

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»

На правах рукописи

Марков Юрий Алексеевич

Структура единиц хранения информации в зрительной рабочей памяти

Резюме диссертации
на соискание ученой степени
кандидата психологических наук

Научный руководитель:
доктор психологических наук
Уточкин Игорь Сергеевич

Москва, 2022

Диссертация подготовлена в Научно-учебной лаборатории когнитивных исследований Национального исследовательского университета “Высшая школа экономики”.

Для защиты отобраны 3 статьи. Все журналы, в которых опубликованы данные статьи, входят в первый или второй квартили по показателям цитируемости Web of Science и/или Scopus.

1. Markov, Y.A., Utochkin, I. S. (2022). Effects of item distinctiveness on the retrieval of objects and object-location bindings from visual working memory. (*Влияние различимости объектов на извлечение информации об объектах и объектно-пространственных связках из зрительной рабочей памяти*) Attention, Perception, & Psychophysics
2. Markov, Y.A., Utochkin, I. S., & Brady T. F. (2021). Real-world objects are not stored in holistic representations in visual working memory. (*Объекты реального мира не хранятся целостно в зрительной рабочей памяти*) Journal of Vision, 21(3): 18, 1–24. DOI: 10.1167/jov.21.3.18.
3. Markov, Y.A., Tiurina, N.A., & Utochkin, I.S. (2019). Different features are stored independently in visual working memory but mediated by object-based representations. (*Признаки хранятся независимо в зрительной рабочей памяти, но модулируются объектными представлениями*) Acta Psychologica, 197, 52-63. DOI: 10.1016/j.actpsy.2019.05.003

Другие статьи по теме диссертации:

4. Markov, Y.M., Tiurina, N.A., Stakina, Y.M., & Utochkin, I.S. (2017). The capacity and precision of visual working memory for objects and ensembles. (*Объем и точность зрительной рабочей памяти для объектов и ансамблей*) Psychology. Journal of HSE, 14(4), 735-756. DOI: 10.17323/1813-8918-2017-4-735-755

Оглавление

1. Введение	4
2. Признаки и объекты как единицы зрительной рабочей памяти	11
3. Репрезентация объектов реального мира в зрительной рабочей памяти	15
4. Извлечение информации из зрительной рабочей памяти	20
Заключение	27
Благодарности	28
Литература	29

1. Введение

Проблема исследования

Мы воспринимаем и взаимодействуем со сложным окружающим миром, который содержит различные объекты со множеством деталей. Рабочая память — это сильно ограниченная когнитивная система (Cowan, 2001; Miller, 1956), которая позволяет нам хранить и обрабатывать информацию о воспринимаемом мире, необходимую для текущих задач (Baddeley, 1986; Baddeley & Hitch, 1974). Зрительная рабочая память оперирует зрительной информацией и, как подсистема рабочей памяти, также ограничена (Luck & Vogel, 1997). Чтобы построить теорию зрительной рабочей памяти необходимо изучить ее строение. В течение последних нескольких десятилетий велись длительные дебаты о структурных единицах зрительной рабочей памяти. Многочисленные исследования предоставили доказательства того, что объекты (Cowan, Chen, & Rouder, 2004; Kahneman, Treisman, & Gibbs, 1992; Lee & Chun, 2001; Luck & Vogel, 1997; Luria & Vogel, 2011; Treisman, 1999; Vogel, Woodman, & Luck, 2001; Xu, 2002; Xu & Chun, 2006; Zhang & Luck, 2008) и отдельные признаки (см. обзор Brady, Konkle, & Alvarez, 2011; Bays, Catalao, & Husain, 2009; Bays, Wu, & Husain, 2011; Fougnie & Alvarez, 2011; Fougnie, Cormiea, & Alvarez, 2013; Pertzov, Dong, Peich, & Husain, 2012; Shin & Ma, 2017; Wang, Cao, Theeuwes, Olivers, & Wang, 2017; Wheeler & Treisman, 2002) могут быть единицами зрительной рабочей памяти. Как могли разные исследования прийти к таким разным выводам? Каковы основные единицы зрительной рабочей памяти? Хранит ли зрительная рабочая память репрезентации целых объектов или отдельные признаки? Возможно ли, что ни объекты, ни признаки, а нечто более сложное является единицей зрительной рабочей памяти? Или это зависит от задачи? Как информация извлекается в различных задачах из визуальной рабочей памяти? Это центральные вопросы текущей работы, которые отражают **проблему** текущего исследования.

Основной **целью** этой кандидатской диссертации является изучение структуры репрезентаций зрительной рабочей памяти.

