

Хвостов В.А.¹ Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной рабочей памяти

Khvostov V.A.¹ The time course of retaining hierarchical representation in visual working memory

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Теория иерархического кодирования утверждает, что хранение объектов в зрительной рабочей памяти (ЗРП) не носит независимый характер. Наоборот – репрезентация каждого объекта является интеграцией информации об этом отдельном объекте и групповой информации обо всех запоминаемых объектах (например, среднем значении признака) [Brady & Alvarez, 2011]. Данное исследование направлено на изучение динамики хранения иерархических репрезентаций в ЗРП. Испытуемым на 500 мс предъявлялись четыре треугольника разной ориентации, и спустя $1\frac{1}{4}$ секунд удержания в памяти они должны были отчитаться об ориентации одного из треугольников или о средней ориентации всех фигур. Перед началом предъявления давалась подсказка, сообщающая об ориентации, подлежащей запоминанию: одного треугольника, всех четырёх или средней ориентации. С помощью модели смешения оценивалась вероятность нахождения репрезентации в памяти, ее точность и смещение к среднему признаку. Не было обнаружено различий в динамике хранения отдельных элементов иерархической репрезентации (среднего и индивидуальных значений), что свидетельствует в пользу предположения о том, что формирование иерархических репрезентаций в ЗРП связано с особым кодированием материала, а не с особенностями процесса хранения разных частей иерархической репрезентации. Точность и вероятность нахождения репрезентации в памяти снижались со временем, что свидетельствует об одновременном действии процессов «угасания» и «внезапной смерти» в ЗРП.

Ключевые слова: иерархическое кодирование, зрительная рабочая память, забывание в рабочей памяти, сводная статистика ансамблей

Введение

Основные теории зрительной рабочей памяти исходят из предположения, что каждый объект хранится и забывается независимо от других объектов. Всё больше современных исследований показывают, что предположение о независимом хранении объектов является ошибочным – репрезентация объекта в зрительной рабочей памяти является интеграцией индивидуальной информации об этом объекте и сжатой групповой информации обо всех запоминаемых объектах. Данное исследование направлено на изучение динамики хранения (другими словами, забывания) этих иерархических репрезентаций в зрительной рабочей памяти.

Обоснование проблемы

Зрительная рабочая память (ЗРП) – система, которая используется для активного хранения зрительной информации и манипулирования ею для выполнения познавательных заданий [Brady et al., 2011]. Изучение данного вида памяти представляет не только теоретический, но и практический интерес: индивидуальные различия в объёме ЗРП положительно коррелируют с уровнем интеллекта, пониманием прочитанного, академическими успехами и множеством других когнитивных показателей [Alloway & Alloway, 2010; Baddeley, 1986]. Это говорит о том, что рабочая память может быть центром когнитивных способностей, лежащих в основе и ограничивающих нашу способность обрабатывать информацию [Brady et al., 2011]. Одной из важнейших характеристик ЗРП является ограниченное время хранения – с течением времени репрезентации в ЗРП подвергаются процессу забывания. Существует несколько точек зрения относительно природы данного явления, которые вытекают из различных взглядов на проблему репрезентации в зрительной рабочей памяти (как хранятся объекты в ЗРП). Двумя наиболее влиятельными теориями в этой области являются модели ресурсов (resource model) и ячеек/слотов (slot model) [Brady et al., 2011].

Ресурсная модель утверждает, что ЗРП располагает гибким, но ограниченным ресурсом, способным распределяться между запоминаемыми объектами: чем больше элементов необходимо удерживать в ЗРП, тем хуже будет точность хранения для каждого из них [Ma et al., 2014]. В пользу данной теории говорят множество экспериментальных данных, полученных в разных парадигмах [Bays et al., 2009; Bays & Husain, 2008; Huang, 2010; Ma et al., 2014]. Классические эксперименты включают в себя манипуляцию сложностью запоминаемого материала, то есть детализацией информационных требований для выполнения задачи на запоминание (например, цветные квадраты – низкая детализация; сложные 3D-кубы или китайские иероглифы – высокая детализация). Чем выше сложность

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной... задания, тем меньшее количество объектов может запомнить испытуемый [Alvarez & Cavanagh, 2004] или тем хуже точность, с которой они хранятся [Wilken & Ma, 2004]. Данный взгляд на репрезентации в ЗРП согласуется с теорией постепенного угасания (gradual decay), которая утверждает, что природа забывания репрезентаций в ЗРП заключается в постепенном уменьшении их точности (увеличении шума), что в конце концов приводит к полному исчезновению информации об объекте из ЗРП. Положения теории угасания иллюстрируются результатами экспериментов, в которых производилось измерение порогов различения стимула-образца и тестового стимула после различных интервалов удержания: было показано, что с увеличением задержки пороги различения также возрастают [Lee & Harris, 1996; Ricker et al., 2014; Ricker & Cowan, 2010]. Причём, скорость угасания значительно снижается в условии привлечения внимания к одному из хранящихся объектов спустя некоторое время после их предъявления для запоминания [Astle et al., 2012; Berryhill et al., 2012; Pertzov et al., 2013], что можно интерпретировать как следствие перераспределения ограниченного ресурса.

Основным конкурентом ресурсной модели в объяснении того, как хранятся репрезентации в ЗРП, является ячейная теория [Luck & Vogel, 1997]. Она предполагает, что в ЗРП существует определённое число ячеек (три-четыре), в которые могут кодироваться элементы с фиксированной точностью. Если число объектов превышает четыре, то остальные элементы не кодируются в ЗРП. Данную идею можно проследить ещё в классических моделях «магических чисел» Дж. Миллера [Miller, 1956] и Н. Коуэна [Cowan, 2001], предполагающих наличие ограниченного количества дискретных единиц хранения (7 ± 2 и 4 ± 1 соответственно). Также в поддержку модели ячеек говорят исследования, показывающие драматическое ухудшение успешности выполнения задания на ЗРП, когда количество запоминаемых объектов превышает четыре [Luck & Vogel, 1997]. Критикуя эксперименты в рамках теории ресурсов, показывающие, что увеличение сложности ведёт к уменьшению объёма ЗРП или точности хранимых репрезентаций [Alvarez & Cavanagh, 2004; Wilken & Ma, 2004], В. Зэнь и С. Лак [Zhang & Luck, 2008] предложили использовать модель смешения (она будет описана более подробно в методической части). Данная модель позволяет разделить ошибки при отчёте о запоминаемых объектах на два вида: случайное угадывание (тестируемый элемент, на самом деле, отсутствовал в памяти, поэтому испытуемый ответил наугад) и неточное воспроизведение элемента, находящегося в памяти. Эти авторы показали, что при увеличении числа запоминаемых объектов возрастает количество первых ошибок (то есть испытуемые чаще отвечают наугад), в то время как точность ответов в пробах, где испытуемые отвечают не наугад, остаётся неизменной [Zhang & Luck, 2008]. Вышеописанные эксперименты в рамках теории угасания были подвергнуты такой же критике. В. Зэнь и С. Лак утверждали, что теория

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной... угасания сформировалась в результате выбора неверной методики для оценки репрезентаций. Ведь пороги с течением времени могут увеличиваться не только из-за уменьшения точности хранимой репрезентации, но и по причине того, что тестируемая репрезентация полностью отсутствует в ЗРП на момент тестирования (и испытуемый, вместо припоминания, просто даёт случайный ответ). Используя всю ту же модель смешения [Zhang & Luck, 2008], авторы тестировали ЗРП после промежутков в 1, 4 и 10 секунд и обнаружили, что точность репрезентаций остаётся постоянной (или снижается очень незначительно) на протяжении всего времени хранения, в то время, как вероятность случайных угадываний резко возрастает в промежутке между 4 и 10 секундами [Zhang & Luck, 2009]. Таким образом, авторы предложили теорию «внезапной смерти», утверждающую, что забывание в ЗРП связано с тем, что с течением времени возрастает вероятность исчезновения элемента из памяти (которое происходит мгновенно), в то время как точность хранимых репрезентаций не изменяется.

Теоретическое противостояние между ячейечной и ресурсной моделями и их взглядами на забывание не достигло консенсуса [Schurgin, 2018], даже несмотря на появления гибридных моделей «ячейки + ресурсы», предполагающих ограниченность ЗРП как количеством ячеек, в которые могут быть закодированы элементы, так и ресурсом, который распределяется между этими ячейками [Awh et al., 2007].

Необходимо отметить, что при формулировании всех вышеописанных теорий авторы основывались на предположении, что каждый элемент в зрительной рабочей памяти хранится независимо от остальных. Однако исследование Т. Брэйдли и Дж. Альвареса [Brady & Alvarez, 2011] показало, что это не соответствует действительности. Они предъявляли на экране набор из девяти кружков: по три круга синего, красного и зелёного цветов – и просили испытуемых запоминать размеры синих и красных кругов. После отсрочки, испытуемые должны были отчитаться о размере случайно выбранного красного или синего кружка с помощью подравнивания тестового круга. Важно, что наборы кружков были составлены таким образом, что средний размер кружков одного целевого цвета был больше, чем средний размер кружков другого. Каждому испытуемому предъявлялось 30 наборов кружков, половина из которых были сгенерированы вышеописанным образом. Вторая половина формировалась из существующих наборов путём взаимного изменения цветов у одного красного и одного синего кружка таким образом, что в этих парных наборах размер тестируемого кружка был одинаковым, в то время как его цвет был разным. В результате было выяснено, что испытуемые запоминали размер одного и того же круга по-разному в зависимости от среднего размера кругов того же цвета, а также от размера всех запоминаемых кругов: размер

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной... тестируемого круга при ответе систематически смещался в сторону среднего по соответствующим наборам. Из этих результатов был сделан вывод, что в ЗРП может действовать механизм *иерархического кодирования*, приводящий к тому, что кодирование и хранение каждого элемента в ЗРП не носит независимый характер. Наоборот – информация о каждом запоминаемом объекте интегрируется с разных уровней абстракции: в частности, уровне отдельных признаков и уровнях, кодирующих информацию о группах объектов [Brady & Alvarez, 2011]. Кодирование информации о группах элементов возможно благодаря мгновенному вычислению зрительной системой сводных статистик ансамблей: например, среднего значения признака [Ariely, 2001; Chong & Treisman, 2003, 2005a, 2005b; Whitney & Yamanashi Leib, 2018]. Преимуществом параллельного кодирования и хранения информации о каждом объекте на нескольких уровнях является увеличение точности репрезентации каждого отдельного элемента, а также появление возможности удерживать больше информации с помощью процесса сжатия, тем самым преодолевая ограничения по объёму [Brady & Alvarez, 2011, 2015a].

