

УДК 004.81

Представление информации в рабочей пространственной памяти при узнавании и воспроизведении

Ляховецкий В.А.^{1,2*}, Потапов А.С.^{3,4}

¹Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН

²Латвийский университет

³Санкт-Петербургский государственный университет

⁴Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Аннотация. С помощью нейросетевой модели типа гетероассоциативная память и «буферной» модели, хранящей информацию обо всех запоминаемых объектах отдельно друг от друга, проведен анализ распределений ошибок в психофизических экспериментах по запоминанию и немедленному припоминанию последовательности перемещений фигуры по шахматной доске. Показано, что распределение ошибок положения у испытуемых не зависит от задачи (узнавание или полное воспроизведение). Результаты модельных опытов позволяют предположить, что при запоминании последовательности при решении обеих задач используется позиционное кодирование. Для описания в рамках одной структуры как процессов узнавания, так и процессов воспроизведения, нейросетевая модель типа гетероассоциативная память более успешна, чем буферная модель.

Ключевые слова: гетероассоциативная нейронная сеть, пространственная память, позиционное кодирование.

ВВЕДЕНИЕ

Узнавание и воспроизведение – задачи, которые широко используются при изучении памяти человека. При узнавании испытуемый оценивает знакомость стимулов, часть которых была предъявлена ранее, или выбирает из набора стимулов те, которые были прежде запомнены. При воспроизведении испытуемый без дополнительных подсказок припоминает запомненные ранее стимулы. В психологии и философии процесс узнавания иногда рассматривается как нечто удивительное (человек знает запомненное до узнавания, хотя зачастую и не может припомнить то, что он знает) [1, 2]. Однако с точки зрения моделирования достаточно очевидно, что наличие дополнительной информации (по сравнению с процессом воспроизведения) облегчает припоминание. Для нейронных сетей типа ассоциативная память найдены различные функции (энергия нейронной сети, скорость убывания энергии и т. д.), позволяющие оценить знакомость (familiarity) предъявленного стимула с большей скоростью или точностью по сравнению с воспроизведением запомненного стимула [3, 4]. То есть для моделей так же, как и для человека, узнавание или оценка знакомости запомненного – более простая задача, чем воспроизведение запомненного. В известной нам литературе модели узнавания и воспроизведения запомненного существуют отдельно друг от друга, без привязки к результатам конкретных психофизических

*v_la2002@mail.ru

опытов. Возможно, это обусловлено сложным стимульным материалом, словами или целостными зрительными образами, которые обычно используются в психофизических опытах. Количественно смоделировать их внутреннее представление в рабочей памяти затруднительно. Между тем, на наш взгляд, в случае использования достаточно простых стимулов, хранящихся в пространственной рабочей памяти, имитационное моделирование может помочь решить, по меньшей мере, две принципиальные проблемы.

Во-первых, предыдущие и последующие следы памяти интерферируют друг с другом: предъявленные ранее для запоминания пространственные стимулы влияют на воспроизведение стимулов, которые требуется запомнить в последующих опытах [5]. Существует ли интерференция между целевым пространственным стимулом и дистракторами (то есть стимулами, которые не предъявлялись на этапе запоминания) в процессе узнавания?

Во-вторых, в когнитивной психологии существуют два класса теорий. В одних теориях полагается, что при узнавании и воспроизведении используются принципиально различные внутренние механизмы, находящиеся под различным контролем сознания, требующие различных внутренних представлений запоминаемой информации (multiple-system view) [6]. Для воспроизведения требуется высокий уровень сознательного контроля; оно может происходить только осознаваемо. Для узнавания (и оценки знакомости, вслед за [7], мы полагаем эти задачи родственными) требуется значительно меньший уровень сознательного контроля, и оно может происходить как осознаваемо, так и неосознаваемо. В пользу этих теорий говорят, например, данные о пациентах с повреждениями гиппокампа, которые успешно выполняют задачи узнавания, но не воспроизведения [8]. В других теориях полагается, что от стимульного материала и условий постановки опыта (в том числе задачи, которая дается испытуемому) зависит степень сознательного контроля, то есть существует непрерывный континуум состояний сознательного управления процессом запоминания (single-system view). При этом независимо от уровня сознательного контроля используются одни и те же внутренние представления информации [9].

Прежде нами рассматривалась задача узнавания последовательности шахматных позиций и задача полного воспроизведения последовательности движений руки. Для этих задач были разработаны модели, описывающие распределения ошибок, которые допускают испытуемые при припоминании [10, 11]. На этих примерах было показано, что по распределениям ошибок можно судить о внутреннем представлении информации в рабочей пространственной памяти. Целью данной работы является сравнение распределений ошибок при узнавании и воспроизведении одного и того же набора стимулов, а также имитационное моделирование, позволяющее охарактеризовать внутреннее представление информации у испытуемых.