Задачи исследования

- Проанализировать классические и современные представления о репрезентациях зрительной рабочей памяти
- Эмпирически протестировать признако- и объектно-ориентированные репрезентации зрительной рабочей памяти
- Создать базу изображений реальных объектов и изучить репрезентацию реальных объектов в зрительной рабочей памяти
- Изучить извлечение информации из зрительной рабочей памяти в разных задачах

Теоретико-методологические основания работы: теории интеграции признаков (Treisman, 2006); объектно-ориентированные теории зрительной рабочей памяти (Luck & Vogel, 1997; Zhang & Luck, 2008); ресурсные модели зрительной рабочей памяти (Bays & Husain, 2008; Bays, Catalao & Husain, 2009; Bays, 2014; Bays, 2015; Schneegans & Bays, 2017); модель интерференции (Oberauer & Lin, 2017); теория иерархического кодирования в зрительной памяти (Brady, Konkle, Alvarez, 2011; Brady, Alvarez, 2011); модель конкуренции целевого сигнала (target confusability competition model; Schurgin, Wixted, & Brady, 2020).

Методы исследования

Лабораторные психофизические эксперименты с использованием модифицированных под исследовательские задачи методики: задача непрерывного отчета (Wilken & Ma, 2004; Zhang & Luck, 2008), задача экземплярсостояние (Utochkin & Brady, 2020). Для анализа результатов мы использовали описательную статистику, RM ANOVA, t-tests. Мы использовали смешанные модели для обработки исходных данных (Zhang & Luck, 2008; Suchow, Brady, Fougne, & Alvarez, 2013).

Научная новизна

- Мы показали, что хранение признаков в рабочей памяти зависит от загрузки внутри одного признака, а не между признаками, что предполагает независимые объемы памяти для разных признаков. Важно отметить, что мы также показали, что независимость нарушается, когда признаки разделены

пространственно и принадлежат разным объектам. Мы предполагаем, что объектная репрезентация играет роль посредника, который уменьшает помехи между содержимым зрительной рабочей памяти.

- Мы впервые показали ошибки связывания для сложных и комплексных объектов реального мира в зрительной рабочей памяти. Эти ошибки связывания проявлялись в неспособности распознать, какой экземпляр объекта соответствует какому состоянию. Таким образом, даже объекты реального мира не хранятся целостно в зрительной рабочей памяти.

- Мы продемонстрировали, что различимость запомиаемых объектов по-разному влияет на их извлечение из зрительной рабочей памяти в зависимости от задачи извлечения. В частности, схожесть объектов не влияет на простое распознавание, но влияет на объектно-пространственную память, так что испытуемые путают, где какой объект был показан, когда объекты похожи.

Теоретическая значимость

Теоретическую значимость текущих исследований можно охарактеризовать их вкладом в дискуссию о формате зрительной рабочей памяти, а также о моделях зрительной рабочей памяти. В частности, наши результаты способствуют пониманию того, как сложные объекты реального мира репрезентируются и извлекаются из зрительной рабочей памяти.

Практическая значимость

Рабочая память представляет большой прикладной интерес, поскольку производительность рабочей памяти считается мощным предиктором последующего академического успеха (Alloway & Alloway, 2008) и коррелирует с тестами интеллекта (Fukuda, Vogel, Mayr, & Awh, 2010; Unsworth, Fukuda, Awh, & Vogel, 2015). Различные тесты рабочей памяти используются в качестве диагностического инструмента для оценки различных неврологических расстройств, например, болезни Альцгеймера (Liang et al., 2016). Наш вклад в обсуждение репрезентативного формата визуальной рабочей памяти может быть полезен для уточнения того, что именно измеряют тесты зрительной рабочей памяти, и, таким образом, может улучшить доступные в настоящее время тесты.

Кроме того, наши результаты могут быть частично использованы в таких практико-ориентированных областях, как Дизайн пользовательского интерфейса, чтобы эффективно минимизировать нагрузку на рабочую память при взаимодействии с различными виртуальными средами. **Степень достоверности результатов** обеспечена использованием строго контролируемых экспериментальных процедур в соответствии со стандартами современной психофизики и экспериментальной психологии. Статистические методы обработки данных для проверки выдвинутых гипотез подобраны корректно. Данные большинства исследований доступны онлайн на платформе “Open Science Framework”, и корректность выводов, таким образом, может быть перепроверена.

Положения, выносимые на защиту

- Объекты не репрезентируются как целостные единицы в зрительной рабочей памяти. Более вероятно, что их осмысленно разделяемые признаки (будь то базовые признаки, такие как цвет или ориентация, или более сложные свойства объектов реального мира - признаки экземпляров и признаки состояний) хранятся относительно независимо в зрительной рабочей памяти
- Независимое хранение признаков, тем не менее, может быть частью более сложной иерархической организации зрительной рабочей памяти. Эта иерархическая организация подразумевает, что отдельные признаки объектов являются основой репрезентации в зрительной рабочей памяти, в то время как доступ к информации о целостной репрезентации объекта может быть дополнительно использован для уменьшения интерференции между независимыми признаками одного объекта. "Связка признаков" (“Feature bundles”) — это иерархические и основные единицы зрительной рабочей памяти.
- Доступ к репрезентации сильно зависит от текущей задачи. Интерференция, вызванная сходством объектов, может повлиять на поиск местоположения объекта, но не на распознавание данного объекта. Эти различия в

доступности информации могут быть объяснены различиями в уровне знакомости между с целевыми и нецелевыми объектами в двух задачах.

