сокращение времени выполнения одной операции (рост скорости счета), то прирост времени решения задачи уменьшается по мере роста сложности задачи. Кривая времени решения (как функции сложности) в этом случае выпукла снизу. Это свойство не зависит от структуры задачи.

Если задача допускает эффективное параллельное выполнение нескольких операций одновременно, то возможно наблюдать выпуклую снизу зависимость времени решения от сложности задачи без роста скорости вычислений одной операции. При этом на задачах, которые не допускают эффективного параллельного счета, рост времени остается линейным по сложности.

В работах [Коганов, 2001, 2010] показано, что вычисления в ассоциативной алгебре могут осуществляться в параллельном режиме, с высокой загрузкой всех процессоров. Параллельные вычисления в неассоциативной алгебре требуют использования большого числа процессоров с низким коэффициентом полезного процессорного времени. Поэтому реализация одновременного выполнения нескольких операций для таких задач невыгодна с энергетической точки зрения. Этот математический аппарат положен в основу серии проведенных экспериментов.

Формула (2.1) показывает, как в алгебре с ассоциативной операцией  $\circ$  за счет параллельного счета три этапа вычислений сокращаются до двух. Этапы соответствуют уровням вложенности скобок. В неассоциативной алгебре такая декомпозиция невозможна.

$$(((x_1 \circ x_2) \circ x_3) \circ x_4) = ((x_1 \circ x_2) \circ (x_3 \circ x_4)). \quad (2.1)$$

Это означает, что вместо трех последовательных применений бинарной операции к четырем операндам можно на первом этапе выполнить независимо операции с первыми двумя операндами и с последними двумя операндами, а потом, на втором этапе, применить ту же операцию к результатам этих действий.

$$\begin{aligned} y &= x_1 \circ x_2 \quad (\text{этап 1}), \\ z &= x_3 \circ x_4 \quad (\text{этап 1, параллельно}), \\ r &= y \circ z \quad (\text{этап 2, результат}). \end{aligned}$$

Ассоциативность допускает такую редукцию вычислений, поскольку

$$r = (y \circ x_3) \circ x_4 \stackrel{\text{assoc}}{=} y \circ (x_3 \circ x_4) = y \circ z.$$

При последовательном счете требуется три последовательных применения операции:

$$y = x_1 \circ x_2, \quad z = y \circ x_3, \quad r = z \circ x_4.$$

Для неассоциативной операции возможна только такая стратегия вычислений. Редукция невозможна, поскольку в общем случае

$$r = (y \circ x_3) \circ x_4 \neq y \circ (x_3 \circ x_4).$$

В реальном эксперименте на время решения задачи влияют случайные факторы, связанные с неизбежным поступлением в мозг человека посторонних сигналов. Источники этих воздействий могут находиться как в окружающей среде, так и в организме человека. Кроме того, случайное формирование исходных данных порождает задачи разной трудности восприятия. Задачи, например, могут отличаться разнообразием символов в исходных данных. Поэтому необходимо предъявлять серию задач одной сложности и вычислять среднее время решения и стандартное отклонение этого среднего.

Подробный анализ эффективности алгебраических вычислений параллельными алгоритмами в условиях наличия или отсутствия ассоциативности операции дан в работах [Коганов, 2001, 2010].

### 3. Анализ предварительных результатов

В настоящее время мы провели предварительный эксперимент, целью которого было испытание нового математического обеспечения и выявление особенностей восприятия человеком задач нового типа. На этом этапе в эксперименте приняли участие две группы по четыре человека. Группы отличались условиями проведения опыта. Первая группа проходила испытание в одном помещении (аудитория университета) и на одном компьютере. Вторая группа испытуемых работала в привычной обстановке на своих компьютерах.

Задача поиска отсутствующего объекта по своей природе относится к ассоциативным вычислениям. В качестве операции можно использовать бинарную операцию сравнения:

$$f(x, y) = \begin{cases} 1, & \Leftarrow x = y, \\ 0, & \Leftarrow x \neq y, \end{cases} \quad (3.1)$$

где аргументы принимают значения из заданного алфавита, включающего дополнительно служебные знаки 0 и 1.

Последовательный способ решения задачи в алфавите основных символов  $A = \{a_1; \dots; a_M\}$  в последовательности (в таблице)  $B = (b_1, \dots, b_N)$ , где  $b_i \in A$ ,  $i = 1, \dots, N$ , может быть записан так:

$$\begin{aligned} x_1 &= \max \{f(b_1, a_1); \dots; f(b_N, a_1)\}; \\ &\dots \\ x_M &= \max \{f(b_1, a_M); \dots; f(b_N, a_M)\}; \\ j &= \arg \min \{x_1; \dots; x_M\}; \\ result &= a_j. \end{aligned}$$

Поскольку функция максимума ассоциативная, то каждый из параметров  $x_i$  может вычисляться параллельным алгоритмом, и сами эти параметры можно вычислять одновременно.

Последний оператор поиска номера  $x_j$  с нулевым значением, вообще говоря, вычисляется последовательно. Но у него фиксированное число аргументов, равное  $M$  — величине алфавита. Поэтому время его выполнения входит в общее время решения задачи как константа и не влияет на тенденцию зависимости времени от объема таблицы  $N$  исходных данных.

Кроме того, важно, что операция поиска максимума среди нулей и единиц очень простая для человека. Поэтому вероятность формирования параллельного блока таких операций вполне вероятна.