Дальнейшие исследования в рамках теории иерархического кодирования убедительно продемонстрировали, что учёт высокоуровневой информации о групповых признаках объектов представляется критически важным для объяснения множества экспериментальных данных о зрительной рабочей памяти [Brady & Alvarez, 2011, 2015a; Brady & Tenenbaum, 2013; Khvostov et al., 2020; Utochkin & Brady, 2020]: например, для предсказания того, какой набор элементов будет более простым, а какой – более сложным для запоминания [Brady & Alvarez, 2015b]. Иерархическое кодирование проявляется не только при запоминании низкоуровневых признаков, таких как: размер, цвет или ориентация [Dubé et al., 2014] – но и для более высокоуровневых, например: эмоциональное выражение лиц [Corbin & Crawford, 2018; Griffiths et al., 2018].

Таким образом, теория иерархического кодирования, с одной стороны, позволяет объединить позитивные факты ресурсной и ячеечной модели, с другой, в отличие от гибридных теорий, предлагает принципиально новый механизм репрезентации объектов в ЗРП, который объясняет некоторые феномены, остающиеся необъяснёнными в трёх вышеописанных теориях [Уточкин и др., 2016]. Если принять тот факт, что объекты в ЗРП не хранятся независимо друг от друга, а информация о них интегрируется с индивидуального и групповых уровней, то возникает вопрос: какова природа забывания в ЗРП? В рамках теории иерархического кодирования не проводилось экспериментов, изучающих динамику хранения иерархических репрезентаций. Данное исследование призвано заполнить этот пробел. Мы

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной... оцениваем «состояние» разных частей репрезентации (информации об отдельном элементе и о группе объектов), а также итоговой иерархической репрезентации после разных по времени интервалов удержания для того, чтобы сравнить их динамику хранения. Полученные данные позволят узнать, различается ли динамика хранения групповой и индивидуальной информации. Это позволит дополнить существующие теории забывания или даже сформулировать новый взгляд на забывание в ЗРП. Кроме того, данные о динамике хранения иерархических репрезентаций в ЗРП предоставляют возможность проверить предположение, содержащееся в названии феномена иерархического *кодирования*. Действительно ли иерархический характер репрезентаций связан с особым кодированием информации в ЗРП, а не с особенностями процессов хранения различных частей иерархической репрезентации?

Гипотеза данного исследования звучит следующим образом: динамика хранения разных частей и интегральной иерархической репрезентации будет одинаковой – с течением времени будет увеличиваться вероятность, что какая-то из частей репрезентации исчезнет из памяти («внезапная смерть»). Гипотеза об одинаковой динамике хранения основана на предположении о связи феномена иерархического кодирования (смещения индивидуальных репрезентаций к среднему) с особенностями процесса кодирования, а не удержания. Ведь в противном случае, если групповая репрезентация хранится надёжнее, чем индивидуальные репрезентации (меньше подвержено процессу «внезапной смерти»), то с течением времени последние могут заменяться групповой информацией, таким образом, само смещение индивидуальных репрезентаций к среднему будет являться следствием их забывания на ранних стадиях хранения. Гипотеза о том, что динамика хранения всех частей репрезентации в ЗРП будет следовать принципу внезапной смерти связана со взглядом на зрительную рабочую память как на активную систему, забывание в которой связано с процессами, происходящие по принципу «всё или ничего» [Zhang & Luck, 2009].

Процедура и методика исследования

Выборка

Испытуемыми в данном исследовании были 16 студентов департамента психологии НИУ ВШЭ в возрасте от 18 до 25 лет (11 женщин, средний возраст – 19,2), участвовавших в эксперименте за дополнительные баллы по учебным предметам. Размер выборки был основан на работе Уточкина и Брейди [Utochkin & Brady, 2020], в которой авторы, используя идентичный факторный дизайн, так же изучали разные части иерархических репрезентаций в зрительной рабочей памяти. Испытуемые имели нормальную или скорректированную до нормальной остроту зрения, у них отсутствовали травмы головного мозга или эпилепсия.

Перед началом эксперимента каждый испытуемый подписывал информированное согласие, в котором ему разъяснялась информация о цели, условиях проведения и возможных опасностях исследования.

Аппаратура и стимуляция

Эксперимент проводился на компьютерах на операционной системе Linux Ubuntu с VGA монитором с частотой обновления 85 Гц, с разрешением 1024 × 768 пикселей, для предъявления стимулов использовалась программа PsychoPy [Peirce et al., 2019]. Испытуемые находились приблизительно в 500 мм от монитора (положение головы не фиксировалось), таким образом каждый пиксель на экране примерно равнялся 0.04° зрительного угла.

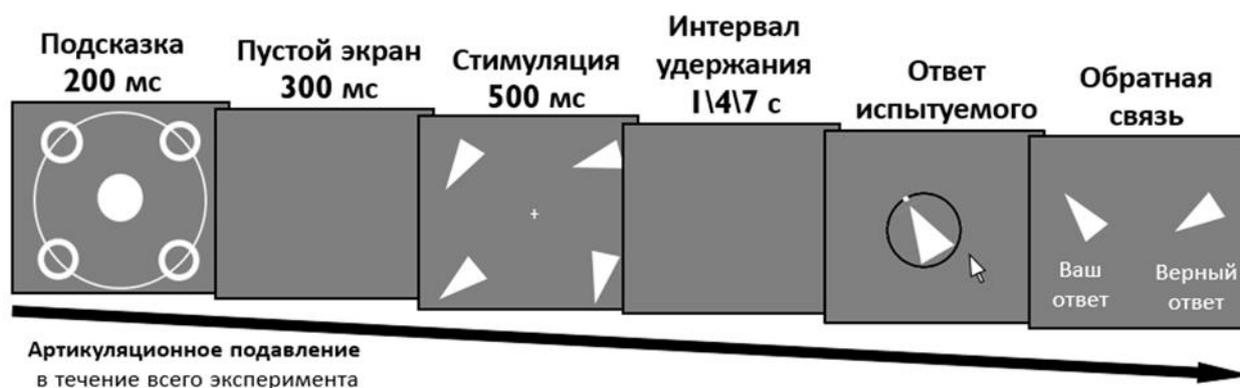


Рис. 1. Последовательность дисплеев внутри одной пробы.

В каждой пробе испытуемому предъявлялось четыре белых треугольника для запоминания (рис. 1). Все параметры треугольников, кроме ориентации, были постоянными на протяжении всего эксперимента. Ориентации треугольников генерировались по следующему алгоритму: случайным образом выбиралась средняя ориентация треугольников в данной пробе из равномерного распределения значений от 1° до 360°. После этого, первому треугольнику присваивалась ориентация, превышающая среднюю на 30°, второму треугольнику – превышающая на 10°, третьему – на 10° меньшая и четвертому – на 30° меньшая. Таким образом, создавалось равномерное распределение ориентаций с шагом в 20° между соседними экземплярами. Для того, чтобы пробы отличались друг от друга, в значение ориентации каждого треугольника была внесена случайная флуктуация от -3° до 3° (истинная средняя ориентация для данной пробы пересчитывалась после этой манипуляции). Треугольники были расположены на невидимой окружности радиусом в 200 пикселей. Положения треугольников были зафиксированы на круге: 45°, 135°, 225°, 315° – в координаты треугольников также была внесена случайная флуктуация от -10° до 10°. Относительные позиции треугольников в каждой

пробе были перемешаны случайным образом.

Процедура

В начале пробы испытуемому предъявлялась подсказка (на 200 мс), которая сигнализировала ему о том, какой параметр стимуляции ему нужно запоминать в данной пробе (рис. 2): ориентацию конкретного треугольника (репрезентация на индивидуальном уровне), среднюю ориентацию (групповая репрезентация) или ориентацию всех треугольников (интегральная репрезентация). Затем после 300 мс, в течение которых предъявлялся пустой экран, на экране появлялись 4 белых равнобедренных треугольника (на 500 мс), имеющих разную ориентацию острого угла. После этого снова появлялся пустой экран, в течение которого испытуемые должны были сосредоточиться на запоминаемом материале. Интервал удержания мог быть равным 1, 4 или 7 секунд. Далее, тестовый треугольник появлялся в одном из пяти мест на экране (согласно подсказке): в случае появления на месте предъявления одного из треугольников испытуемый с помощью мышки должен был отчитаться об ориентации треугольника, предъявленного в этом месте, если тестовый объект появлялся в центре экрана – о средней ориентации всех предъявленных в пробе треугольников. Последовательность дисплеев внутри одной пробы изображена на рисунке 1. Параллельно с основным заданием испытуемые должны были вслух в постоянном ритме произносить какой-нибудь слог (например, «БА»). Этот приём называется артикуляционным подавлением, он препятствует вербальному кодированию стимулов, что необходимо для изучения ЗРП без участия вербальной рабочей памяти [Уточкин и др., 2016]. Так как несколько испытуемых проходили эксперимент параллельно в одной экспериментальной комнате, каждому участнику эксперимента выдавались беруши, для того, чтобы шум в аудитории не отвлекал его от выполнения задания.