Эмпирическая база работы

Мы провели десять экспериментов, в которых приняли участие 208 испытуемых. Испытуемые были протестированы в Научно-учебной лаборатории когнитивных исследований Национального исследовательского университета “Высшая школа экономики”. Эксперименты были разработаны и представлены с помощью PsychoPy (Peirce et al., 2019) для Linux Ubuntu на стандартном ЭЛТ-мониторе с частотой обновления 75 Гц и пространственным разрешением 1024 × 768 пикселей.

Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов

В диссертации использованы результаты, полученные автором лично в трех эмпирических исследованиях. Содержание диссертации отражает личный вклад автора в опубликованные работы, самостоятельно проведен теоретический обзор исследований, спланирован и проведен сбор экспериментальных данных, осуществлена обработка, анализ и интерпретация данных; подготовлены доклады для конференций и публикации по основным результатам исследования.

Апробация работы

Основные результаты диссертационного исследования были представлены на восьми конференциях:

1. Конференция Общества наук о зрении «Vision Sciences Society Annual Meeting», Сейнт Пит Бич, США, 16-ая встреча: 13.05.2016 - 18.05.2016, доклад: «The compression of bound features in visual short-term memory» («Сжатие связанных признаков в зрительной кратковременной памяти»)
2. Летняя школа «Теоретические и прикладные проблемы когнитивной психологии», Лесной городок, Россия, 29.08.2016-02.09.2016, доклад: «Процессы сжатия и связывания в зрительной кратковременной памяти»
3. Конференция Общества наук о зрении «Vision Sciences Society Annual Meeting», Сейнт Пит Бич, США, 17-ая встреча: 19.05.2017 - 24.05.2017, доклад: «An effect of categorical similarity on object-location binding in visual working

memory» («Влияние категориального сходства на связывания местоположений и объектов в зрительной рабочей памяти»)

4. Конференция Общества наук о зрении «Vision Sciences Society Annual Meeting», Сейнт Пит Бич, США, 18-ая встреча: 18.05.2018 - 23.05.2018, доклад: «Real-world objects are not stored in bound representations in visual working memory» («Объекты реального мира не хранятся целостно в зрительной рабочей памяти»)
5. 41-я Европейская конференция по зрительному восприятию «41rd European Conference on Visual Perception», Триест, Италия, 26.08.2018-30.8.2018, доклад: «Object distinction and object-location binding as sources of interference in visual working memory» («Различение объектов и связывание объектов с местоположениями как источники помех в зрительной рабочей памяти»)
6. Виртуальный симпозиум по рабочей памяти «Virtual Working Memory Symposium» США, дистанционно, 01.06.2020 - 04.06.2020; доклад: «Different features are stored independently in visual working memory but mediated by object-based representations» («Признаки хранятся независимо в зрительной рабочей памяти, но модулируются объектными представлениями»)
7. Виртуальный симпозиум по рабочей памяти «Virtual Working Memory Symposium» США, дистанционно, 01.06.2021 - 04.06.2021; доклад: «What allows an object to escape attribute amnesia?» («Что позволяет объекту избежать атрибутивной амнезии?»)
8. 43-я Европейская конференция по зрительному восприятию «43rd European Conference on Visual Perception», дистанционно, 22.08.2021 - 27.08.2021; доклад: «JURICS Stimulus base - Joint Universal Real-world Images with the Continuous States» («Стимульная база JURICS - универсальные объекты реального мира с непрерывными состояниями»)

Также результаты диссертационного исследования были представлены на научном семинаре по когнитивным исследованиям НИУ ВШЭ (22.10.2019), на заседании научно-учебной лаборатории когнитивных исследований НИУ ВШЭ (11.11.21), на заседании лаборатории зрения и памяти Университет штата

Калифорния в Сан-Диего (Vision and Memory Laboratory, University of California San Diego, USA, 24.04.2019), на заседании лаборатории психофизики Политехнической школы Лозанны (Laboratory of Psychophysics, École polytechnique fédérale de Lausanne, Switzerland, 24.09.2020), на заседании лаборатории зрительного восприятия Гарвардского университета (Visual Attention Lab, Harvard, USA, 22.04.2021), на заседании лаборатории профессора Дэрила Фунье (Fougnie Lab, NYUAD, Abu Dhabi, 24.05.21).