В задаче «камень, ножницы, бумага» действует операция циклического сравнения  $\sim$ , которая неассоциативная.

$$\begin{aligned} K &> H > B > K, \\ (K \sim H) \sim B &= K \sim B = B, \\ K \sim (H \sim B) &= K \sim H = K. \end{aligned}$$

Эту задачу можно решать только последовательно.

Анализ результатов показал, что для нового варианта объектов (абстрактные монохроматические фигуры) значительно снижается вероятность перехода испытуемого на параллельный способ обработки зрительной информации в сравнении с предыдущим опытом, где испытуемые распознавали цветные содержательные образы. В эксперименте с содержательными изображениями все испытуемые (8 человек) показали параллельный способ решения ассоциативной задачи.

В новом эксперименте данные кодировались рисунками камня, ножниц и бумаги в неассоциативной задаче (рис. 2) и набором геометрических фигур в ассоциативной задаче (рис. 3).



Рис. 2. Кодировка данных для задачи «камень, ножницы, бумага». Используются реалистические образы соответствующих предметов

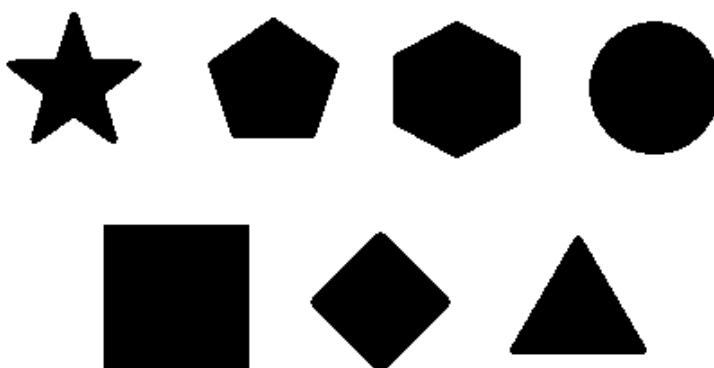


Рис. 3. Кодировка данных в задаче поиска отсутствующего объекта для нового эксперимента. Используются абстрактные геометрические фигуры

Неассоциативная задача точно совпадает с задачей, использованной в предыдущем эксперименте. В обоих экспериментах кодировка неассоциативной задачи использовала рисунки с образной интерпретацией. Для ассоциативной задачи в первом эксперименте использовалась кодировка данных распознаваемыми образами известных реальных объектов (паровоз, дерево, дом, лошадь, корабль, автомобиль). Эти иконки показаны на рис. 4. Поэтому отказ нескольких испытуемых в новом эксперименте от стратегии адаптации к росту сложности задачи путем параллельных вычислений, вероятно, связан с разными способами кодировок информации в задаче распознавания отсутствующего объекта.

Результаты эксперимента с первой группой представлены в таблице 1 и на рис. 5.

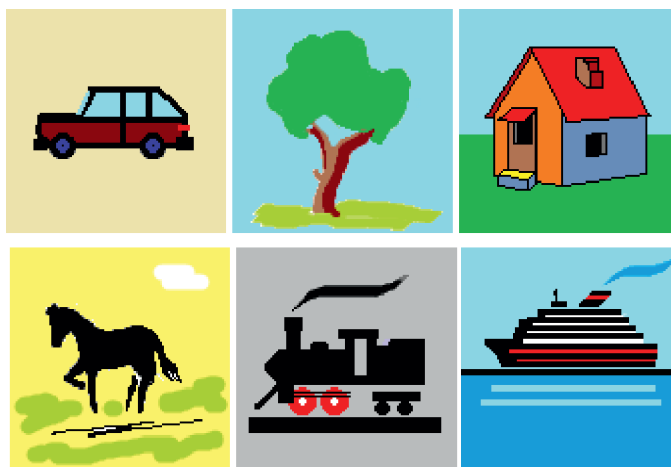


Рис. 4. Кодировка данных в задаче поиска отсутствующего предмета. Используются реалистические изображения узнаваемых предметов

Таблица 1. Средние времена решения серий задач

Ассоциативная задача Associative task			Неассоциативная задача Nonassociative task		Испытуемый Persona
Длина строки String length	$t_{cp}$ . Среднее время (с) The average time (s)	sig. Стандартное отклонение среднего (с) The standard deviation of the mean (s)	$t_{cp}$ . Среднее время (с) The average time (s)	sig. Стандартное отклонение среднего (с) The standard deviation of the mean (s)	Код испытуемого Personal code
8	6,1	1,02	4,8	0,51	ИС1 PS1
12	6,4	0,79	10,5	1,07	
16	7,9	0,79	10,9	0,94	
20	8,2	1,03	16,5	1,24	
8	5,5	1,09	5,3	0,45	ИС2 PS2
12	7,5	0,64	5,5	0,83	
16	7,8	1,12	11,1	1,57	
20	8,2	0,54	9,0	1,26	
8	9,5	0,67	7,5	1,09	ИС3 PS3
12	9,3	0,65	10,4	1,47	
16	10,6	0,60	12,1	0,98	
20	10,4	1,44	14,0	0,92	
8	5,4	0,86	11,9	1,26	ИС4 PS4
12	5,0	1,10	12,0	1,28	
16	5,9	0,74	15,8	2,26	
20	6,9	0,84	17,3	1,63	