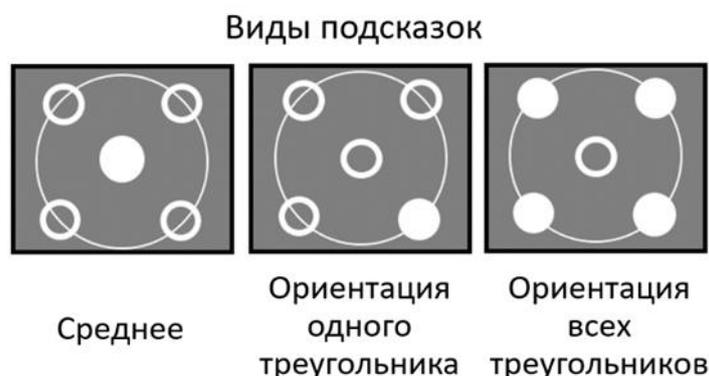


Рис. 2. Три вида возможных подсказок, использованных в эксперименте.

Перед началом эксперимента каждый испытуемый проходил тренировочную серию из 24 проб для ознакомления с задачами. Основная серия эксперимента содержала 486 проб: 3 интервала

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной... удержания (1/4/7 с) × 3 задачи (запоминать ориентацию одного треугольника, всех треугольников и среднюю ориентацию) × 54 повторения (внутригрупповой экспериментальный дизайн). Основная серия состояла из трёх блоков, соответствующих каждой из задач (пробы с разными интервалами удержания были перемешаны внутри каждого блока в случайном порядке).

Анализ данных

Для сбора ответов испытуемых была использована методика градуального отчёта (continuous report task [Wilken & Ma, 2004]: после интервала удержания испытуемый должен отчитаться об одной из ориентаций: только один тестовый объект появляется на экране, он имеет случайное исходное значение признака, испытуемый должен с помощью мышки установить значение ориентации тестируемого объекта (или среднего) на круговой шкале. Таким образом, зависимой переменной в данном исследовании являлся ответ испытуемого в градусах, на основании которого высчитывался показатель *ошибки* (E), как разность между ответом испытуемого и правильным ответом: положительное значение означало «переоценку» ориентации по часовой стрелке (то есть большее, чем нужно количество градусов), отрицательное значение – «недооценку» по часовой стрелке. Распределение ошибок E использовалось для расчёта модели смещения для условия с запоминанием средней ориентации, а для двух других условий (запоминание одной и четырёх ориентаций) показатель ошибки переводился в величину *сдвига к среднему* (B). Сдвиг к среднему был всегда по модулю равен ошибке, однако знак мог меняться на противоположный в зависимости от положения средней ориентации в пробе. Если значение ориентации тестируемого элемента было больше среднего, то сдвиг к среднему был равен ошибке с обратным знаком (так как «переоценка» ориентации тестируемого элемента в данном случае означает сдвиг в сторону противоположную от среднего, и наоборот). Если тестируемый объект имел ориентацию меньше средней, то сдвиг к среднему равняется ошибке без изменения знака (так как «переоценка» ориентации тестируемого элемента в данном случае означает сдвиг в сторону среднего, и наоборот). Например, если в пробе со средней ориентацией равной 30° при отчёте об элементе с ориентацией 40° (то есть правильная ориентация больше средней) испытуемый отвечает, что ориентация равняется 45° , то значение ошибки (E) будет равняться 5° . Однако испытуемый ошибся в сторону противоположную от среднего, следовательно, сдвиг к среднему (B) должен быть с противоположным знаком, то есть -5° .

После вычисления, значения ошибок (для условия с запоминанием среднего) и сдвига к среднему (для двух других заданий) использовались для расчёта модели смещения [Zhang &

Luck, 2008], которая основана на следующей логике. По ответам испытуемых строился график плотности вероятности (рис. 3): для этого по оси X откладывалась величина ошибки или сдвига к среднему, а по оси Y – вероятность получения данного значения у испытуемого. Получившаяся кривая, на самом деле, состояла из двух распределений (которые можно отделить друг от друга методом стандартной оценки), отражающих два разных вида ответов. Первая составляющая – равномерное распределение – отражала случайные угадывания в пробах, когда тестируемый элемент не находился в памяти испытуемого. Испытуемый в данном случае выбирал случайное место на круговой шкале признака, а так как все значения являлись равновероятными, то при большом количестве проб данный компонент принимал форму равномерного распределения. Чем больше случайных ответов испытуемый давал в эксперименте, тем выше вероятность данного типа ответа, и тем выше над осью X располагался компонент равномерного распределения. Таким образом, подсчет площади под ним даёт значение *вероятности случайного угадывания* (то есть того, что тестируемый элемент не находился в памяти).

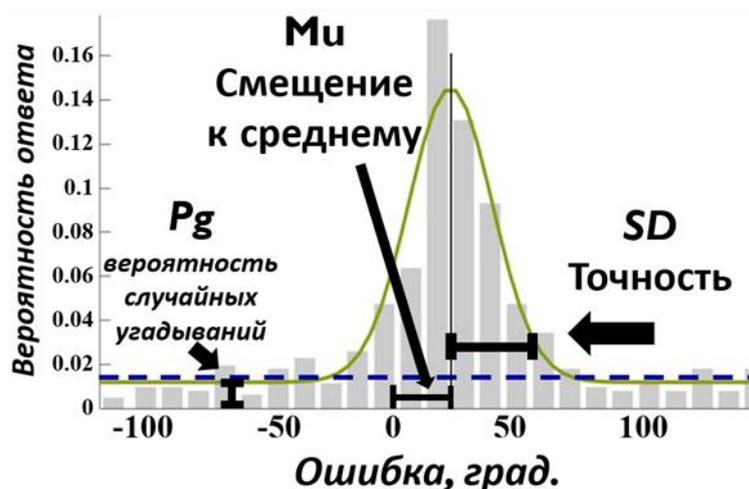


Рис. 3. Графическое представление показателей, получаемых с помощью модели смешения [Zhang & Luck, 2008].

Вторая составляющая итогового распределения – нормальное распределение – отражала ответы разной точности в пробах, в которых испытуемый что-то помнил о тестируемом элементе. Чем в среднем более неточные ответы давали испытуемые, тем более широким становился компонент нормального распределения, поэтому показатель стандартного отклонения являлся величиной (обратной), отражающей *точность* хранящейся в памяти репрезентации (так как случайные угадывания не входили в данный компонент). Если в ответах испытуемых имелась систематическая ошибка (в сторону среднего, как в данной работе), то компонент нормального распределения оказывался сдвинутым относительно нуля

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной... на определённую величину, которая являлась показателем *смещения к среднему*. Данную величину нельзя путать со сдвигом к среднему – величиной, которая, как было сказано выше, высчитывалась до использования модели смещения и являлась лишь ошибкой при ответе, которая учитывала положение среднего в пробе.

Таким образом, результаты для каждого условия эксперимента переводились в три показателя с помощью модели смещения [Zhang & Luck, 2008]: точность репрезентации (SD), вероятность случайного угадывания (P_g) и смещение к среднему (μ), которые рассчитывались отдельно для каждого испытуемого.

Результаты

Данный раздел для удобства восприятия информации будет разделён на три части, соответствующих описанию результатов для каждого показателя хранения (смещения к среднему, вероятности случайных угадываний и точности репрезентации). Для выявления главных эффектов задачи (запоминание одной, четырёх или средней ориентации) и интервала удержания (1/4/7 с), а также их взаимодействия был проведен двухфакторный дисперсионный анализ с повторными измерениями для каждого показателя хранения. При обнаружении статистически значимых эффектов проводились попарные сравнения с помощью двухвыборочного t-критерия Стьюдента для зависимых выборок. Одновыборочный t-критерий Стьюдента использовался для тестирования гипотез об отличии полученных величин от нуля.

Смещение к среднему

Данный показатель анализировался только для двух задач: для запоминания одной ориентации и запоминания четырёх; для задачи запоминания среднего анализ этого показателя неинформативен. С помощью дисперсионного анализа был выявлен главный эффект задачи ($F[1, 15] = 133.545, p < .001, \eta^2_p = .899$), заключающийся в том, что в условии с запоминанием четырёх ориентаций смещение к среднему было значительно больше, чем в условии с запоминанием одной ($t(15) = 11.56, p < .001, \text{Cohen's } d = 2.889$). Более того, сравнение данного показателя с нулём выявило значимые отличия только в условии с запоминанием четырёх ориентаций для всех трёх интервалов удержания (средние значения $> 12^\circ$, все $t(15) > 8.2, p < .001, \text{Cohen's } d > 2.04$), в то время как показатели в условии с запоминанием одной ориентации были неотличимы от нуля (средние значения $< 1.9^\circ$, все $t(15) < 2.22, p > .023$, а с поправкой Бонферрони = .008, $\text{Cohen's } d < .554$). Не было обнаружено главного эффекта интервала удержания ($F[2, 30] = .339, p = .715, \eta^2_p = .022$): величина смещения к среднему оставалась

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной... постоянной для каждой задачи вне зависимости от времени удержания. Взаимодействия между факторами интервала хранения и задачи также обнаружено не было ($F[2, 30] = 2.685, p = .085, \eta^2_p = .152$), что означает одинаковую динамику показателя смещения к среднему для одного и для четырёх объектов.

Основные результаты изображены на рисунке 4. Важно зафиксировать наличие смещения к среднему в условии «запомнить четыре», но не в условии «запомнить один» (что является сильнейшим свидетельством в пользу теории иерархического кодирования) и отсутствие изменения показателя смещения к среднему после различных интервалов удержания для обеих задач.