МЕТОДИКА

В рамках данной работы проведена серия психофизических экспериментов по полному воспроизведению испытуемыми случайной последовательности перемещений фигуры по шахматной доске; затем с помощью разработанных ранее моделей проведено исследование распределений ошибок. Ниже для удобства восприятия целостной картины исследования приведены фрагменты методики и повторены некоторые распределения ошибок из [10–12]. Предложенные модели используются для описания процессов, происходящих в рабочей пространственной памяти человека, поэтому целесообразно начать описание методики с психофизического эксперимента.

Стимульный материал состоит из шахматных позиций, содержащих одну фигуру (слона). На этапе запоминания после подтверждения испытуемым своей готовности на экране монитора предъявляется первая позиция из последовательности позиций,

содержащих случайные перемещения фигуры. После того, как испытуемый сочтет, что запомнил позицию, он нажимает любую кнопку на клавиатуре, и на экране предьявляется вторая позиция, затем третья и т. д., всего 7 позиций. Непосредственно после запоминания испытуемым последней позиции начинался этап припоминания. Испытуемые первой группы, 42 человека, возраст 20–40 лет, решали задачу полного воспроизведения, то есть воспроизведения всей последовательности стимулов в том порядке, в котором она была предьявлена. Они последовательно отмечали с помощью мышки на шахматной доске запомненные положения слона. Сначала испытуемому предьявлялось правильное первое положение фигуры. После того, как испытуемый кликал мышкой на одном из полей шахматной доски, туда перемещалась фигура. Испытуемые второй группы, 85 человек, возраст 20–40 лет, решали задачу узнавания. В левой части экрана появлялась первая позиция последовательности, а справа – четыре варианта второй позиции. Один вариант всегда являлся стимулом, предьявленным на этапе запоминания, а три варианта – дистракторами. Испытуемый выбирал правильный вариант продолжения последовательности путем нажатия одной из четырех кнопок (рис. 1). После того, как испытуемый осуществил выбор, в левой части экрана появлялась вторая позиция последовательности, а справа – четыре варианта третьей и т. д. Все испытуемые обеих групп не имели опыта игры в шахматы. С каждым испытуемым проводилась только одна экспериментальная серия.

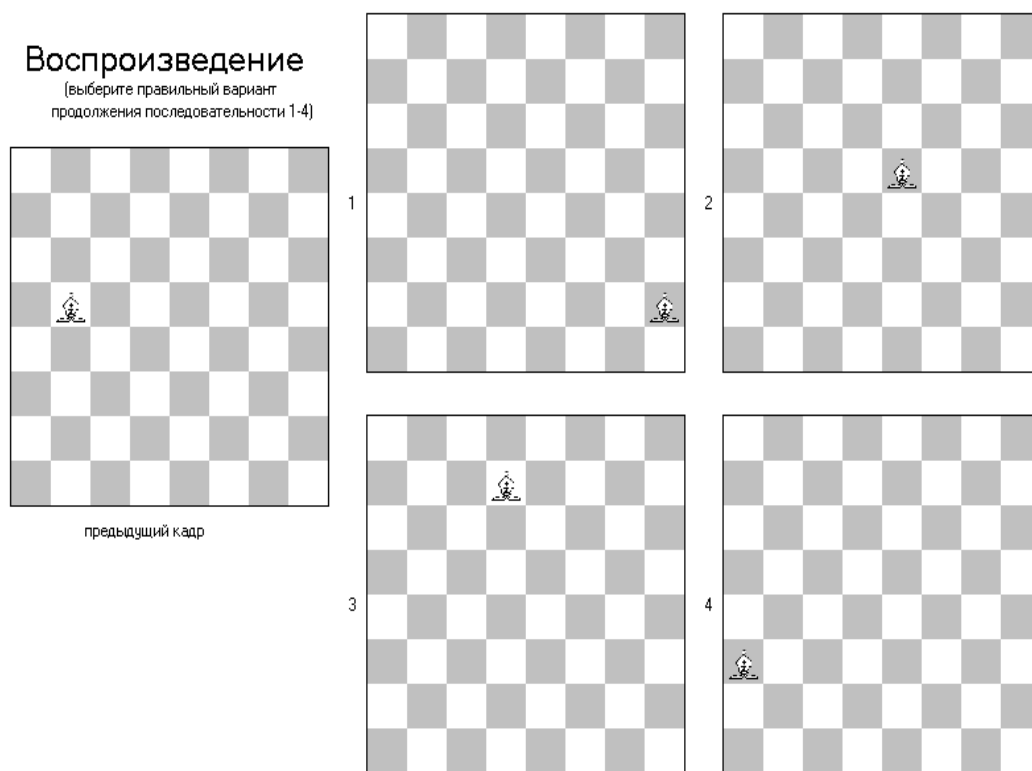


Рис. 1. Этап узнавания эксперимента по запоминанию последовательности случайных перемещений фигуры.