2. Признаки и объекты как единицы зрительной рабочей памяти

Статья, выбранная для защиты: Markov, Tiurina, Utochkin, 2019

В своем фундаментальном исследовании Лак и Фогель (1997) обнаружили, что общее количество предъявленных признаков не влияет на производительность в задаче обнаружения изменений, и пришли к выводу, что объекты, а не признаки, являются единицами зрительной рабочей памяти, и оценили объем зрительной рабочей памяти примерно в 3-4 объекта (см. также, Cowan, 2001). Эти результаты подтверждают "сильную" объектную гипотезу, которая гласит, что зрительная рабочая память ограничена только количеством объектов, в то время как признаки не влияют на объем и могут быть потеряны или забыты только тогда, когда весь объект забыт. Эти результаты также согласуются с "слотовыми" моделями зрительной рабочей памяти (Rouder et al., 2008). Однако эти убедительные утверждения Лака и Фогеля (1997) о том, что количество объектов является основным ограничивающим фактором объема рабочей памяти, не были надежно подтверждены более поздними исследованиями (Olson & Jiang, 2002; Oberauer & Eichenberger, 2013; Hardman & Cowan, 2015; Wheeler & Treisman, 2002; Fougne & Alvarez, 2011; Fougne, Cormiea, & Alvarez, 2013; Bays, 2016; Bays, Catalao, & Husain, 2009; Bays, Wu, & Husain, 2011; Emrich & Ferber, 2012; Pertzov et al., 2012; Oberauer & Lin, 2017), предполагая, что признаки, а не объекты, являются единицами зрительной рабочей памяти. С другой стороны, репрезентация объектов, по-видимому, все еще играют определенную роль в организации информации в зрительной рабочей памяти. Например, было показано, что запоминание признаков может выиграть от того, что они представлены в пределах одних и тех же, а не разных объектов: несколько признаков одного объекта легче запомнить, чем один и тот же набор признаков, разделенных между несколькими объектами (Fougne et al., 2010; Fougne et al., 2013). Поэтому важно понимать, как объектно-ориентированное преимущество может проявляться в зрительной рабочей памяти наряду с множеством свидетельств в пользу независимого хранения признаков.

Чтобы исследовать взаимосвязь между памятью на разные признаки и объектным преимуществом в зрительной рабочей памяти, мы провели три эксперимента с использованием парадигмы непрерывного отчета (Wilken & Ma, 2004; Zhang & Luck, 2008; Bays et al., 2009), которые позволили нам оценить объем и точность репрезентаций зрительной рабочей памяти. В каждой пробе мы просили участников исследования запомнить набор объектов разного цвета и ориентации и сообщить либо цвет, либо ориентацию объекта (см. рисунок 1B). Испытуемые должны были подравнять целевой признак объекта при помощи цветного или ориентационного круга, чтобы он соответствовал образцу признака, представленному в этом месте на исходном дисплее. В рамках каждого эксперимента мы ортогонально манипулировали признаками для каждого измерения объектов. Следовательно, было четыре возможных условия (см. рисунок 1A): (1) и цвет, и ориентация идентичны, (2) идентична только ориентация (разные цвета), (3) идентичен только цвет (разные ориентации), (4) все признаки разные. Кроме того, мы включили контрольное условие, при котором на экране был предъявлен только один объект (два объекта в эксперименте 2). В Эксперименте 1 цвета и ориентации были объединены для формирования объектов с двумя признаками (цветные треугольники). В Эксперименте 2 цвета и ориентации были разделены на пространственно различные объекты (белые треугольники и цветные круги). В Эксперименте 3 цвета и ориентации принадлежали разным, но пространственно перекрывающимся объектам (цветные круги, расположенные на белых треугольниках).

В целом, мы обнаружили наилучшую эффективность (вероятность верного хранения и точность ответов) в условиях со всеми идентичными признаками как для отчетов о цвете, так и для отчетов об ориентации (см. рисунок 1C). Важно отметить, что эффективность в этом состоянии была сопоставима с таковой в контрольном условии, когда был предъявлен только один объект (два отдельных объекта в Эксперименте 2). Когда какой-либо из признаков принимал разные значения для разных объектов, это значительно снижало эффективность для этого

признака, но не влияло на эффективность для признака, сохраняя ее на том же уровне, что и в контрольном условии. То есть манипулирование загрузкой признаков в каждом измерении независимо влияло на это, но не на другое измерение. Этот паттерн независимости наблюдался во всех экспериментах, за исключением Эксперимента 2. В Эксперименте 2 мы обнаружили, что цветовая нагрузка снижает эффективность не только при запоминании цвета, но и при запоминании ориентации.

В целом, мы не обнаружили интерференции между разными признаками в Экспериментах 1 и 3, где цвета и ориентации были предъявлены как признаки одних и тех же объектов или как признаки пространственно перекрывающихся объектов, которые могли создавать объектно-подобные единицы (Rensink, 2000; Trick & Pylyshyn, 1993; Wolfe & Bennett, 1997; Xu, 2002). Однако мы обнаружили интерференцию между различными признаками в Эксперименте 2, где признаки были разделены на отдельные объекты четким пространственным разделением. Эти результаты согласуются с гипотезой о том, что репрезентативными единицами зрительной рабочей памяти являются не целые объекты или полностью отдельные признаки, а скорее иерархические репрезентации – "связки признаков" (например, *features bundles* - Brady et al., 2011). В этой репрезентации доступна как информация об объекте, так и информация о признаках (см. также, Qian, Zhang, Liu, Lei, 2019), но на разных уровнях иерархии. Мы предполагаем, что признаки хранятся независимо в зрительной рабочей памяти, но объектный уровень иерархии может играть роль посредника, уменьшая интерференцию между разными признаками (Oberauer & Lin, 2017) и поддерживая правильное распределение доступных ресурсов (Baays, 2015; Wilken & Ma, 2004).