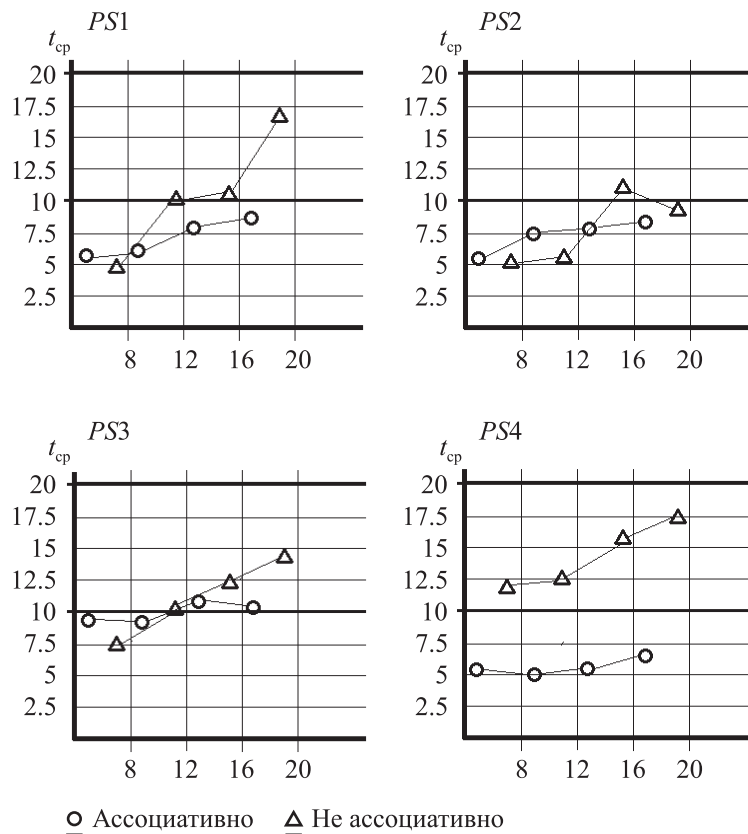


Рис. 5. Зависимость среднего времени решения задачи от сложности задачи. На каждом графике сведены данные по двум (ассоциативной и неассоциативной) задачам. Графики ИС1 и ИС2 соответствуют последовательному способу решения обеих задач. Графики ИС3 и ИС4 соответствуют параллельному решению ассоциативной задачи



В новом эксперименте двое испытуемых из первой группы (ИС1, ИС2) показали последовательное решение обеих задач. Из них один (ИС2) показал возможное ускорение в неассоциативной задаче. Два человека (ИС3, ИС4) показали параллельный способ решения ассоциативной задачи с равномерным последовательным решением неассоциативного теста.

Во второй группе все испытуемые показали параллельный способ решения ассоциативной задачи (среднее время решения серии задач одной сложности было постоянным по сложности, с точностью до стандартного отклонения). Но двое (P19.5 и P19.8) показали недостоверные результаты в решении неассоциативной задачи. У испытуемого P19.5 был разовый выброс на одной серии при общей положительной монотонности по остальным сериям. Отбросив этот случай, можно условно зафиксировать параллельный способ решения ассоциативной задачи. У испытуемого P19.8 кроме аномально большого выброса была отрицательная монотонность по остальным сериям задач. Поэтому достоверно зарегистрировать параллельный способ решения ассоциативных задач удалось только для двух испытуемых P19.6 и P19.7. Эти результаты показаны в таблице 2 и на рис. 6.

Таблица 2. Данные для второй группы испытуемых (работа в домашних условиях)

Тест «ABSENT» (поиск отсутствующего элемента)				
Персональные коды	$N =$ = длина строки данных	$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1, N} t_i$	$\sigma\{t\} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - E)^2}{N - 1}}$	$\sigma\{T_{av}\} = \frac{\sigma\{t\}}{\sqrt{N}}$
P19.5	8	8.0	3.9441	1.2472
	12	8.5	1.2472	0.3944
	16	8.0	1.8257	0.5773
	20	9.0	2.0	0.6325
P19.6	8	11.1818	2.7136	0.8581
	12	10.3	3.1287	0.9894
	16	8.6667	3.0822	0.9747
	20	9.7	4.1913	1.3254
P19.7	8	5.2	1.0328	0.3266
	12	8.5455	6.6987	2.1183
	16	6.2	3.1903	1.0089
	20	6.1	1.2867	0.4069
P19.8	8	14	7.6884	2.4313
	12	8.1	4.6536	1.4716
	16	14.4	11.6924	3.6974
	20	11.9	5.1088	1.6155

Тест КНБ (камень, ножницы, бумага)				
Персональные коды	$N =$ = длина строки данных	$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1, N} t_i$	$\sigma\{t\} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - E)^2}{N - 1}}$	$\sigma\{T_{av}\} = \frac{\sigma\{t\}}{\sqrt{N}}$
P19.5	8	7.4	1.7764	0.5617
	12	9.6	0.9661	0.3055
	16	15.2	13.0111	4.1144
	16 (кор)	12 (без задачи 1)	2.6926	0.8515
	20	12.8	2.4855	0.7860
P19.6	8	3.9	0.9944	0.3145
	12	5.8	0.6325	0.2000
	16	9.6	5.5418	1.7525
	20	10.2	2.2998	0.7273

Таблица 2. Данные для второй группы испытуемых (работа в домашних условиях) (окончание)