Для каждой позиции регистрировалось время запоминания и воспроизведения, правильность ответа, а в случае неверного ответа величина ошибки – расстояние в евклидовой метрике между верным положением фигуры и положением фигуры, выбранным испытуемым.

Математическая модель. Для анализа распределений ошибок человека были разработаны две модели различного типа – с независимым друг от друга и распределенным хранением элементов последовательности. В основе «буферной» модели лежат следующие допущения [10]. Все S_i стимулы последовательности

хранятся в «буфере» памяти независимо друг от друга. При запоминании стимула S часть информации может быть потеряна, что представимо как независимое искажение элементов внутреннего представления стимула: $S \rightarrow X + \Delta X$, где X – внутреннее представление стимула, а ΔX – его искажение. Вероятность p искажения элементов внутреннего представления каждого стимула последовательности задается экспериментатором. В качестве внутреннего представления стимула на основе предварительных модельных экспериментов выбрано двоичное (побитовое) представление декартовых координат фигуры на шахматной доске и $p = 0.1$.

При решении задачи полного воспроизведения запомненные стимулы воспроизводятся моделью: $X + \Delta X \rightarrow S'$. Определяется ошибка положения между S' и S . Если стимул при запоминании не был искажен, то модель дает правильный ответ.

При решении задачи узнавания стимул S и дистракторы D_j переводятся в неискаженном виде в некоторое внутреннее представление: $S \rightarrow X$, $D_j \rightarrow Y_j$. Далее запомненный (искаженный) стимул $X + \Delta X$ сравнивается с предъявленным эталонным стимулом и дистракторами. Истинный стимул будет выбран, если $\|\Delta X\| < \|X + \Delta X - Y_j\|$ для любого дистрактора. Если выбран истинный стимул, то модель дает правильный ответ. В противном случае определяется ошибка положения – евклидово расстояние между S и D_j .

Рассмотрим вторую модель. Нейросетевая модель типа двунаправленной гетероассоциативной памяти содержит два слоя формальных нейронов, соединенных двунаправленными связями [11]. На входной слой модели подается вектор Z_i . Нейроны этого класса сетей работают с бинаризованными данными, поэтому элементы векторов Z переводятся в двоичную систему счисления [13]. Элементы векторов запоминаемой последовательности Z_i содержат информацию о стимулах S_i в декартовой системе координат. Для хранения координат в бинаризованной форме требуется 6 формальных нейронов. Для расчета симметричной матрицы весов W сети применялся алгоритм расчета, предложенный в [13]. Вектор Z_i содержит и номер цели, т. е. составлен из компонент (x_i, y_i, i) , поэтому модель способна запоминать последовательности, содержащие повторяющиеся элементы. Этап запоминания заключается в расчете матрицы W по «цепочке» пар (Z_{i-1}, Z_i) векторов запоминаемой последовательности: $W = \sum_i Z_{i-1}^T Z_i$. Модель предназначена для имитации запоминания шести пар положений фигуры, поэтому $i = 2 \div 7$ (первая позиция, Z_1 , подаваемая на вход модели, также, как и в психофизических опытах, всегда правильная). На этапе воспроизведения элементы z_{ik} вектора Z_i вычисляются как $z_{ik} = \text{sgn}(\sum_m z_{(i-1)m} w_{mk})$, где $k, m = 1 \div K$, K – число формальных нейронов одного слоя сети,

$$\text{sgn}(a) = \begin{cases} 1, & \text{если } a \geq 0, \\ -1 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Далее активность распространяется на первый слой сети, и затем вновь на второй слой до тех пор, пока не будет достигнуто устойчивое состояние сети.

При решении задачи полного воспроизведения модель воспроизводит последовательность запомненных стимулов. Для каждого стимула определяется ошибка между правильным положением фигуры и положением фигуры, воспроизведенным моделью. При решении задачи узнавания на вход модели на каждом шаге подается правильный предыдущий вектор Z_{i-1} (подобно тому, как для испытуемых в задаче узнавания предъявлялось верное предыдущее положение фигуры). Далее выходной вектор модели Z_i' сравнивается с эталонным вектором Z_i и дистракторами, аналогично «буферной» модели.