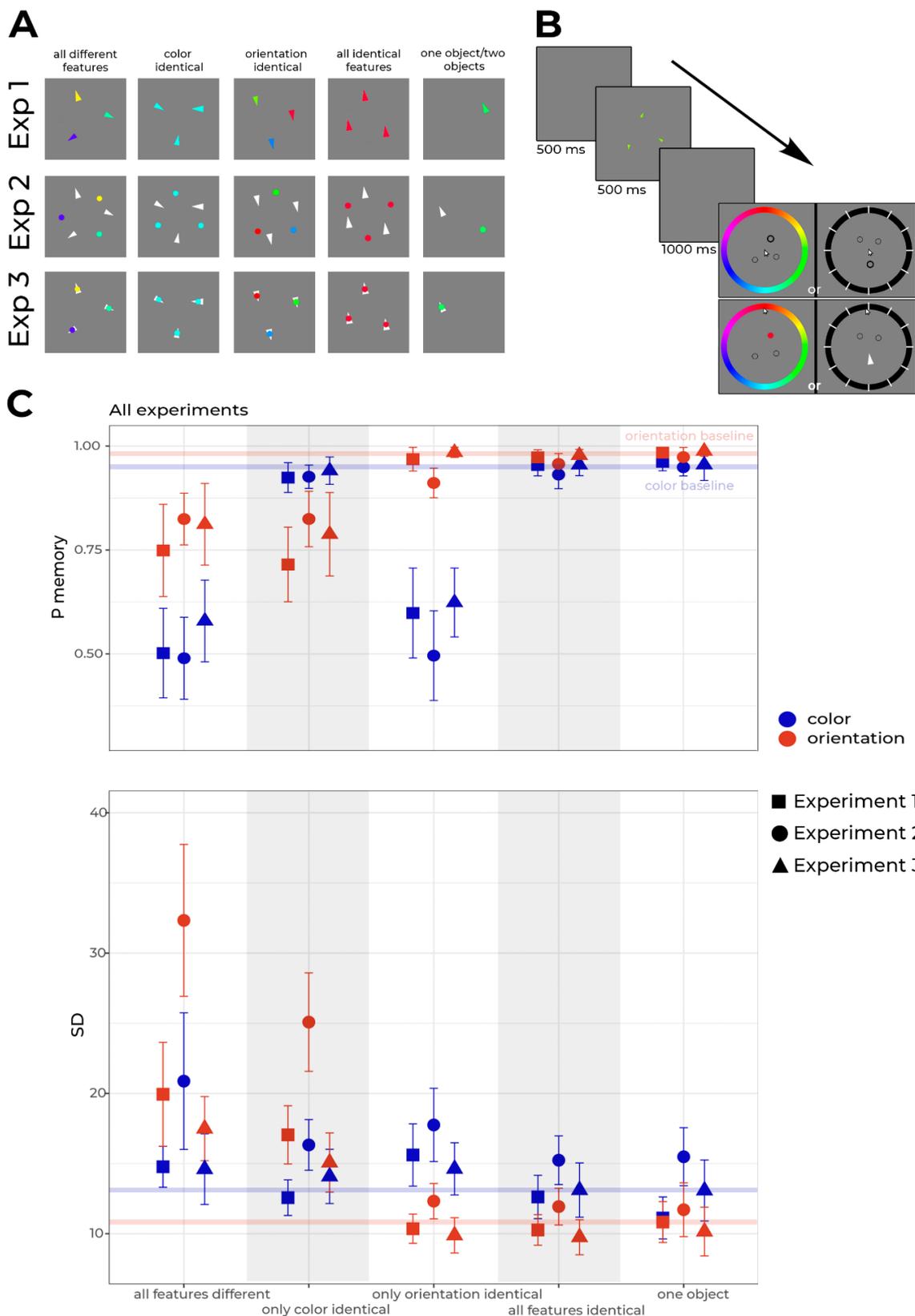


Рисунок 1. А: Примеры стимулов и условий, использованных в экспериментах 1, 2 и 3. **В:** Пример пробы Эксперимента 1. **С:** Результаты Эксперимента 1-3: P_{memory} и SD моделей смещения в зависимости от условия и эксперимента. Столбики ошибок отображают 95% CIs. Адаптировано по Markov, Tiurina, & Utochkin 2019.