Персональные коды	$N =$ = длина строки данных	$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1, N} t_i$	$\sigma\{t\} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - E)^2}{N - 1}}$	$\sigma\{T_{av}\} = \frac{\sigma\{t\}}{\sqrt{N}}$
P19.7	8	5.3	1.7029	0.5385
	12	6.5	2.273	0.7188
	16	8.6	2.1705	0.6864
	20	9.2	3.3928	1.0729
P19.8	8	26.5	17.7404	5.6100
	12	58.1 (?)	60.6309 (?)	19.1730 (?)
	16	16.9	10.4185	3.2946
	20	12	4.5704	1.4453

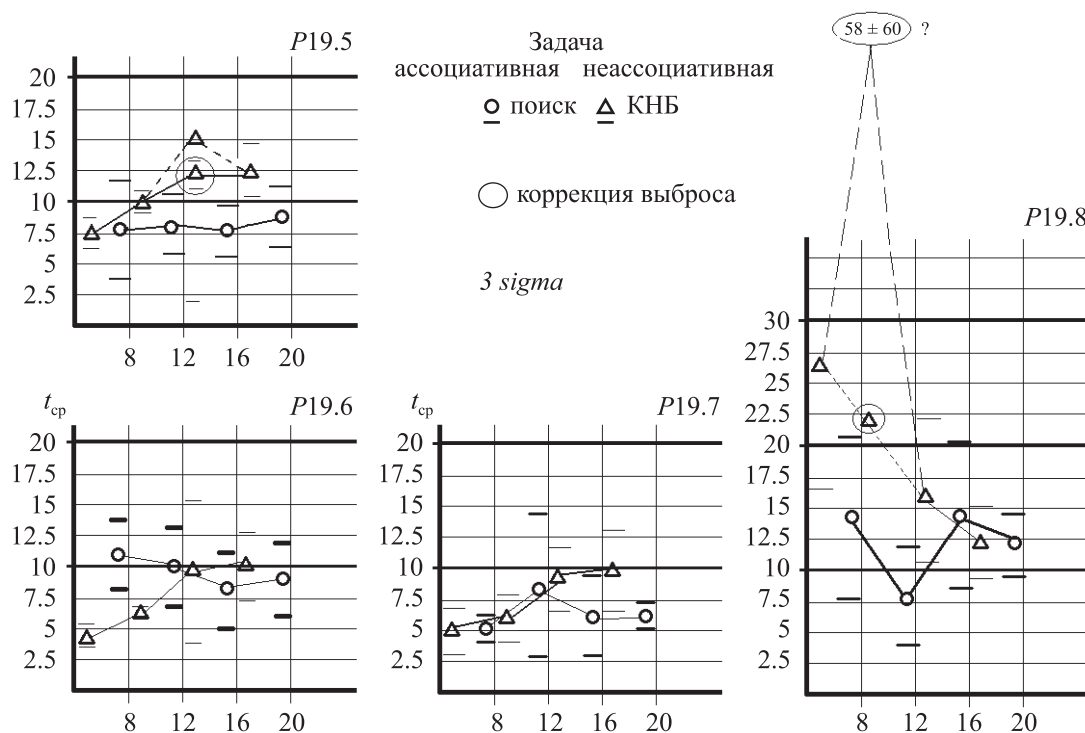


Рис. 6. Зависимость среднего времени решения задачи от сложности задачи для второй группы. На каждом графике сведены данные по двум (ассоциативной и неассоциативной) задачам. Графики P19.6, P19.7 и (условно) P19.5 соответствуют параллельному решению ассоциативной задачи. График P19.8 соответствует недостоверным данным о способе решения (вероятно, недостаточная тренировка перед основными сериями)

Для сравнения двух экспериментов мы покажем несколько диаграмм, соответствующих распознаванию изображений известных предметов (рис. 7).

#### 4. Математическая модель выбора стратегии вычислений

Проведенный выше анализ позволяет высказать предположение, что наличие образной интерпретации входной информации облегчает переход человека к параллельным вычислениям. При этом человек не осознает этот процесс. Видимо, имеются врожденные структуры центральной нервной системы, которые создают параллельные механизмы обработки информации для работы с узнаваемыми реальными предметами.