С каждой из моделей проводили 10000 опытов. Регистрировалось число правильных и ошибочных ответов, распределение ошибок положения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Процент правильных ответов испытуемых и моделей при решении задач узнавания и воспроизведения в зависимости от номера позиции в последовательности приведен на рис. 2 (на графике приведены проценты правильных ответов для шести позиций, которые должен был припомнить испытуемый). И для обеих моделей, и для испытуемых процент правильных ответов достоверно (по критерию знаков) выше для задачи узнавания, чем для задачи воспроизведения. У испытуемых при решении обеих задач наблюдается ргimасу-эффект. Они лучше запоминают начало последовательности, чем ее окончание (90% правильных ответов по сравнению с 63% в задаче узнавания, 71% по сравнению с 18% в задаче полного воспроизведения). Также ргimасу-эффект присутствует для нейросетевой модели при решении задачи полного воспроизведения (55% правильных ответов по сравнению с 37%). У буферной модели процент правильных ответов, очевидно, не зависит от номера позиции в последовательности (так как вероятность искажения элементов внутреннего представления не зависит от номера позиции в последовательности) и составляет 81% для задачи узнавания и 54% для задачи воспроизведения. У нейросетевой модели при решении задачи узнавания процент правильных ответов составляет 88% и также не зависит от номера позиции в последовательности, так как на вход модели каждый раз подавался правильный вектор Z_i . Наблюдались значительные индивидуальные различия испытуемых – некоторые испытуемые безошибочно запоминали всю последовательность позиций, некоторые допускали 5–6 ошибок при припоминании.

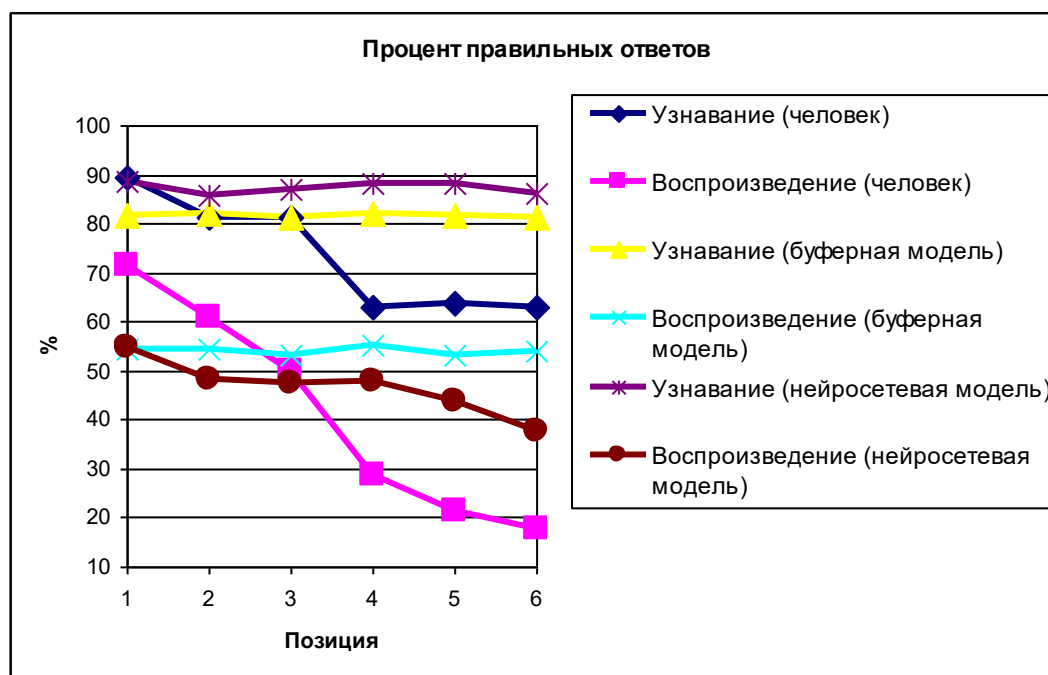
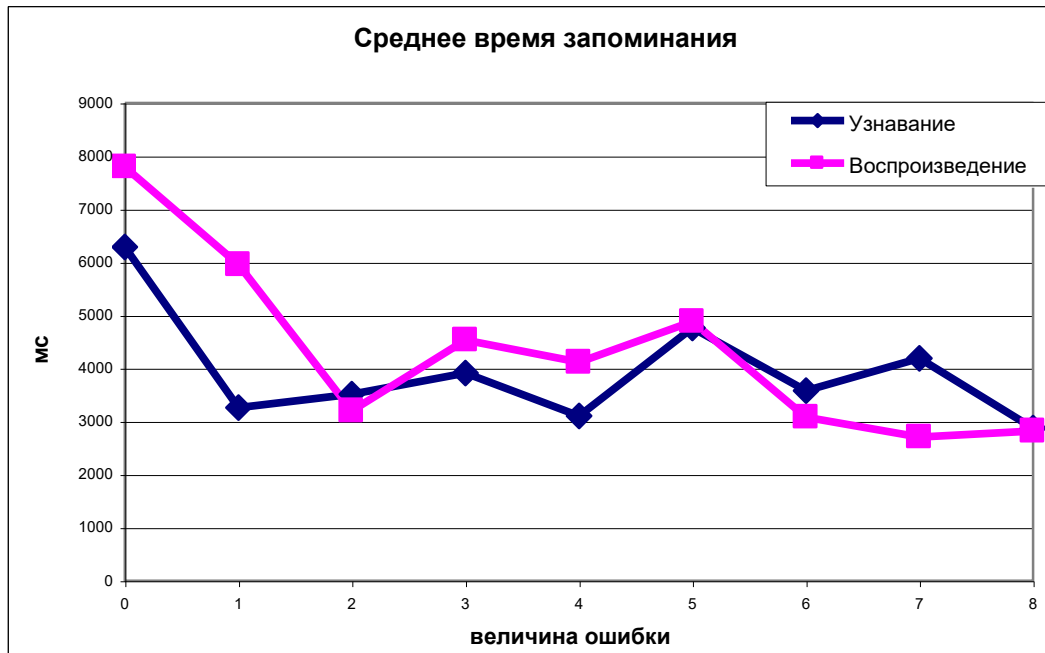