3. Репрезентация объектов реального мира в зрительной рабочей памяти

Статья, выбранная для защиты: Markov, Utochkin, Brady, 2021

В большинстве исследований, исследующих репрезентативный формат зрительной рабочей памяти, используются упрощенные стимулы с легко изменяемыми независимыми признаками. Но как объекты реального мира хранятся в зрительной рабочей памяти? Согласно многочисленным исследованиям (Asp, Störmer & Brady, in press; Brady, Störmer, & Alvarez, 2016; Brady & Störmer, 2020; Brady & Störmer, in press; Starr и др., 2020), объем рабочей памяти для объектов реального мира не так ограничен, как для простых стимулов. В данном исследовании мы изучаем: может ли независимость признаков (Wang et al., 2017; Shin & Ma, 2017; Markov, Tiurina & Utochkin, 2019) наблюдаться для объектов реального мира? Можем ли мы запомнить сложные признаки реального мира, но неверно связать их? Или можем ли мы забыть эти признаки независимо друг от друга? Этот вопрос ранее изучался в отношении зрительной долговременной памяти (Balaban, Assaf, Arad Meir, & Luria, 2020; Brady, Konkle, Alvarez, & Oliva, 2013; Spachholz & Kuhbandner, 2017; Utochkin & Brady, 2020). Полученные данные свидетельствуют о том, что признаки объектов реального мира (например, цвета или определенные состояния или позы, в которых появляются объекты) могут быть независимо утрачены из зрительной долговременной памяти (Brady, Konkle, Alvarez, & Oliva, 2013). В другом недавнем исследовании (Utochkin & Brady, 2020) было обнаружено, что испытуемые обладают хорошей памятью на два сложных признака объектов реального мира, информации о состояниях (например, открытая и закрытая книга, см. рис. 2А) и информации об экземплярах (например, "Хоббит, или Туда и обратно" и книгу Уильяма Джеймса "Принципы психологии"). В то же время часто происходили ошибки связывания (испытуемые сообщали о неправильных сочетаниях состояний и экземпляров), что свидетельствует о том, что информация о состояниях и информация об экземплярах репрезентируются независимо, а не целостным образом. Хотя мы относим состояния и экземпляры к сложным

признакам или свойствам объекта, они не похожи на базовые признаки, например, как описано в Теории интеграции признаков, такие как цвет или ориентация (Treisman, 1996). Распознавание этих зрительных признаков довольно сложно, и различные виды изменений экземпляров или состояний могут быть обеспечены различными изменениями внешнего вида и семантических отношений. Однако различение разных состояний и разных экземпляров одной и той же категории объектов является важной повседневной задачей. Таким образом, в настоящей главе мы изучаем эти свойства объектов реального мира, в то время как изучение природы этих признаков является темой дальнейших исследований.

Поскольку доказательства независимости данных сложных признаков ранее были обнаружены в зрительной долговременной памяти, мы можем спросить: является ли это свойством организации долговременной памяти, которое приводит к тому, что объекты сохраняются и / или забываются независимо? Или информация об объектах консолидируется в долговременной памяти в виде набора независимых объектов? Другими словами, может ли независимость признаков иметь отношение к тому, как зрительная рабочая память представляет объекты реального мира? Мы рассмотрели этот вопрос в нашем исследовании.

Чтобы исследовать репрезентации объектов реального мира в зрительной рабочей памяти, мы адаптировали парадигму Уточкина и Брейди (2020). В этом исследовании испытуемые должны были запоминать объекты из различных основных категорий. Каждая категория была представлена двумя экземплярами (например, кофейная кружка А и кофейная кружка В), каждый из которых показан в одном и том же состоянии (например, обе кофейные кружки полны) или в разных состояниях (например, пустая кофейная кружка А и полная кофейная кружка В). Затем испытуемых попросили вспомнить, в каком состоянии был представлен каждый экземпляр. Уточкин и Брейди (2020) обнаружили, что испытуемые не испытывали трудностей с отчетом о комбинациях экземпляров и состояний, когда исходные состояния были одинаковыми, но испытуемые совершали гораздо больше ошибок, когда исходные состояния были разными.

В исследовании мы использовали набор изображений объектов из разных базовых категорий (исходный набор стимулов от Brady et al., 2013 с дополнительными стимулами), где каждая категория была представлена четырьмя изображениями, двумя разными экземплярами в двух разных состояниях. Например, целое красное яблоко, целое зеленое яблоко, разрезанное красное яблоко и разрезанное зеленое яблоко (см. рис. 2А). Важно, что нас интересовало, как часто испытуемые могли правильно запоминать как экземпляры, так и состояния предъявленных объектов, но неправильно присваивали состояния экземплярам, совершая ошибку связывания. Например, если было показано целое зеленое яблоко и разрезанное красное яблоко, и испытуемый сообщает, что видел целое красное яблоко и разрезанное зеленое яблоко, это то, что мы называем ошибкой связывания.