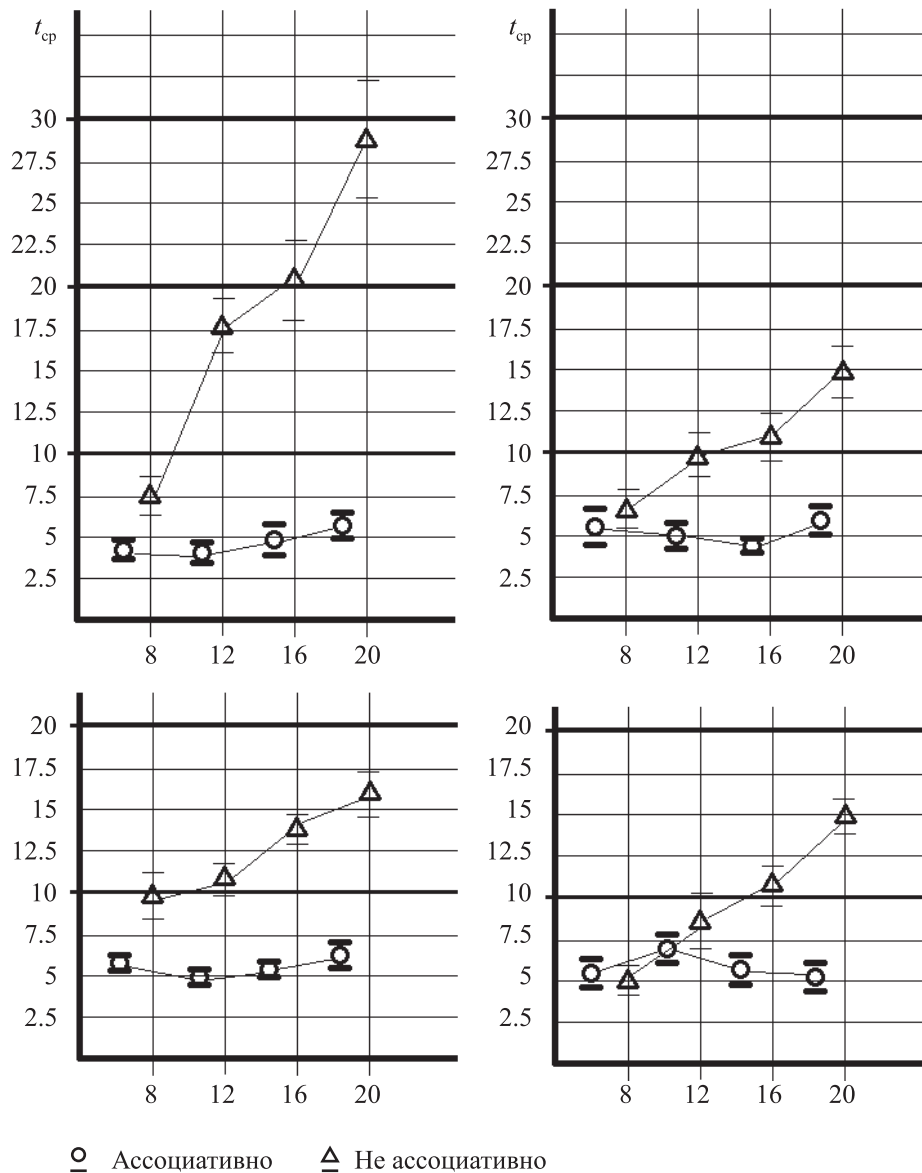


Рис. 7. Диаграммы среднего времени решения задач с распознаванием реалистических изображений. У всех испытуемых в задаче поиска отсутствующего предмета наблюдалась стратегия адаптации к росту сложности путем параллельных вычислений

Мы попробуем построить математическую модель работы такой структуры для решения описанных выше задач. Первичная информация попадает на зрительные рецепторы человека (блок А). Потом она возбуждает работу первичных анализаторов мозга, работающих, вероятно, в подкорковых областях мозга (блок В). Обработанный сигнал поступает в кору, где распознаются символы исходных данных поступившей задачи (блок D). Эти данные передаются в структуру коры, которая возникла в процессе обучения и тренировки для решения задачи (процессорный блок Е). Выходной сигнал этой структуры поступает в область выходных нейронов, вызывающих работу эффекторов, выдающих результат во внешнюю среду (блок F). Эта схема представлена на рис. 8. Поскольку процессорный блок Е имеет чисто логическую структуру, для него, вероятно, характерна последовательная организация вычислений.

Эту структуру можно представить схемой последовательной стратегии (EF):

$$A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F.$$

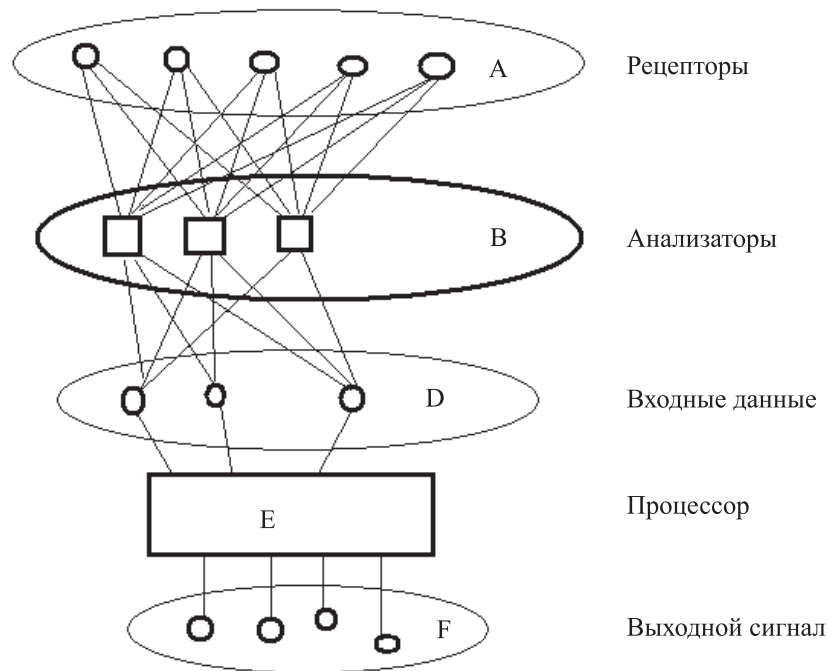


Рис. 8. Схема однопроцессорной организации вычислений в мозге человека: А — сигнал от зрительных рецепторов; В — первичные анализаторы; D — распознавание символов исходных данных задачи; E — процессор для решения задачи в коре головного мозга; F — выходные нейроны для регистрации результата

В том случае, когда входная информация имеет дополнительно интерпретацию в форме распознавания известных человеку объектов, параллельно включается дополнительная обработка данных, проводящая это распознавание (блок С). Эта система, показанная на рис. 9, работает независимо от того, какую задачу решает человек с исходными данными.