Рис. 2. Процент правильных ответов для испытуемых и для моделей при узнавании и полном воспроизведении в зависимости от номера позиции в последовательности.

Зависимость среднего времени запоминания и припоминания испытуемых от величины ошибки при решении задач узнавания и воспроизведения приведена на рис. 3,А и 3,Б. По оси абсцисс отложена величина ошибки в условных единицах (клетках шахматной доски, евклидова метрика), по оси ординат – время в мс. Для задачи узнавания время запоминания правильных ответов (величина ошибки равна 0) достоверно (критерий Уилкоксона) больше, чем время запоминания ошибочных ответов на одну, две и четыре клетки.

А



Б

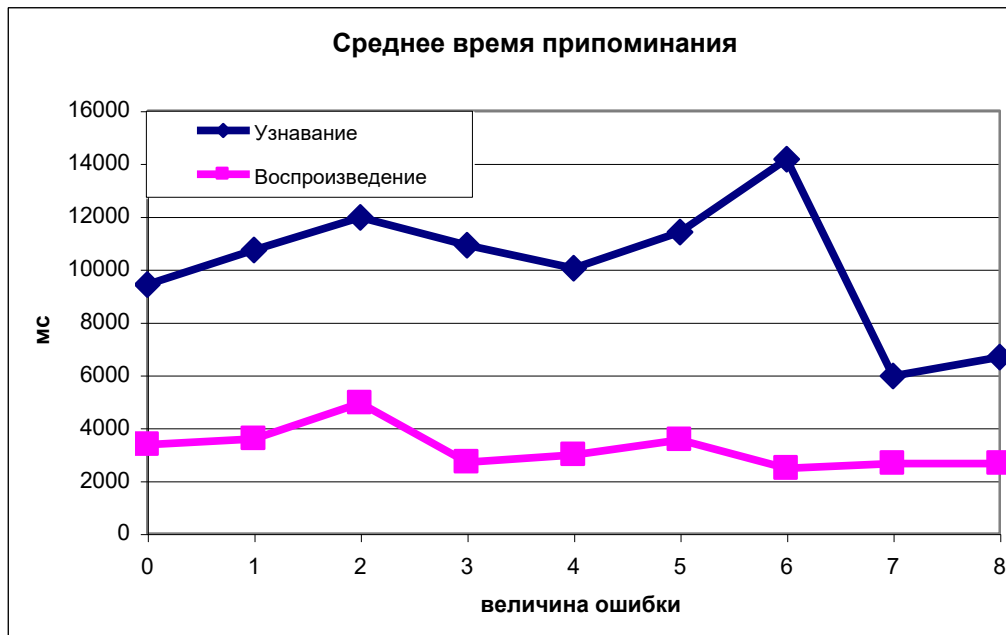


Рис. 3. Среднее время запоминания (А) и припоминания (Б) испытуемых от величины ошибки при решении задач узнавания и воспроизведения.