Эксперименты 1 и 2 состояли из задачи на экземпляры и задачи "состояние-экземпляр". В задаче "состояние-экземпляр" в запоминаемом наборе были предъявлены два экземпляра из одной категории и два экземпляра из другой категории. В рамках каждой категории экземпляра могли быть показаны в одном и том же состоянии или в разных состояниях. При тестировании была протестирована память только для одной из категорий. Каждая тестовая пара включала два возможных состояния одного и того же экземпляра. Испытуемые должны были выбрать состояние, в котором данный экземпляр был предъявлен. Следуя логике Уточкина и Брейди (2020), если объекты реального мира хранятся не целостно в зрительной рабочей памяти, мы ожидали низкий процент правильных ответов для объектов, первоначально предъявленных в разных состояниях, потому что испытуемые должны запоминать не только экземпляры и состояния, но и правильно "связывать" конкретные состояния с конкретными экземплярами. Напротив, необходимость связывать не представляет большой трудности, если экземпляры изначально были предъявлены в одном и том же состоянии: в этом случае для выполнения задачи "состояние-экземпляр" достаточно запомнить общее состояние для обоих экземпляров. Похожая задача использовалась для получения базовых значений для памяти на экземпляры. В

этой задаче запоминаемый набор также включал четыре объекта, два экземпляра из двух категорий. При тестировании были показаны две пары объектов из одной из категорий, каждая пара включала один старый и один новый экземпляр. Участники должны были выбрать именно старый экземпляр в каждой паре. В Эксперименте 1 задача на экземпляры и задача "состояние-экземпляр" были представлены в отдельных блоках. В Эксперименте 2 пробы были случайным образом перемешаны, что мешало испытуемым сосредоточиться на конкретных признаках экземпляров или состояний.

В обоих экспериментах испытуемые продемонстрировали хорошую память на экземпляры, о чем свидетельствуют результаты задачи на экземпляры (86% правильных ответов). У них также была достаточно хорошая память на состояния, поскольку они в основном правильно выбирали два одинаковых состояния, когда объекты были предъявлены в одних и тех же состояниях (см. рисунок 2С). Однако с точки зрения отчетов о том какой экземпляр был показан в каком состоянии, процент правильных ответов был значительно ниже в условии, когда объекты были предъявлены в разных состояниях. Примерно в 15% проб с разными состояниями наблюдатели успешно сообщили, что состояния отличаются, но неправильно выбрали экземпляры для этих двух состояний (совершили ошибку связывания). Эти результаты указывают на то, что, даже когда испытуемые что-то помнят об экземплярах и состояниях по отдельности, ошибки связывания возникали между этими двумя типами признаков. В Эксперименте 3 мы проверили, как обновление местоположения во время теста может повлиять на ошибки связывания. В двух условиях мы предъявляли объекты во время тестирования в том же месте, что и во время предъявления, или меняли их местами. Мы обнаружили, что обновление местоположения не вызвало новых ошибок связывания, но снизило общий процент правильных ответов. Это говорит о том, что во время обновления местоположения экземпляры и состояния не могут быть привязаны независимо к местоположениям и что обновление местоположения, по-видимому, действует на полностью связанные репрезентации.

В целом, наши результаты показывают, что объекты реального мира также подвержены ошибкам связывания, как и простые объекты, подтверждая базовую нецелостную природу репрезентаций объектов в зрительной рабочей памяти.