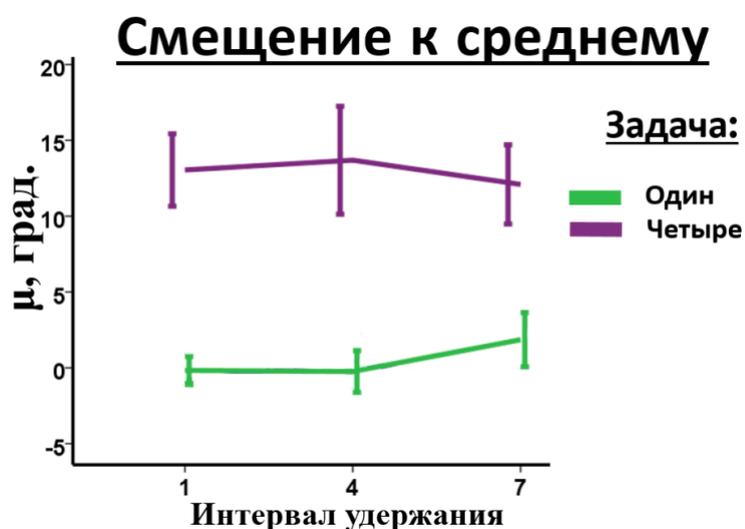


Рис. 4. Значения показателя смещения к среднему (μ) для разных условий эксперимента.

Примечания. Столбики ошибок обозначают 95% межиндивидуальные доверительные интервалы.

Вероятность случайного угадывания (случайного ответа)

Были обнаружены главные эффекты как для фактора времени ($F[2,30] = 4.772; p = .016; \eta^2_p = .241$), так и для фактора задачи ($F[2,30] = 8.216; p = .001; \eta^2_p = .354$). Парные сравнения выявили, что при выполнении задачи на запоминание четырёх объектов вероятность нахождения элемента в памяти ниже, чем при задаче на запоминание среднего ($t(15) = 4.667, p < .001, \text{Cohen's } d = 1.167$). Также после интервала удержания, равного одной секунде, вероятность случайного угадывания (то есть того, что элемент отсутствует в памяти) была ниже, чем после семисекундной задержки ($t(15) = 2.379, p = .031, \text{Cohen's } d = .595$). Важно отметить, что средние значения вероятностей случайного угадывания оказались не очень высокими: все они не превышали 12% – однако практически все значимо отличались от нуля ($t(15) > 3.313, p < .003, \alpha$ с поправкой Бонферрони = .008, Cohen's $d > .828$). Взаимодействие

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной... между факторами времени удержания и задания оказалось незначимым ($F[4,60] = 1.303$; $p = .279$; $\eta^2_p = .08$), что говорит об одинаковой динамике вероятности случайных угадываний для всех трёх задач.

Основные результаты этой части анализа изображены на рисунке 5. Данные показывают увеличение уровня случайных угадываний с течением времени, характерное для всех задач.

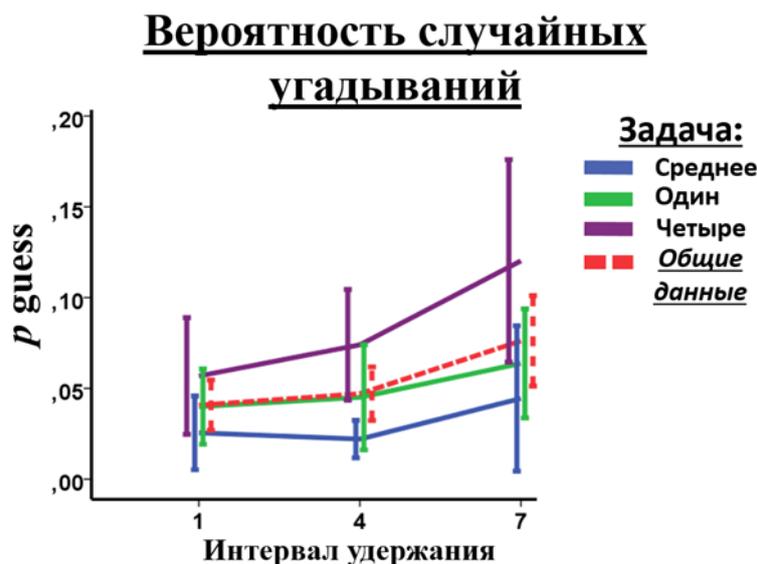


Рис. 5. Значения вероятности случайных угадываний (случайного ответа, P_g) для разных условий эксперимента.

Примечания. «Общие данные» отображают средние значения вероятности случайных угадываний для каждого интервала удержания (они рассчитаны на основе предварительно усредненных значений для каждого испытуемого по трем задачам). Столбики ошибок обозначают 95% межиндивидуальные доверительные интервалы.

Точность репрезентации

При анализе показателя точности репрезентации (важно, что точность – это величина обратная SD, изображенного на рис. 6) обнаружены главные эффекты как для фактора времени ($F [2,45] = 4.321$; $p = .022$; $\eta^2_p = .224$), так и для фактора задания ($F [2,30] = 70.288$; $p < .001$; $\eta^2_p = .824$). Содержательно это выражается в том, что при задаче на запоминание четырёх ориентаций точность значимо ниже (а SD, наоборот, выше), чем при задаче на запоминание среднего и одного объекта, а также точность при запоминании среднего ниже, чем при запоминании одного объекта (все $t(15) > 4.201$, $p < .001$, Cohen's $d > 1.104$). При интервале удержания, равном одной секунде, точность значимо выше, чем после четырёх- и семисекундной задержке (все $t(15) > 2.925$, $p < .011$, Cohen's $d > .731$). Взаимодействия между

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной... факторами обнаружено не было ($F [4,60] = .653$; $p = .627$; $\eta^2_p = .042$), что говорит о том, что динамика показателя точности репрезентации для трёх задач не отличалась.

Основные результаты этой части анализа: уменьшение точности хранимой репрезентации с течением времени, одинаковое для всех задач.

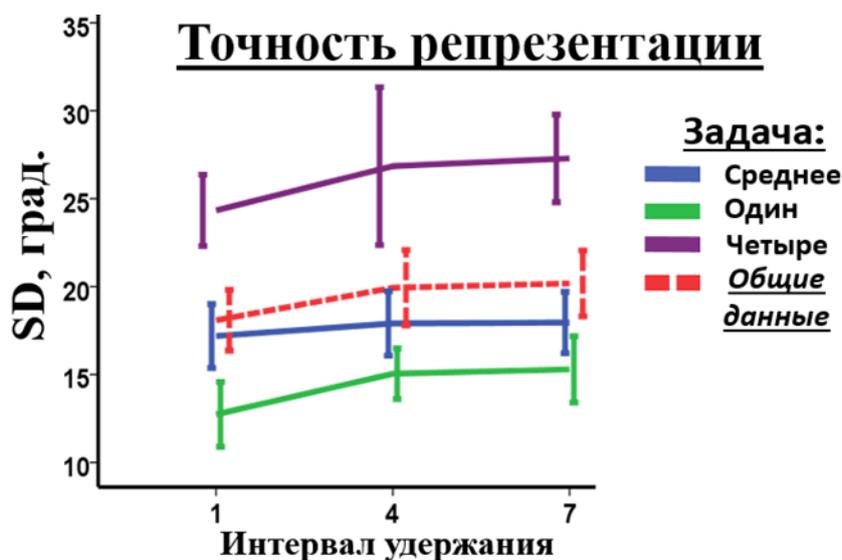


Рис. 6. Значения SD распределений ответов (обратно пропорционально точности репрезентации) для разных условий эксперимента.

Примечания. «Общие данные» отображают средние значения SD для каждого интервала удержания (они рассчитаны на основе предварительно усредненных значений для каждого испытуемого по трем задачам). Столбики ошибок обозначают 95% межиндивидуальные доверительные интервалы.

Обсуждение результатов

Обсуждение необходимо начать с результата, без которого сложно было бы интерпретировать полученные данные в рамках теории иерархического кодирования: при запоминании четырёх ориентаций испытуемые во время отчёта систематически смещают индивидуальную ориентацию объекта в сторону средней ориентации по запоминаемому набору. Это и составляет суть феномена иерархического кодирования [Brady & Alvarez, 2011]. Данный эффект выражен очень сильно: среднее значение смещения равно 12° (среднее разницы между индивидуальной ориентацией и средней равна 20°). Таким образом, испытуемые смещают свой ответ об индивидуальной репрезентации примерно на половину расстояния между средним и правильным ответом. Однако всё же необходимо отметить, что испытуемый не

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной... заменяет свой ответ средним признаком, что подтверждает идею иерархического кодирования о том, что репрезентации в ЗРП представляют собой именно интеграцию информации об индивидуальном элементе и обо всех запоминаемых объектах, что и приводит к влиянию группового среднего на индивидуальные репрезентации [Brady & Alvarez, 2011; Utochkin & Brady, 2020]. Важно отметить, что смещение в сторону среднего не обнаружено для базового условия, в котором испытуемые запоминали одну ориентацию, что подтверждает предположение о том, что в данном условии ЗРП тестировалась на уровне индивидуальной репрезентации. Так как три нерелевантных объекта в этом случае не загружались в ЗРП, ансамблевая статистика (то есть среднее по всем запоминаемым объектам) не должна была храниться в памяти, поэтому ответы испытуемых систематически не искажались.

Главным результатом проведённого исследования является обнаружение одинаковой динамики хранения, характерной как для элементов иерархической репрезентации (среднего и отдельного элемента), так и для самой интегральной иерархической репрезентации (условие «запомнить четыре»). Данные задачи различались по сложности: и точность репрезентации, и вероятность того, что тестируемый объект находится в памяти, были ниже при требовании удерживать в памяти четыре объекта по сравнению со средним или одним объектом. Однако несмотря на это, отдельные элементы иерархической репрезентации и сама иерархическая репрезентация показывали одинаковую динамику хранения. Данный результат подтверждает предположение о том, что формирование иерархических репрезентаций в ЗРП связано именно с особым кодированием материала, а не с особенностями процесса хранения разных частей иерархической репрезентации. В частности, для данной работы интересен тот факт, что взаимодействие между факторами задачи и времени удержания отсутствует, что говорит об одинаковой подверженности забыванию среднего и индивидуальных репрезентаций. Следовательно, сам феномен не связан с тем, что среднее хранится надёжнее, чем индивидуальные репрезентации, заменяя их с течением времени, что и приводит к смещению к среднему. Данный вывод может быть дополнен в будущих исследованиях с помощью изучения динамики хранения иерархических репрезентаций после коротких интервалов удержания (меньше секунды).