Для задачи воспроизведения время запоминания правильных ответов достоверно больше, чем время запоминания ошибочных ответов на две, четыре, шесть и семь клеток, а время запоминания ошибочных ответов на одну клетку достоверно больше, чем время ошибочных ответов на две и шесть клеток. При этом время ошибочных ответов на одну клетку не отличается от времени правильных ответов. Время припоминания для задачи узнавания достоверно выше (критерий знаков), чем для задачи воспроизведения. Различий во времени правильных и ошибочных ответов на этапе припоминания нет.

Распределение ошибок испытуемых и моделей при решении задач узнавания и воспроизведения приведено на рис. 4. По оси абсцисс величина ошибки в условных единицах (клетках шахматной доски, евклидова метрика), по оси ординат – процент

ошибок этой величины. Распределения ошибок имеют сложную мультимодальную форму. Распределение ошибок испытуемых при узнавании не имеет четкого максимума, ошибки испытуемых на 1–4 клетки доски практически равновероятны (16–19%). Распределение ошибок испытуемых при воспроизведении имеет более выраженный максимум при величине ошибки, равной 1 клетке (28%), и менее выраженный максимум при величине ошибки, равной 4 клеткам (13%). В то же время эти два распределения ошибок испытуемых достоверно не отличаются друг от друга (критерий хи-квадрат, $\chi^2 = 8.39 < 12.59$). Модельные распределения ошибок имеют выраженные максимумы при величине ошибки, равной 4 клеткам. Выраженность максимума модельного распределения ошибок при величине ошибки, равной 1 и 2 клеткам, зависит как от задачи, так и от типа модели. Распределения ошибок буферной и нейросетевой моделей при узнавании подобны распределению ошибок испытуемых ($\chi^2 = 2.90$ и $\chi^2 = 6.20$ соответственно). Распределение ошибок нейросетевой модели при воспроизведении подобно распределению испытуемых ($\chi^2 = 12.20$), а распределение ошибок буферной модели достоверно отличается от распределения ошибок испытуемых при воспроизведении ($\chi^2 = 27.58$).

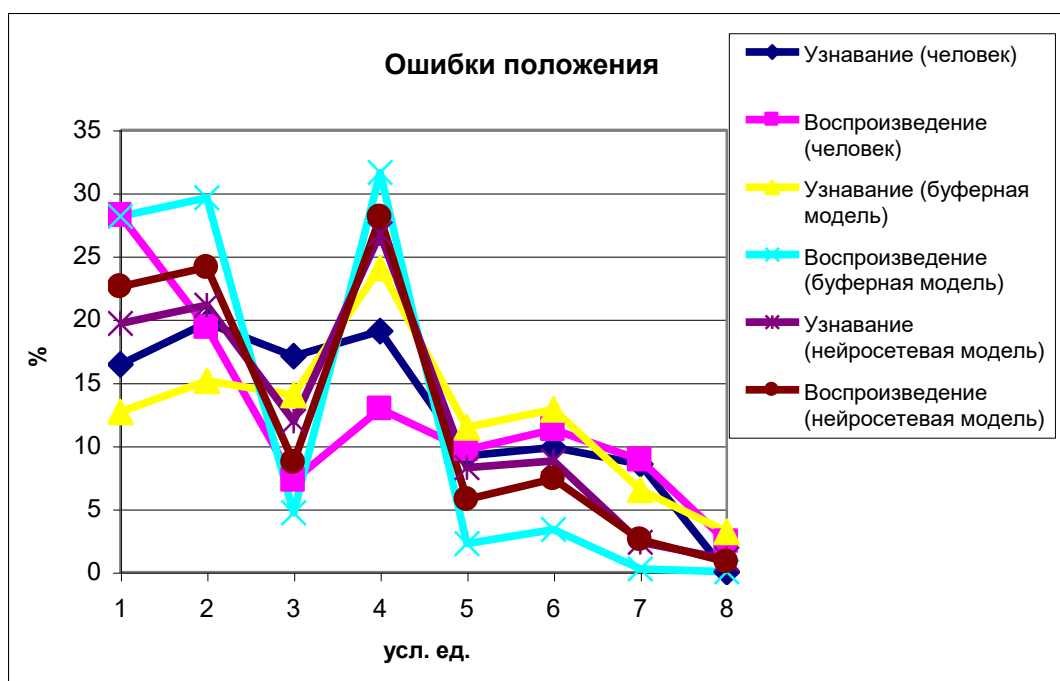


Рис. 4. Распределения ошибок испытуемых и моделей при решении задачи узнавания и воспроизведения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для обеих моделей задача узнавания проще, так же, как и для испытуемых, что хорошо согласуется с литературными данными (рис. 2). Предположим, что испытуемые при решении задачи узнавания вели бы себя на каждом шаге воспроизведения последовательности следующим образом. Сначала они припоминали бы запомненную позицию, затем просматривали четыре варианта ответа, затем, если находили правильный с их точки зрения ответ, то выбирали бы его, а в противном случае выбирали один из четырех вариантов ответа наугад. Вероятность случайного угадывания в этом случае составляет 25%. Следовательно, процент правильных ответов при узнавании был бы выше, чем при воспроизведении, на 25% от числа ошибок, допущенных при припоминании некоторого номера позиции. Однако для всех номеров позиций различие между кривыми процентов правильных ответов испытуемых больше этой величины. Это означает, что испытуемые при узнавании успешно используют