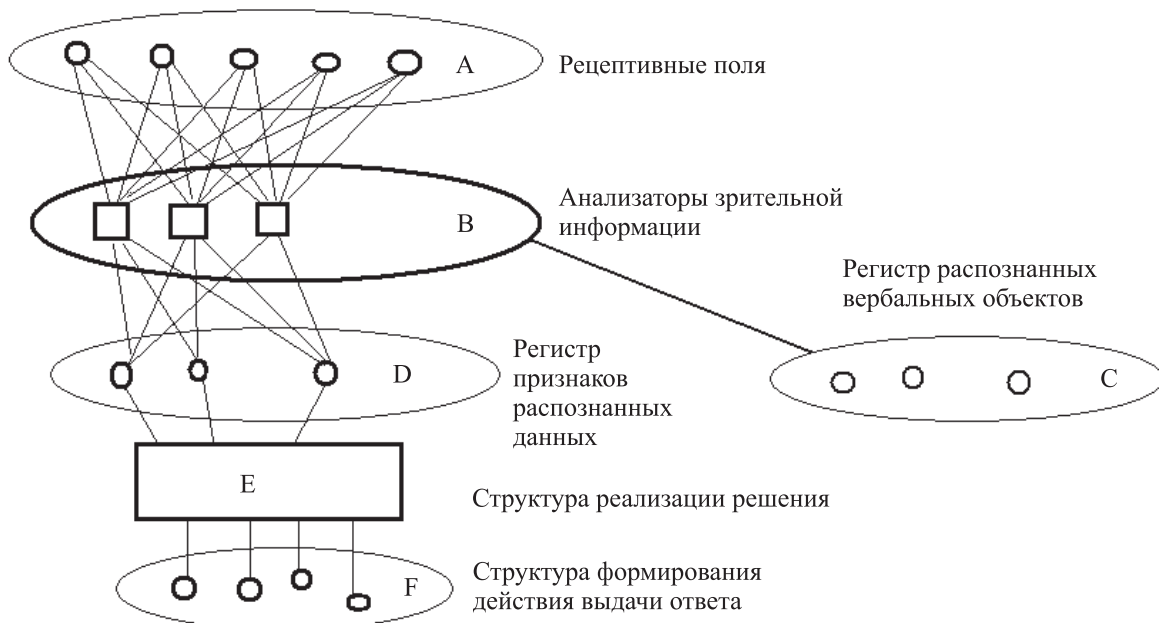
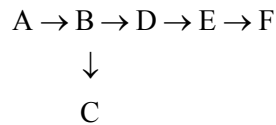


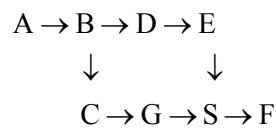
Рис. 9. Формирование последовательного алгоритма решения в случае содержательной кодировки данных с одновременным формированием регистра С вербальной интерпретации исходной сенсорной информации

Последовательная стратегия с параллельным вербальным распознаванием исходных данных (EW) представлена схемой



В том случае, когда сложность задачи становится большой, мозг может использовать этот параллельный процесс для ускорения обработки данных. Тогда ранее вербально идентифицированные в распознавании объекты начинают восприниматься как дубликат исходных данных. Для их обработки создается дубликат процессора, решающего задачу (блок G). Каждый из процессоров E и G теперь может обработать свою часть данных и выдать их на третий процессор, который формирует окончательный результат из частей (блок синтеза S). Таким образом, реализуется параллельная схема вычислений. Этот процесс показан на рис. 10.

Схема параллельной стратегии (SF):



Формирование блоков G и S происходит не обязательно. Поэтому не всегда должны наблюдаться параллельные вычисления для образной кодировки данных.