Одинаковую динамику хранения разных частей иерархической репрезентации можно охарактеризовать тремя результатами. С увеличением интервала удержания репрезентации в ЗРП: (1) не изменяется величина смещения к среднему, (2) происходит увеличение вероятности случайных угадываний, (3) наблюдается уменьшение точности хранения объектов. Первый из перечисленных результатов является ещё одним свидетельством в пользу

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной... связи иерархических репрезентаций с особыми процессами кодирования, а не хранения. Ведь в противном случае хранение различных частей репрезентации с разной надёжностью оказало бы значимое влияние на смещение к среднему с течением времени.

Увеличение уровня случайных угадываний (или снижение вероятности того, что тестируемый объект находится в памяти) подтверждает предсказание теории внезапной смерти о том, что забывания в ЗРП происходит путём полного и мгновенного исчезновения репрезентации из памяти [Zhang & Luck, 2009]. Если испытуемого спрашивают об объекте, которого нет в памяти, он вынужден отвечать наугад, что и приводит к увеличению вероятности случайных угадываний, согласно модели смешения [Zhang & Luck, 2008]. В данном исследовании мы тестировали не просто память на индивидуальные объекты, а хранение отдельных частей и интегральной иерархической репрезентации, поэтому следует сделать вывод о том, что при хранении иерархических репрезентаций с течением времени увеличивается вероятность исчезновения какой-либо части репрезентации из памяти. Данный процесс частично объясняет забывание иерархических репрезентаций в ЗРП.

Однако если посмотреть на средние значения для вероятности случайных угадываний, то можно увидеть, что они не очень велики ($< 12\%$). Если рассчитывать объём ЗРП по формуле $C = n \times (1 - P_g)$, где n – это количество предъявленных объектов (1 или 4 в данном случае), а P_g – вероятность случайных угадываний [Уточкин et al., 2016], то полученные значения после самого длинного интервала удержания равняются 0,956 (для запоминания среднего); 0,936 (для одного объекта) и 3,52 (для четырёх объектов). Полученные величины объёма памяти говорят о том, что практически всегда все элементы находились в памяти. Данный результат представляется важным для подтверждения тезиса о том, что иерархическое хранение репрезентаций может быть выгодно не только для увеличения изначального объёма ЗРП [Brady & Alvarez, 2011, 2015a], но и может приводить к меньшим потерям вследствие забывания с течением времени. Маленькие величины вероятностей случайных угадываний также отражают характеристики использованных стимулов: диапазон индивидуальных значений был равен 60 градусам, что является небольшой величиной, вследствие чего происходило относительно точное усреднение значений, что приводило к меньшим потерям при хранении. При увеличении разброса – точность и вероятность нахождения элемента в ЗРП уменьшается [Im & Halberda, 2013; Utochkin & Brady, 2020; Utochkin & Tiurina, 2014]. Подтверждением этого тезиса может служить и классическое исследование в рамках теории внезапной смерти [Zhang & Luck, 2009], в котором авторы предъявляли для запоминания всего три объекта, однако использовали в качестве запоминаемых признаков – разные цвета

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной... (которые плохо усредняются в связи с категориальностью данного признака). Уровень случайных угадываний в этом случае уже после односекундного интервала удержания равнялся 20% и увеличивался практически в два раза после десяти секунд удержания.

Уменьшение точности с течением времени, наблюдаемое как для отдельных частей иерархической репрезентации, так и для интегральной репрезентации, не согласуется с теорией внезапной смерти. Согласно предсказанию последней (а также нашей гипотезой), при возрастании вероятности случайного угадывания, точность репрезентаций не должна меняться, так как это скорее характерно для пассивных систем памяти, а ЗРП является активной системой. По этой причине данный результат говорит скорее в пользу теории угасания, утверждающей, что именно уменьшение точности репрезентаций с течением времени является сущностью процесса забывания в ЗРП [Ricker et al., 2014; Ricker & Cowan, 2010]. В данной работе была обнаружена схожая динамика величины данного показателя для всех частей репрезентации, следовательно, необходимо сделать вывод о том, что при хранении происходит постепенное уменьшение точности хранения и отдельных частей, и, как следствие, интегральной иерархической репрезентации.

Три описанных результата подводят к идее о том, что забывание репрезентаций (в большинстве случаев – иерархических [Brady & Alvarez, 2015a]) в ЗРП может объясняться с помощью одновременного действия двух процессов: угасания и внезапной смерти. При разных стимуляциях и задачах они могут иметь разные веса в объяснении забывания: в каких-то случаях репрезентации будут больше подвержены внезапной смерти, в других – угасанию. Взаимное действие процессов угасания и внезапной смерти согласуется с существованием нейрофизиологических исследований, предлагающих объяснения обоих вышеперечисленных механизмов на нейронном уровне. Возможность хранить репрезентации в ЗРП связана с синхронной активностью распределённой нейронной сети, в которой действует принцип «возвратной петли»: одни нейронные ансамбли активируют другие, а те генерируют сигналы обратной связи для активации первых [Constantinidis & Wang, 2004]. Феномен внезапной смерти объясняется тем, что при запоминании нескольких объектов необходимо поддерживать сложную синхронизированную активность нескольких возвратных петель (один объект – одна петля), разнесённых по времени и, возможно, по частоте. Данная активность может спонтанно затухать, приводя к потере всей репрезентации. Эмпирические данные в пользу данной гипотезы получены как на людях и животных, так и на материале биологически правдоподобных нейронных сетей [Luck & Vogel, 2013; Raffone & Wolters, 2001]. Феномен угасания объясняется, основываясь на тех же допущениях, с помощью

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной... механизма популяционного ответа: активность одной петли становится шумом для нейронов, задействованных в создании активности в другой, это приводит к ещё большему увеличению шума, сложности выделения из него сигнала, что выражается в уменьшении точности, хранимой репрезентации [Bays, 2014, 2015; Buschman et al., 2011; Sprague et al., 2014].

Выводы

В данной работе исследовался вопрос о динамике хранения иерархических репрезентаций в ЗРП. Результаты проведённого эксперимента показывают, что забывание в ЗРП происходит вследствие совместного действия процессов уменьшения точности хранимых репрезентаций и увеличения вероятности их полного исчезновения с течением времени. Данная динамика характерна как для интегральной иерархической репрезентации, так и для её частей (информации об индивидуальных объектах и групповой информации). Полученные данные свидетельствуют, во-первых, в пользу теории иерархического кодирования и показывают, что хранение репрезентаций разных объектов не носит независимый характер – репрезентация каждого объекта является интеграцией индивидуальной информации об отдельном объекте и групповой информации обо всех запоминаемых объектах. Во-вторых, в пользу предположения о том, что формирование иерархических репрезентаций в ЗРП связано с особым кодированием материала, а не с особенностями процесса хранения разных частей иерархической репрезентации.

Благодарности

Автор выражает благодарность Игорю Сергеевичу Уточкину, без которого это исследование не состоялось бы вовсе.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-313-90051.

Литература

Уточкин, И.С., Юревич, М.А., & Булатова, М.Е. (2016). Зрительная рабочая память: Методы, исследования, теории. *Российский Журнал Когнитивной Науки*, 3(3), 58–76.

Alloway, T.P. & Alloway, R.G. (2010). Investigating the predictive roles of working memory and IQ in academic attainment. *Journal of Experimental Child Psychology*, 106(1), 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.11.003>.

Alvarez, G.A. & Cavanagh, P. (2004). The Capacity of Visual Short-Term Memory is Set Both by Visual Information Load and by Number of Objects. *Psychological Science*, 15(2), 106–111. <https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2004.01502006.x>.

Ariely, D. (2001). Seeing Sets: Representation by Statistical Properties. *Psychological Science*, 12(2), 157–162. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00327>.

Astle, D.E., Summerfield, J., Griffin, I., & Nobre, A.C. (2012). Orienting attention to locations in mental representations. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74(1), 146–162. <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0218-3>.

Awh, E., Barton, B., & Vogel, E.K. (2007). Visual working memory represents a fixed number of items regardless of complexity. *Psychological Science*, 18(7), 622–628.

Baddeley, A. (1986). *Working memory Oxford: Clarendon*.

Bays, P.M. (2014). Noise in neural populations accounts for errors in working memory. *Journal of Neuroscience*, 34(10), 3632–3645.

Bays, P.M. (2015). Spikes not slots: Noise in neural populations limits working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(8), 431–438.

Bays, P.M., Catalao, R.F.G., & Husain, M. (2009). The precision of visual working memory is set by allocation of a shared resource. *Journal of Vision*, 9(10), 7–7. <https://doi.org/10.1167/9.10.7>.

Bays, P.M., & Husain, M. (2008). Dynamic Shifts of Limited Working Memory Resources in Human Vision. *Science*, 321(5890), 851–854. <https://doi.org/10.1126/science.1158023>.

Berryhill, M.E., Richmond, L.L., Shay, C.S., & Olson, I.R. (2012). Shifting Attention among Working Memory Representations: Testing Cue Type, Awareness, and Strategic Control. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65(3), 426–438. <https://doi.org/10.1080/17470218.2011.604786>.

Brady, T.F., & Alvarez, G.A. (2011). Hierarchical Encoding in Visual Working Memory: Ensemble Statistics Bias Memory for Individual Items. *Psychological Science*, 22(3), 384–392.