дополнительную информацию, предъявляемую на этапе припоминания. Результаты модельных опытов позволяют предположить, что испытуемые сравнивают запомненную позицию с предлагаемыми вариантами и выбирают наиболее близкий в некоторой метрике (в разработанных моделях – евклидова метрика) вариант ответа. В то же время, в отличие от нейросетевой модели, испытуемые при использовании данного набора стимулов не способны улучшать точность своих ответов, опираясь на подсказку – правильное предыдущее положение фигуры.

Задавшись в буферной модели одной и той же вероятностью искажения элементов, равной 0.1, возможно получить процент правильных ответов, близкий к среднему проценту правильных ответов испытуемых, как в задаче узнавания, так и в задаче воспроизведения. По-видимому, определив зависимость вероятности искажения от номера элемента в последовательности, в рамках буферной модели можно воспроизвести и *primacy-эффект* [14]. При использовании нейросетевой модели (без подсказки о правильном предыдущем положении фигуры) *primacy-эффект* возникает без дополнительных предположений, за счет «цепочечного» (*chaining*) эффекта алгоритма работы гетероассоциативной нейронной сети.

Форму модельных распределений ошибок удобно объяснить на примере буферной модели, выполняющей задачу узнавания. Из методики построения модели видно, что наиболее вероятно искажение запомненной информации, связанное с изменением значения одного бита. Такое искажение при выбранном внутреннем представлении (декартовы координаты фигуры) приведет к тому, что запомненное положение фигуры изменится на одну, две или четыре клетки. Напротив, наименее вероятна ситуация, при которой фигура находится в одном из углов доски, а в результате искажения нескольких бит внутреннего представления припомненное моделью положение фигуры находится на расстоянии, большем 4 клеток, от целевого стимула.

Процент правильных ответов при решении двух задач схож для рассмотренных двух моделей различного типа. Их распределения ошибок также схожи для задачи узнавания. При дополнительных предположениях в буферной модели может быть воспроизведен и *primacy-effect*. Таким образом, для описания наблюдаемых в данном эксперименте распределений ошибок в задаче узнавания в равной степени подходят обе модели. Однако для описания распределений ошибок в задаче воспроизведения подходит только нейросетевая модель. При обработке иных экспериментальных данных (распределения ошибок перестановок положения и направления движения при воспроизведении последовательности движений руки) нейросетевая модель также более точно описывала психофизические данные, чем буферная [15].

Среднее время припоминания при узнавании приблизительно в два раза выше, чем при воспроизведении. По-видимому, это обусловлено дизайном эксперимента. Испытуемый тратил время на просмотр предложенных четырех вариантов положения фигуры перед тем, как дать ответ. В обеих задачах среднее время запоминания правильных ответов выше, чем неправильных – если испытуемый тратил больше времени на запоминание, то с большей вероятностью давал правильный ответ на этапе припоминания. Важно, что для задачи воспроизведения испытуемые тратили много времени, запоминая положение фигуры, воспроизводимое на этапе припоминания с ошибкой в одну клетку. Вероятно, такой ошибочный ответ испытуемые также считали правильным. Этот эффект может быть обусловлен тем, что испытуемые пользуются некоторым универсальным представлением пространственной информации, разрешение которой ниже, чем клетка шахматной доски [16]. Увеличение четкости такого представления может происходить в ходе обучения. Предположительно, именно за счет ответов, правильных с точки зрения испытуемых, но не экспериментатора, происходит увеличение числа ошибок на одну клетку в задаче воспроизведения по сравнению с задачей узнавания.

Распределения ошибок испытуемых при узнавании и воспроизведении достоверно не отличаются друг от друга. Это позволяет предположить, что, во-первых, не существует значительной интерференции между дистракторами и целевым стимулом в процессе узнавания, и, во-вторых, независимо от задачи используется одно и то же внутреннее представление информации, что свидетельствует в пользу теорий, постулирующих существование непрерывного континуума состояний сознательного управления процессом запоминания.