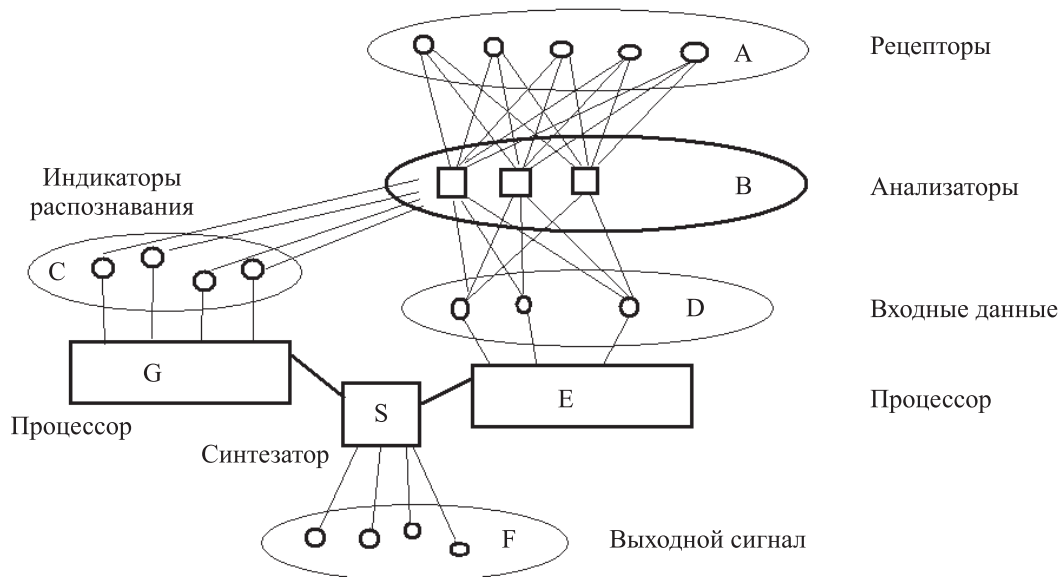


Рис. 10. Схема многопроцессорной реализации вычислений с использованием распознавания объектов, изображенных на входных символах; возникают дополнительные функциональные блоки: С — распознавание изображенных объектов; G — процессоры для решения задачи на данных распознавания; S — синтезатор результатов всех процессоров для выработки общего результата. Остальные блоки совпадают с описанием на рис. 8

На основе полученной модели рассмотрим вопрос, когда формирование параллельного алгоритма решения задачи эффективно. Из схемы на рис. 9 видно, что при малом объеме исходных данных переходить к параллельному счету не выгодно. Использование двух последовательных процессоров (E + G) × S в этом случае замедляет решение задачи. Кроме того, работа трех процессоров требует больших энергетических затрат.

В тех случаях, когда вычисления неассоциативные, даже при большом объеме вычислений многопроцессорная стратегия невыгодна. Для сокращения времени решения приходится вво-

дить большое число процессоров с очень малым коэффициентом полезного процессорного времени [Коганов, 2001, 2010]. Поэтому за ускорение решения приходится платить очень большими затратами энергии нервной системы. Это объясняет последовательное решение задач неассоциативного типа, которое наблюдалось во всех экспериментах.

В тех случаях, когда можно существенно сократить время решения задачи с относительно небольшими дополнительными затратами ресурсов энергии и нервного напряжения, параллельная стратегия выгодна и наблюдается в экспериментах.

Эти рассуждения позволяют построить следующую модель подсознательного выбора человеком алгоритма вычисления. Пусть  $T_{EF} = T_{EW}$  и  $T_{SF}$  — среднее время решения задач по схемам  $EF$  (или  $EW$ ) и  $SF$  соответственно;  $R_{EF}$ ,  $R_{EW}$  и  $R_{SF}$  — соответствующие затраты ресурсов нервной системы на реализацию алгоритма. В качестве меры ресурса можно принять средние затраты энергии на одну задачу. Человек в этой модели характеризуется двумя коэффициентами чувствительности к параметрам времени и ресурса  $a_T$  и  $a_R$  соответственно. Формируется целевая функция, которую человек стремится минимизировать:

$$\Phi(T, R) = a_T T + a_R R. \quad (4.1)$$

Решение об однопроцессорном (последовательном) алгоритме принимается в тех случаях, когда  $\Phi(T_{EF}, R_{EF}) \leq \Phi(T_{SF}, R_{SF})$  или  $\Phi(T_{EF}, R_{EW}) \leq \Phi(T_{SF}, R_{SF})$ , иначе формируется параллельный алгоритм. Это условие выбора однопроцессорной стратегии соответствует неравенствам

$$\Delta\Phi = a_T (T_{EF} - T_{SF}) + a_R (R_{EF} - R_{SF}) \leq 0, \quad (4.2)$$

$$\Delta\Phi = a_T (T_{EF} - T_{SF}) + a_R (R_{EW} - R_{SF}) \leq 0. \quad (4.3)$$

В случае равенства нулю выбирается однопроцессорная стратегия, поскольку она не требует дополнительной работы по перестройке алгоритма. Эта модель позволяет объяснить, почему разные люди имеют разные стратегии (у них разные коэффициенты чувствительности) и почему в случае кодировки с узнаваемыми образами выше процент людей, выбирающих параллельную стратегию, когда это возможно. В этом случае  $R_{EF} < R_{EW}$ , поскольку блок С уже сформирован и работает независимо от выбора стратегии, и поэтому меньше разница затрат ресурсов  $R_{EF} - R_{SF} < R_{EW} - R_{SF}$ . Таким образом, неравенство (4.3) нарушается при меньших значениях  $T_{EF} - T_{SF}$  выигрыша во времени решения задачи по сравнению с неравенством (4.2).

Данная модель дает только качественное объяснение наблюдаемой закономерности. Для количественного использования не хватает данных о реальных затратах энергии на формирование алгоритма решения предложенных задач. Тем не менее она показывает, в каком направлении следует искать объяснение эффективности содержательной кодировки информации, когда требуется обеспечить быструю и точную реакцию человека на сообщение. К этому выводу независимо пришли разработчики всевозможных сигнальных систем, таких как дорожные знаки, иконки вызова программ в операционных системах, учебные наглядные пособия, иллюстрации, реклама, вывески и другие.

## 5. Заключение

Эксперимент показал, что при решении логических задач с абстрактными геометрическими монохроматическими фигурами человек использует последовательный способ решения существенно чаще, чем при решении аналогичных задач с содержательными цветными изображениями.

Возможно, с этим явлением связано предпочтительное использование рисунков узнаваемых предметов на дорожных и ориентировочных знаках, а также в рекламе и компьютерных иконках.