<https://doi.org/10.1177/0956797610397956>.

Brady, T.F., & Alvarez, G.A. (2015a). No evidence for a fixed object limit in working memory: Spatial ensemble representations inflate estimates of working memory capacity for complex objects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 41(3), 921–929. <https://doi.org/10.1037/xlm0000075>.

Brady, T.F., & Alvarez, G.A. (2015b). Contextual effects in visual working memory reveal hierarchically structured memory representations. *Journal of Vision*, 15(15), 6. <https://doi.org/10.1167/15.15.6>.

Brady, T.F., Konkle, T., & Alvarez, G.A. (2011). A review of visual memory capacity: Beyond individual items and toward structured representations. *Journal of Vision*, 11(5), 4–4. <https://doi.org/10.1167/11.5.4>.

Brady, T.F., & Tenenbaum, J.B. (2013). A probabilistic model of visual working memory: Incorporating higher order regularities into working memory capacity estimates. *Psychological Review*, 120(1), 85–109. <https://doi.org/10.1037/a0030779>.

Buschman, T.J., Siegel, M., Roy, J.E., & Miller, E.K. (2011). Neural substrates of cognitive capacity limitations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(27), 11252–11255.

Chong, S.C., & Treisman, A. (2003). Representation of statistical properties. *Vision Research*, 43(4), 393–404. [https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(02\)00596-5](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(02)00596-5).

Chong, S.C., & Treisman, A. (2005a). Attentional spread in the statistical processing of visual displays. *Perception & Psychophysics*, 67(1), 1–13. <https://doi.org/10.3758/BF03195009>.

Chong, S.C., & Treisman, A. (2005b). Statistical processing: Computing the average size in perceptual groups. *Vision Research*, 45(7), 891–900. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.10.004>.

Constantinidis, C., & Wang, X.-J. (2004). A neural circuit basis for spatial working memory. *The Neuroscientist*, 10(6), 553–565.

Corbin, J.C., & Crawford, L.E. (2018). Biased by the Group: Memory for an Emotional Expression

Biases Towards the Ensemble. *Collabra: Psychology*, 4(1). <https://doi.org/10.1525/collabra.186>.

Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 87–114. <https://doi.org/10.1017/S0140525X01003922>.

Dubé, C., Zhou, F., Kahana, M.J., & Sekuler, R. (2014). Similarity-based distortion of visual short-term memory is due to perceptual averaging. *Vision Research*, 96, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2013.12.016>.

Griffiths, S., Rhodes, G., Jeffery, L., Palermo, R., & Neumann, M.F. (2018). The average facial expression of a crowd influences impressions of individual expressions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 44(2), 311–319. <https://doi.org/10.1037/xhp0000446>.

Huang, L. (2010). Characterizing the nature of visual conscious access: The distinction between features and locations. *Journal of Vision*, 10(10), 24–24. <https://doi.org/10.1167/10.10.24>.

Im, H.Y., & Halberda, J. (2013). The effects of sampling and internal noise on the representation of ensemble average size. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 75(2), 278–286. <https://doi.org/10.3758/s13414-012-0399-4>.

Khvostov, V., Utochkin, I., & Brady, T. (2020). Hierarchical representations in visual working memory are space-based. *Journal of Vision*, 20(11), 351. <https://doi.org/10.1167/jov.20.11.351>.

Lee, B., & Harris, J. (1996). Contrast Transfer Characteristics of Visual Short-term Memory. *Vision Research*, 36(14), 2159–2166. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00271-5](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00271-5).

Luck, S.J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390(6657), 279–281. <https://doi.org/10.1038/36846>.

Luck, S.J., & Vogel, E.K. (2013). Visual working memory capacity: From psychophysics and neurobiology to individual differences. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(8), 391–400. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.06.006>.

Ma, W.J., Husain, M., & Bays, P.M. (2014). Changing concepts of working memory. *Nature*

- Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной... *Neuroscience*, 17(3), 347–356. <https://doi.org/10.1038/nn.3655>.
- Miller, G.A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81–97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>.
- Peirce, J., Gray, J.R., Simpson, S., MacAskill, M., Höchenberger, R., Sogo, H., Kastman, E., & Lindeløv, J.K. (2019). PsychoPy2: Experiments in behavior made easy. *Behavior Research Methods*, 51(1), 195–203. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-01193-y>.
- Pertsov, Y., Bays, P.M., Joseph, S., & Husain, M. (2013). Rapid forgetting prevented by retrospective attention cues. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39(5), 1224–1231. <https://doi.org/10.1037/a0030947>.
- Raffone, A., & Wolters, G. (2001). A Cortical Mechanism for Binding in Visual Working Memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(6), 766–785. <https://doi.org/10.1162/08989290152541430>.
- Ricker, T.J., & Cowan, N. (2010). Loss of visual working memory within seconds: The combined use of refreshable and non-refreshable features. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(6), 1355–1368. <https://doi.org/10.1037/a0020356>.
- Ricker, T.J., Spiegel, L.R., & Cowan, N. (2014). Time-based loss in visual short-term memory is from trace decay, not temporal distinctiveness. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 40(6), 1510–1523. <https://doi.org/10.1037/xlm0000018>.
- Schurgin, M.W. (2018). Visual memory, the long and the short of it: A review of visual working memory and long-term memory. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 80(5), 1035–1056. <https://doi.org/10.3758/s13414-018-1522-y>.
- Sprague, T.C., Ester, E.F., & Serences, J.T. (2014). Reconstructions of information in visual spatial working memory degrade with memory load. *Current Biology*, 24(18), 2174–2180.
- Utochkin, I.S., & Brady, T.F. (2020). Independent storage of different features of real-world objects in long-term memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 149(3), 530–549. <https://doi.org/10.1037/xge0000664>.

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной...

Utochkin, I.S., & Tiurina, N.A. (2014). Parallel averaging of size is possible but range-limited: A reply to Marchant, Simons, and De Fockert. *Acta Psychologica*, 146, 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2013.11.012>.

Whitney, D., & Yamanashi Leib, A. (2018). Ensemble Perception. *Annual Review of Psychology*, 69, 105–129. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010416-044232>.

Wilken, P., & Ma, W.J. (2004). A detection theory account of change detection. *Journal of Vision*, 4(12), 11. <https://doi.org/10.1167/4.12.11>.

Zhang, W., & Luck, S.J. (2008). Discrete fixed-resolution representations in visual working memory. *Nature*, 453(7192), 233–235. <https://doi.org/10.1038/nature06860>.

Zhang, W., & Luck, S.J. (2009). Sudden Death and Gradual Decay in Visual Working Memory. *Psychological Science*, 20(4), 423–428. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2009.02322.x>.

Поступила в редакцию 01 декабря 2021 г. Дата публикации: 30 апреля 2022 г.

Сведения об авторе

Хвостов Владислав Александрович. Магистр психологических наук, аспирант школы психологии НИУ «Высшая школа экономики», младший научный сотрудник научно-учебной лаборатории когнитивных исследований НИУ ВШЭ, приглашенный преподаватель департамента психологии НИУ ВШЭ, Армянский переулок, 4 стр. 2, 101100 Москва, Россия. E-mail: khvostov.vladislav@gmail.com

Ссылка для цитирования

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной рабочей памяти. Психологические исследования. 2022. Т. 15, № 82. С. 7. URL: <https://psystudy.ru>

Адрес статьи: <https://doi.org/10.54359/ps.v15i82.1102>

Khvostov V.A.¹ The time course of retaining hierarchical representation in visual working memory

¹ HSE University, Moscow, Russia

Hierarchical encoding theory claims that representations of objects in visual working memory (VWM) are not stored independently. Rather, a representation of an item encompasses both individual information about this object as well as the compressed group information about all memorized items (e.g., the average feature value). This study aimed to investigate the time course of maintaining the hierarchical representations in VWM. Participants were presented with four differently oriented triangles for 500 ms. Following a 1-, 4-, or 7-second delay, they reported either an individual orientation or the average orientation of all triangles. Prior to the stimuli presentations, each participant was informed with what needed to be memorized: a specific orientation, all four individual orientations, or an average orientation. Using the mixture model, we estimated a probability of a tested representation being in VWM and its precision, as well as a systematic bias that would indicate hierarchical encoding. We found no difference between the dynamics of maintaining different parts of hierarchical representation (the average and individual objects) which supports the idea that the hierarchical representations are related to encoding, rather than storing information in VWM. Both precision and the probability of an item being in memory were shown to decrease over time. This finding supports "Sudden Death" and "Gradual Decay" accounts for storing hierarchical representations.

Keywords: hierarchical encoding, visual working memory, forgetting in working memory, ensemble summary statistics

Acknowledgement

The author thanks Igor Utochkin. This study would not have taken place at all without him.

Funding

The reported study was funded by RFBR, project number 20-313-90051.

References

Utochkin, I.S., Yurevich, M.A., & Bulatova, M.E. (2016). Zritel'naya rabochaya pamyat': Metody, issledovaniya, teorii. *Rossiiskij Zhurnal Kognitivnoj Nauki*, 3(3), 58–76. (In Russian)

Alloway, T.P. & Alloway, R.G. (2010). Investigating the predictive roles of working memory and IQ in academic attainment. *Journal of Experimental Child Psychology*, 106(1), 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.11.003>.

Alvarez, G.A. & Cavanagh, P. (2004). The Capacity of Visual Short-Term Memory is Set Both by Visual Information Load and by Number of Objects. *Psychological Science*, 15(2), 106–111. <https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2004.01502006.x>.

Ariely, D. (2001). Seeing Sets: Representation by Statistical Properties. *Psychological Science*, 12(2), 157–162. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00327>.

Astle, D.E., Summerfield, J., Griffin, I., & Nobre, A.C. (2012). Orienting attention to locations in mental representations. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74(1), 146–162. <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0218-3>.