Перебор всех мыслимых систем кодирования информации о положениях фигуры при моделировании невозможен, поэтому допустимо существование системы кодирования, при использовании которой модельные распределения ошибок положения были бы ближе к распределениям ошибок человека. В тоже время, подобие распределений по выбранному критерию (хи-квадрат) свидетельствует в пользу того, что при запоминании используется позиционное кодирование положений фигуры на шахматной доске. Подобные распределения ошибок человека в моторных задачах также были интерпретированы как проявление искажений при воспроизведении позиционно закодированных стимулов в [17]. Отметим, что при использовании иного стимульного материала или иной инструкции для испытуемых в рабочей пространственной памяти может осуществляться и векторное кодирование, для которого характерны принципиально иные распределения ошибок [10, 11, 17].

ВЫВОДЫ

Полученные психофизические данные свидетельствуют о том, что независимо от задачи, которую решает испытуемый, в рабочей памяти используется одно и то же внутреннее представление пространственной информации. Эти данные поддерживают теории существования единой системы сознательного управления процессом запоминания (single-system view). Результаты модельных опытов позволяют предположить, что при запоминании последовательности положений фигуры на шахматной доске используется позиционное кодирование. Для описания в рамках одной структуры как процессов узнавания, так и процессов воспроизведения, нейросетевая модель типа гетероассоциативная память более успешна, чем буферная модель.

Работа поддержана грантом 2013/0021/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/001, а также частично поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллахвердов В.М. *Методологическое путешествие по океану бессознательного к таинственному острову сознания*. СПб: Речь, 2003. 368 с.
2. Мамардашвили М.К. *Картезианские размышления*. М.: Прогресс, 2001. 352 с.
3. Будилова Е.В., Карпенко М.П., Качалова Л.М., Терехин А.Т. Узнавание и воспроизведение: нейросетевая модель. *Биофизика*. 2009. Т. 54. №2. С. 287–291.
4. Соломатин В.Ф. Отношение сигнал/помеха при извлечении из ассоциативной памяти и при обнаружении записей. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2010. № 7. С. 40–44.
5. Makovsky T., Jiang Y. Proactive interference from items previously stored in visual working memory. *Memory & Cognition*. 2008. V. 36. № 1. P. 43–52.
6. Willingham D.B. A neuropsychological theory of motor skill learning. *Psychological Review*. 1998. V. 105. P. 558–584.
7. Cook G.L., Marsh R.L. Revisiting the role of recollection in item versus forced-choice recognition memory. *Psychonomic Bulletin & Review*. 2005. V. 12. № 4. P. 720–725.

8. Holdstock J.S., Mayes A.R., Roberts N., Cezayirli E., Isaac C.L., O'Reilly R.C., Norman K.A. Under what conditions is recognition spared relative to recall after selective hippocampal damage in humans? *Hippocampus*. 2002. V. 12. P. 341–351.
9. Cleeremans A., Jimenez L. Implicit learning and consciousness: A graded dynamic perspective. In: *Implicit Learning and Consciousness*. Eds. French R.M., Cleeremans A. Hove, U.K. Psychology Press, 2002. P. 1–40.
10. Ляховецкий В.А., Потапов А.С., Попечителей Е.П. Методика изучения и модель информационной структуры памяти человека. *Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Медицинские информационные системы»*. 2006. № 11. С. 4–9.
11. Ляховецкий В.А., Боброва Е.В. Воспроизведение запомненной последовательности движений правой и левой руки: позиционное и векторное кодирование. *Журнал высшей нервной деятельности*. 2009. Т. 59. № 1. С. 45–54.
12. Крумина Г., Ляховецкий В.А. Проблемы кодирования стереоизображений в памяти человека. *Оптический журнал*. 2010. Т. 77. № 7. С. 14–18.
13. Kosko B. Bidirectional associative memories. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*. 1988. V. 18. P. 49–60.
14. Grossberg S. Behavioral contrast in short-term memory: serial binary memory models or parallel continuous memory models? *J. Math. Psychol.* 1978. V. 17. P. 199–219.
15. Ляховецкий В.А., Боброва Е.В., Скопин Г.Н. Ошибки перестановок при обучении воспроизведению последовательностей движений правой и левой руки: моделирование кодирования положений и движений. *Журнал высшей нервной деятельности*. 2012. Т. 62. № 6. С. 681–691.
16. Zhang W., Luck S.J. Discrete fixed-resolution representations in visual working memory. *Nature*. 2008. V. 453. P. 233–235.
17. Hudson T., Landy M. Motor learning reveals the existence of multiple codes for movement planning. *J. Neurophysiol.* 2012. V. 108. P. 2708–2716.

Материал поступил в редакцию 10.03.2014, опубликован 24.04.2014.