Методика выявления параллельных способов решения задачи оказалась эффективной еще и для анализа предпочтительных форм кодировок операционной информации.

Природа этого явления пока не совсем ясна. Возможно, для реалистических изображений в мозгу имеется особый врожденный механизм распознавания, который физиологически приспособлен к параллельной работе. Но для абстрактных изображений этот механизм не включается в работу, и распознавание ведется универсальной логической системой, которая труднее переводится на параллельные вычисления. Это явление требует дальнейших исследований.

Построена математическая модель выбора алгоритма решения задачи, которая на качественном уровне объясняет факт различия в стратегиях адаптации к сложности задачи у разных людей и эффект увеличения процента людей, выбирающих параллельный алгоритм при образной кодировке исходных данных. Модель сформирована в терминах общих функциональных блоков. Перенос этой модели на конструкцию нейронной сети или на известные зоны головного мозга требует дополнительных исследований на уровне эксперимента и математического моделирования.

## Список литературы (References)

- 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. ИПУ РАН, М., 2001.  
*Koganov A. V.* Issledovanie vozmozhnosti parallel'nogo vypolneniya logicheskikh operacij chelovekom. Parallel'nye vychisleniya 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 mezhdunarodnoj konferencii PACO-2001 [The works of The international conference PACO-2001], Moscow, 2–4 October 2001, on compact-disk, IPU RAN, Moscow, 2001 (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.* Rastushchie inductornye prostranstva i analisis parallelnyh algoritmov [The growing inductor spaces and the analysis of the parallel algorithms] // Programmnye producty i sistemy, prilozhenie k mezhdunarodnomu 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 logicheskikh vychislenij, osnovannye na algebre i avtomatah [Tests for checking the parallel organization of the logical calculation on the Basis of Algebra and Automata] // Computer Research and Modeling. — 2017. — Vol. 9, No. 4. — P. 621–638 (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 vozmozhnosti 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] // Computer Research and Modeling. — 2013. — Vol. 5, No. 5. — P. 845–861 (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 traektorii s ravnomernym raspredeleniem otvetov [The task of the calculation of the trajectory with homogenous the distribution of solutions] // Computer Research and Modeling. — 2014. — Vol. 6, No. 5. — P. 803–828 (in Russian).
- Коганов А. В., Ракчеева Т. А., Приходько Д. И.* Экспериментальное выявление организации мысленных вычислений человека на основе алгебр разной ассоциативности // Компьютерные исследования и моделирование. — 2019. — Т. 11, № 2. — С. 311–327.

- Koganov A. V., Rakcheeva T. A., Prihodko D. I.* Eksperimental'noe viyavlenie organizacii myslennyh vychislenij cheloveka na osnove algebr raznoj asociativnosti [Experimental Detection of the Mental Calculations organization of Person on the Basis of Two Algebras Having Different Associativity? ] // Computer Research and Modeling. — 2019. — Vol. 11, No. 2. — P. 311–327 (in Russian).
- Ajay A., Singh P. K.* Novel Digital Image Water Marking Technique Against Geometric Attacks // IJMECS. — 2015. — Vol. 7, No. 8. — P. 61–68.
- Fischer R., Plessow F.* Efficient multitasking: parallel versus serial processing of multiple tasks // Front Psychol. — 2015. — Vol. 6. — P. 1366.
- Kant R.* A Study of Creativity of Secondary School Children as a Correlate of Some Television Viewing Habits // IJMECS. — 2012. — Vol. 4, No. 10. — P. 33–39.
- Karamath Ali H., Amalarethinam D. I. G.* Activity Recognition with Multi-tape Fuzzy Finite Automata // IJMECS. — 2013. — Vol. 5, No. 5. — P. 60–65.
- 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. — P. 68–78.
- Koganov A. V., Rakcheeva T. A.* Experimental Detection of the Parallel Organization of Mental Calculations of a Person on the Basis of Two Algebras Having Different Associativity // Advances in Artificial Systems for Medicine and Education II. — AIMEE2018 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. — Vol. 902. — P. 139–149.
- Koganov A. V., Rakcheeva T. A.* Comparative Analysis of Human Adaptation to the Growth of Visual Information in the Problems of Recognition of Formal Symbols and Meaningful Images // Advances in Artificial Systems for Medicine and Education III. — AIMEE 2019. Part of the Advances in Intelligent Systems and Computing book series. — Vol. 1126. — P. 218–230.
- Marouf A. A., Ashrafi A. F., Ahmed T., Emon T.* A Machine Learning based Approach for Mapping Personality Traits and Perceived Stress Scale of Undergraduate Students // International Journal of Modern Education and Computer Science (IJMECS). — 2019. — Vol. 11, No. 8. — P. 42–47.
- Nandi D., Saif A. F. M. S., Paul P., Zubair K. M., Shubho S. A.* Traffic Sign Detection based on Color Segmentation of Obscure Image Candidates: A Comprehensive Study // International Journal of Modern Education and Computer Science (IJMECS). — 2018. — Vol. 10, No. 6. — P. 35–46.
- Popov G., Mastorakis N., Mladenov V.* Calculation of the acceleration of parallel programs as a function of the number of threads. — <https://www.researchgate.net/publication/228569958>
- Tran L. B., Le T. H.* Person Authentication using Relevance Vector Machine (RVM) for Face and Fingerprint // IJMECS. — 2015. — Vol. 7, No. 5. — P. 8–15.