Awh, E., Barton, B., & Vogel, E.K. (2007). Visual working memory represents a fixed number of items regardless of complexity. *Psychological Science*, 18(7), 622–628.

Baddeley, A. (1986). *Working memory Oxford: Clarendon*.

Bays, P.M. (2014). Noise in neural populations accounts for errors in working memory. *Journal of Neuroscience*, 34(10), 3632–3645.

Bays, P.M. (2015). Spikes not slots: Noise in neural populations limits working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(8), 431–438.

Bays, P.M., Catalao, R.F.G., & Husain, M. (2009). The precision of visual working memory is set by allocation of a shared resource. *Journal of Vision*, 9(10), 7–7. <https://doi.org/10.1167/9.10.7>.

Bays, P.M., & Husain, M. (2008). Dynamic Shifts of Limited Working Memory Resources in Human Vision. *Science*, 321(5890), 851–854. <https://doi.org/10.1126/science.1158023>.

Berryhill, M.E., Richmond, L.L., Shay, C.S., & Olson, I.R. (2012). Shifting Attention among Working Memory Representations: Testing Cue Type, Awareness, and Strategic Control. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65(3), 426–438. <https://doi.org/10.1080/17470218.2011.604786>.

Brady, T.F., & Alvarez, G.A. (2011). Hierarchical Encoding in Visual Working Memory: Ensemble Statistics Bias Memory for Individual Items. *Psychological Science*, 22(3), 384–392.

<https://doi.org/10.1177/0956797610397956>.

Brady, T.F., & Alvarez, G.A. (2015a). No evidence for a fixed object limit in working memory: Spatial ensemble representations inflate estimates of working memory capacity for complex objects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 41(3), 921–929. <https://doi.org/10.1037/xlm0000075>.

Brady, T.F., & Alvarez, G.A. (2015b). Contextual effects in visual working memory reveal hierarchically structured memory representations. *Journal of Vision*, 15(15), 6. <https://doi.org/10.1167/15.15.6>.

Brady, T.F., Konkle, T., & Alvarez, G.A. (2011). A review of visual memory capacity: Beyond individual items and toward structured representations. *Journal of Vision*, 11(5), 4–4. <https://doi.org/10.1167/11.5.4>.

Brady, T.F., & Tenenbaum, J.B. (2013). A probabilistic model of visual working memory: Incorporating higher order regularities into working memory capacity estimates. *Psychological Review*, 120(1), 85–109. <https://doi.org/10.1037/a0030779>.

Buschman, T.J., Siegel, M., Roy, J.E., & Miller, E.K. (2011). Neural substrates of cognitive capacity limitations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(27), 11252–11255.

Chong, S.C., & Treisman, A. (2003). Representation of statistical properties. *Vision Research*, 43(4), 393–404. [https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(02\)00596-5](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(02)00596-5).

Chong, S.C., & Treisman, A. (2005a). Attentional spread in the statistical processing of visual displays. *Perception & Psychophysics*, 67(1), 1–13. <https://doi.org/10.3758/BF03195009>.

Chong, S.C., & Treisman, A. (2005b). Statistical processing: Computing the average size in perceptual groups. *Vision Research*, 45(7), 891–900. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.10.004>.

Constantinidis, C., & Wang, X.-J. (2004). A neural circuit basis for spatial working memory. *The Neuroscientist*, 10(6), 553–565.

Corbin, J.C., & Crawford, L.E. (2018). Biased by the Group: Memory for an Emotional Expression Biases Towards the Ensemble. *Collabra: Psychology*, 4(1). <https://doi.org/10.1525/collabra.186>.

Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 87–114. <https://doi.org/10.1017/S0140525X01003922>.

Dubé, C., Zhou, F., Kahana, M.J., & Sekuler, R. (2014). Similarity-based distortion of visual short-term memory is due to perceptual averaging. *Vision Research*, 96, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2013.12.016>.

Griffiths, S., Rhodes, G., Jeffery, L., Palermo, R., & Neumann, M.F. (2018). The average facial expression of a crowd influences impressions of individual expressions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 44(2), 311–319. <https://doi.org/10.1037/xhp0000446>.

Huang, L. (2010). Characterizing the nature of visual conscious access: The distinction between features and locations. *Journal of Vision*, 10(10), 24–24. <https://doi.org/10.1167/10.10.24>.

Im, H.Y., & Halberda, J. (2013). The effects of sampling and internal noise on the representation of ensemble average size. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 75(2), 278–286. <https://doi.org/10.3758/s13414-012-0399-4>.

Khvostov, V., Utochkin, I., & Brady, T. (2020). Hierarchical representations in visual working memory are space-based. *Journal of Vision*, 20(11), 351. <https://doi.org/10.1167/jov.20.11.351>.

Lee, B., & Harris, J. (1996). Contrast Transfer Characteristics of Visual Short-term Memory. *Vision Research*, 36(14), 2159–2166. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00271-5](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00271-5).

Luck, S.J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390(6657), 279–281. <https://doi.org/10.1038/36846>.

Luck, S.J., & Vogel, E.K. (2013). Visual working memory capacity: From psychophysics and neurobiology to individual differences. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(8), 391–400. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.06.006>.

Ma, W.J., Husain, M., & Bays, P.M. (2014). Changing concepts of working memory. *Nature*

- Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной... *Neuroscience*, 17(3), 347–356. <https://doi.org/10.1038/nn.3655>.
- Miller, G.A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81–97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>.
- Peirce, J., Gray, J.R., Simpson, S., MacAskill, M., Höchenberger, R., Sogo, H., Kastman, E., & Lindeløv, J.K. (2019). PsychoPy2: Experiments in behavior made easy. *Behavior Research Methods*, 51(1), 195–203. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-01193-y>.
- Pertsov, Y., Bays, P.M., Joseph, S., & Husain, M. (2013). Rapid forgetting prevented by retrospective attention cues. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39(5), 1224–1231. <https://doi.org/10.1037/a0030947>.
- Raffone, A., & Wolters, G. (2001). A Cortical Mechanism for Binding in Visual Working Memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(6), 766–785. <https://doi.org/10.1162/08989290152541430>.
- Ricker, T.J., & Cowan, N. (2010). Loss of visual working memory within seconds: The combined use of refreshable and non-refreshable features. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(6), 1355–1368. <https://doi.org/10.1037/a0020356>.
- Ricker, T.J., Spiegel, L.R., & Cowan, N. (2014). Time-based loss in visual short-term memory is from trace decay, not temporal distinctiveness. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 40(6), 1510–1523. <https://doi.org/10.1037/xlm0000018>.
- Schurgin, M.W. (2018). Visual memory, the long and the short of it: A review of visual working memory and long-term memory. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 80(5), 1035–1056. <https://doi.org/10.3758/s13414-018-1522-y>.
- Sprague, T.C., Ester, E.F., & Serences, J.T. (2014). Reconstructions of information in visual spatial working memory degrade with memory load. *Current Biology*, 24(18), 2174–2180.
- Utochkin, I.S., & Brady, T.F. (2020). Independent storage of different features of real-world objects in long-term memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 149(3), 530–549. <https://doi.org/10.1037/xge0000664>.

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной...

Utochkin, I.S., & Tiurina, N.A. (2014). Parallel averaging of size is possible but range-limited: A reply to Marchant, Simons, and De Fockert. *Acta Psychologica*, 146, 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2013.11.012>.

Whitney, D., & Yamanashi Leib, A. (2018). Ensemble Perception. *Annual Review of Psychology*, 69, 105–129. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010416-044232>.

Wilken, P., & Ma, W.J. (2004). A detection theory account of change detection. *Journal of Vision*, 4(12), 11. <https://doi.org/10.1167/4.12.11>.

Zhang, W., & Luck, S.J. (2008). Discrete fixed-resolution representations in visual working memory. *Nature*, 453(7192), 233–235. <https://doi.org/10.1038/nature06860>.

Zhang, W., & Luck, S.J. (2009). Sudden Death and Gradual Decay in Visual Working Memory. *Psychological Science*, 20(4), 423–428. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2009.02322.x>.

Information about authors

Khvostov V.A. Master of Psychology, PhD-student at Psychology graduate school of HSE University, Junior research fellow of Laboratory for Cognitive Research of HSE University, Visiting Lecturer of Psychology department of HSE University, Armyansky pereulok, 4 b.2, 101100 Moscow, Russia.

E-mail: khvostov.vladislav@gmail.com

To cite this article

Khvostov V.A. The time course of retaining hierarchical representation in visual working memory

Khvostov V.A. The time course of retaining hierarchical representation in visual working memory

HSE University, Moscow, Russia

Hierarchical encoding theory claims that representations of objects in visual working memory (VWM) do not store independently. Oppositely, the representation of an item is the result of the integration of individual information about this object and compressed group information about all memorized items (e.g., the average feature value) [Brady & Alvarez, 2011]. This study aims to investigate the time course of maintaining hierarchical representations in VWM. Observers were shown four differently oriented triangles for 500 ms and, after a 1-, 4-, or 7-second delay, they had to report either an individual orientation or the average orientation of all triangles, rotating a probe circle. Before the set presentations, observers were informed that they had to remember one orientation, all four individual orientations, or an average orientation. Using the mixture model [Zhang & Luck, 2008], we estimated a probability of a tested representation being in VWM and its precision, as well as a systematic bias that would indicate hierarchical encoding. We found no difference between the dynamics of maintaining different parts of hierarchical representation (the average and individual objects) which supports the idea that the hierarchical representations are related to encoding, rather than storing information in VWM. Both precision and the probability of an item being in memory decrease over time. It supports "Sudden Death" and "Gradual Decay" accounts for storing hierarchical representations.

Keywords: hierarchical encoding, visual working memory, forgetting in working memory, ensemble summary statistics

Acknowledgement

The author thanks Igor Utochkin. This study would not have taken place at all without him.

Funding

The reported study was funded by RFBR, project number 20-313-90051.

References

Utochkin, I.S., YUrevich, M.A., & Bulatova, M.E. (2016). Zritel'naya rabochaya pamyat': Metody, issledovaniya, teorii. Rossijskij ZHurnal Kognitivnoj Nauki, 3(3), 58–76.

Alloway, T.P. & Alloway, R.G. (2010). Investigating the predictive roles of working memory and IQ in academic attainment. *Journal of Experimental Child Psychology*, 106(1), 20–29.

<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.11.003>.

Alvarez, G.A. & Cavanagh, P. (2004). The Capacity of Visual Short-Term Memory is Set Both by Visual Information Load and by Number of Objects. *Psychological Science*, 15(2), 106–111. <https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2004.01502006.x>.

Ariely, D. (2001). Seeing Sets: Representation by Statistical Properties. *Psychological Science*, 12(2), 157–162. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00327>.

Astle, D.E., Summerfield, J., Griffin, I., & Nobre, A.C. (2012). Orienting attention to locations in mental representations. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74(1), 146–162. <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0218-3>.

Awh, E., Barton, B., & Vogel, E.K. (2007). Visual working memory represents a fixed number of items regardless of complexity. *Psychological Science*, 18(7), 622–628.

Baddeley, A. (1986). *Working memory Oxford: Clarendon*.

Bays, P.M. (2014). Noise in neural populations accounts for errors in working memory. *Journal of Neuroscience*, 34(10), 3632–3645.

Bays, P.M. (2015). Spikes not slots: Noise in neural populations limits working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(8), 431–438.

Bays, P.M., Catalao, R.F.G., & Husain, M. (2009). The precision of visual working memory is set by allocation of a shared resource. *Journal of Vision*, 9(10), 7–7. <https://doi.org/10.1167/9.10.7>.

Bays, P.M., & Husain, M. (2008). Dynamic Shifts of Limited Working Memory Resources in Human Vision. *Science*, 321(5890), 851–854. <https://doi.org/10.1126/science.1158023>.

Berryhill, M.E., Richmond, L.L., Shay, C.S., & Olson, I.R. (2012). Shifting Attention among Working Memory Representations: Testing Cue Type, Awareness, and Strategic Control. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65(3), 426–438. <https://doi.org/10.1080/17470218.2011.604786>.

Brady, T.F., & Alvarez, G.A. (2011). Hierarchical Encoding in Visual Working Memory: Ensemble Statistics Bias Memory for Individual Items. *Psychological Science*, 22(3), 384–392. <https://doi.org/10.1177/0956797610397956>.

Brady, T.F., & Alvarez, G.A. (2015a). No evidence for a fixed object limit in working memory: Spatial ensemble representations inflate estimates of working memory capacity for complex objects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 41(3), 921–929. <https://doi.org/10.1037/xlm0000075>.

Brady, T.F., & Alvarez, G.A. (2015b). Contextual effects in visual working memory reveal hierarchically structured memory representations. *Journal of Vision*, 15(15), 6. <https://doi.org/10.1167/15.15.6>.

Brady, T.F., Konkle, T., & Alvarez, G.A. (2011). A review of visual memory capacity: Beyond individual items and toward structured representations. *Journal of Vision*, 11(5), 4–4. <https://doi.org/10.1167/11.5.4>.

Brady, T.F., & Tenenbaum, J.B. (2013). A probabilistic model of visual working memory: Incorporating higher order regularities into working memory capacity estimates. *Psychological Review*, 120(1), 85–109. <https://doi.org/10.1037/a0030779>.

Buschman, T.J., Siegel, M., Roy, J.E., & Miller, E.K. (2011). Neural substrates of cognitive capacity limitations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(27), 11252–11255.

Chong, S.C., & Treisman, A. (2003). Representation of statistical properties. *Vision Research*, 43(4), 393–404. [https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(02\)00596-5](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(02)00596-5).

Chong, S.C., & Treisman, A. (2005a). Attentional spread in the statistical processing of visual displays. *Perception & Psychophysics*, 67(1), 1–13. <https://doi.org/10.3758/BF03195009>.

Chong, S.C., & Treisman, A. (2005b). Statistical processing: Computing the average size in perceptual groups. *Vision Research*, 45(7), 891–900. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.10.004>.

Constantinidis, C., & Wang, X.-J. (2004). A neural circuit basis for spatial working memory. *The Neuroscientist*, 10(6), 553–565.

Corbin, J.C., & Crawford, L.E. (2018). Biased by the Group: Memory for an Emotional Expression Biases Towards the Ensemble. *Collabra: Psychology*, 4(1). <https://doi.org/10.1525/collabra.186>.

Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 87–114. <https://doi.org/10.1017/S0140525X01003922>.

Dubé, C., Zhou, F., Kahana, M.J., & Sekuler, R. (2014). Similarity-based distortion of visual short-term memory is due to perceptual averaging. *Vision Research*, 96, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2013.12.016>.

Griffiths, S., Rhodes, G., Jeffery, L., Palermo, R., & Neumann, M.F. (2018). The average facial expression of a crowd influences impressions of individual expressions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 44(2), 311–319. <https://doi.org/10.1037/xhp0000446>.

Huang, L. (2010). Characterizing the nature of visual conscious access: The distinction between features and locations. *Journal of Vision*, 10(10), 24–24. <https://doi.org/10.1167/10.10.24>.

Im, H.Y., & Halberda, J. (2013). The effects of sampling and internal noise on the representation of ensemble average size. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 75(2), 278–286. <https://doi.org/10.3758/s13414-012-0399-4>.

Khvostov, V., Utochkin, I., & Brady, T. (2020). Hierarchical representations in visual working memory are space-based. *Journal of Vision*, 20(11), 351. <https://doi.org/10.1167/jov.20.11.351>.

Lee, B., & Harris, J. (1996). Contrast Transfer Characteristics of Visual Short-term Memory. *Vision Research*, 36(14), 2159–2166. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00271-5](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00271-5).

Luck, S.J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390(6657), 279–281. <https://doi.org/10.1038/36846>.

Luck, S.J., & Vogel, E.K. (2013). Visual working memory capacity: From psychophysics and neurobiology to individual differences. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(8), 391–400.

<https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.06.006>.

Ma, W.J., Husain, M., & Bays, P.M. (2014). Changing concepts of working memory. *Nature Neuroscience*, *17*(3), 347–356. <https://doi.org/10.1038/nn.3655>.

Miller, G.A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, *63*(2), 81–97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>.

Peirce, J., Gray, J.R., Simpson, S., MacAskill, M., Höchenberger, R., Sogo, H., Kastman, E., & Lindeløv, J.K. (2019). PsychoPy2: Experiments in behavior made easy. *Behavior Research Methods*, *51*(1), 195–203. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-01193-y>.

Pertsov, Y., Bays, P.M., Joseph, S., & Husain, M. (2013). Rapid forgetting prevented by retrospective attention cues. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *39*(5), 1224–1231. <https://doi.org/10.1037/a0030947>.

Raffone, A., & Wolters, G. (2001). A Cortical Mechanism for Binding in Visual Working Memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *13*(6), 766–785. <https://doi.org/10.1162/08989290152541430>.

Ricker, T.J., & Cowan, N. (2010). Loss of visual working memory within seconds: The combined use of refreshable and non-refreshable features. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *36*(6), 1355–1368. <https://doi.org/10.1037/a0020356>.

Ricker, T.J., Spiegel, L.R., & Cowan, N. (2014). Time-based loss in visual short-term memory is from trace decay, not temporal distinctiveness. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *40*(6), 1510–1523. <https://doi.org/10.1037/xlm0000018>.

Schurgin, M.W. (2018). Visual memory, the long and the short of it: A review of visual working memory and long-term memory. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *80*(5), 1035–1056. <https://doi.org/10.3758/s13414-018-1522-y>.

Sprague, T.C., Ester, E.F., & Serences, J.T. (2014). Reconstructions of information in visual spatial working memory degrade with memory load. *Current Biology*, *24*(18), 2174–2180.

Utochkin, I.S., & Brady, T.F. (2020). Independent storage of different features of real-world objects

Хвостов В.А. Динамика хранения иерархических репрезентаций в зрительной...
in long-term memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 149(3), 530–549.
<https://doi.org/10.1037/xge0000664>.

Utochkin, I.S., & Tiurina, N.A. (2014). Parallel averaging of size is possible but range-limited: A reply to Marchant, Simons, and De Fockert. *Acta Psychologica*, 146, 7–18.
<https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2013.11.012>.

Whitney, D., & Yamanashi Leib, A. (2018). Ensemble Perception. *Annual Review of Psychology*, 69, 105–129. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010416-044232>.

Wilken, P., & Ma, W.J. (2004). A detection theory account of change detection. *Journal of Vision*, 4(12), 11. <https://doi.org/10.1167/4.12.11>.

Zhang, W., & Luck, S.J. (2008). Discrete fixed-resolution representations in visual working memory. *Nature*, 453(7192), 233–235. <https://doi.org/10.1038/nature06860>.

Zhang, W., & Luck, S.J. (2009). Sudden Death and Gradual Decay in Visual Working Memory. *Psychological Science*, 20(4), 423–428. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2009.02322.x>.

Information about author

Khvostov V.A. Master of Psychology, PhD-student of Psychology graduate school of HSE University, Junior research fellow of Laboratory for Cognitive Research of HSE University, Visiting Lecturer of Psychology department of HSE University, Armyansky pereulok, 4/2, 101100 Moscow, Russia.

E-mail: khvostov.vladislav@gmail.com

To cite this article

Khvostov V.A. The time course of retaining hierarchical representation in visual working memory. *Psikhologicheskie Issledovaniya*, 2022, Vol. 15, No. 82, p. 7. <https://psystudy.ru>