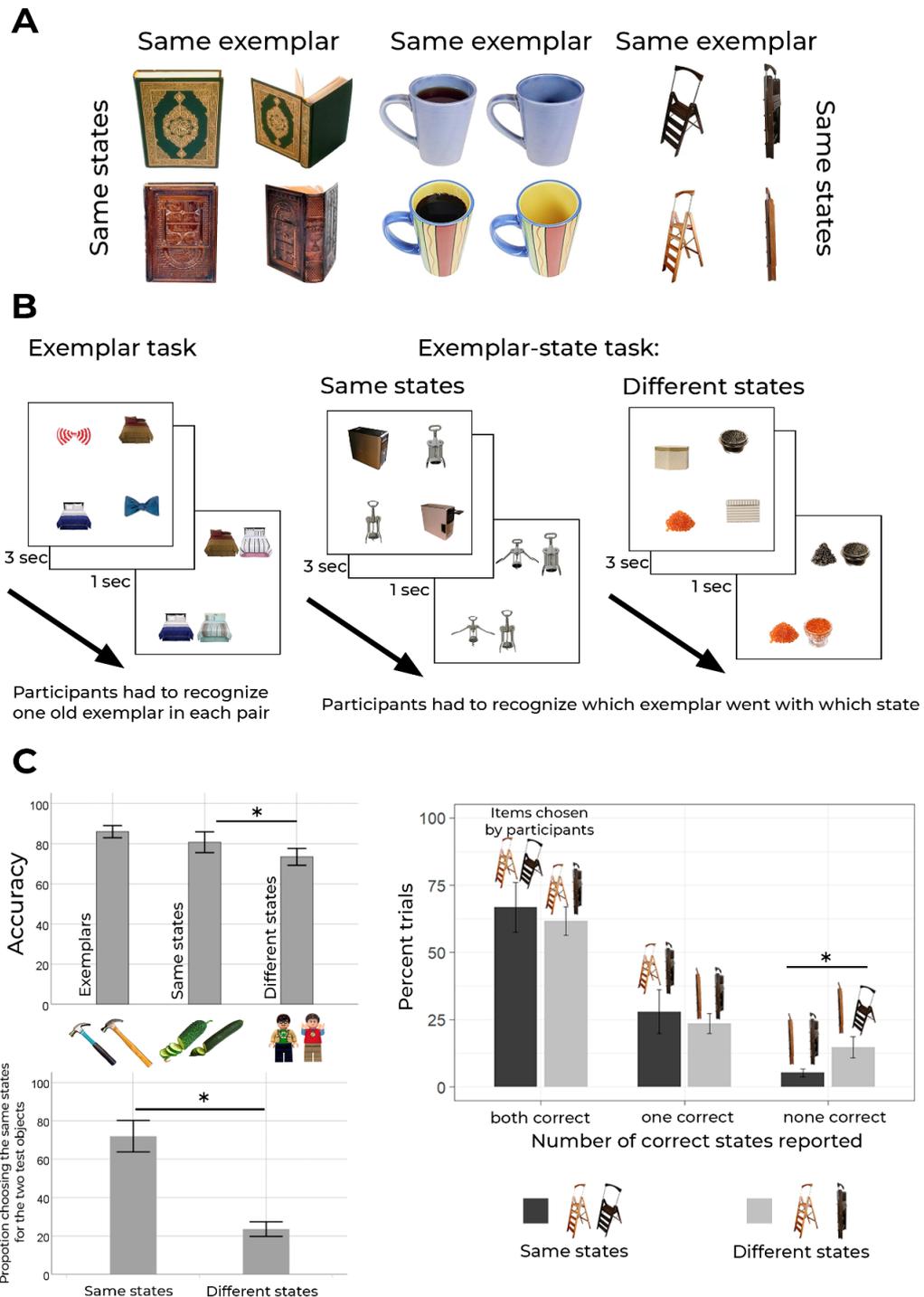


Рисунок 2. А: Пример двух разных экземпляров в двух разных состояниях. В: Пример пробы Эксперимента 1. С: Результаты эксперимента 1: Общая точность, точность запоминания состояний и выбор двух, одного или ни одного правильных состояний для двух экземпляров. Столбики ошибок отображают 95% CIs. Адаптировано по Markov, Utochkin, & Brady, 2021.

4. Извлечение информации из зрительной рабочей памяти

Статья, выбранная для защиты: Markov, Utochkin 2022

Как видно из предыдущих глав, взаимодействие между различными объектами и их характеристиками может дать нам полезную информацию о том, как организована информация в зрительной памяти. Здесь мы более подробно исследуем взаимодействия между объектами в зрительной рабочей памяти и фокусируемся на двух аспектах. Во-первых, объекты реального мира обычно запоминаются не изолированно, то есть важен контекст. Зрительную рабочую память часто рассматривают как пространственно организованную систему (Logie, 2003; Magen & Emmanuil, 2019). Таким образом, мы храним информацию не только о том, что мы видели, но и о том, где. Пространственная информация играет важную роль в процессе связывания (Swan & Wyble, 2014; Treisman, 1996) и имеет отношение ко многим задачам, связанным со зрительной рабочей памятью. Запоминание объектов в местоположениях (которое мы называем памятью местоположения объекта) также подвержено ошибкам связывания, аналогичным ошибкам между различными признаками нескольких объектов (например, информацией об экземплярах и состояниях), но они возникают между репрезентацией объектов и их местоположениями (Bays et al., 2009; Dent & Smyth, 2005; Hollingworth & Rasmussen, 2010; Pertzov, Dong, Peich, & Husain, 2012; Postma & De Haan, 1996; Treisman, 1996; Toh, Sisk, & Jiang, 2020; but see Pratte, 2019). Например, когда человек кладет смартфон в левый карман джинсов, а бумажник - в правый карман куртки, человек впоследствии может вспомнить, какие предметы он положил в карманы, но может спутать их местоположения в памяти и искать бумажник в левом кармане джинсов. Эти ошибки предполагают, что память на объекты и местоположения частично независимы. Кроме этого, репрезентации объектов могут интерферировать друг с другом (ошибки связывания, описанные в предыдущей главе, являются одним из примеров). Степень интерференции как функции межобъектных отношений сильно зависит от различимости (Hunt, 2006). Предыдущие исследования показали, что

различимость объектов влияет на успешность в задачах зрительной рабочей памяти, но направление этих эффектов может быть противоположным. В то время как некоторые исследования показали, что высокая различимость между элементами увеличивает последующую эффективность памяти, другие предположили, что высокая различимость снижает ее (Cohen et al., 2014; Jiang, Lee, Asaad, & Remington, 2016; Lin & Luck, 2009; Sims, Jacobs, & Knill, 2012). Важный теоретический вопрос, который мы рассматриваем в текущем исследовании, заключается в том, как различимость влияет как на объектную память, так и на память о местоположении объекта. Нарушает ли низкая различимость объектов связывание информации о местоположении и об объекте, вызывая больше ошибок связывания? Почему возникают ошибки связывания? Существуют ли различия между извлечением информации об объектах и информации об их местоположениях?

В серии экспериментов мы исследовали влияние различимости объектов на память об объектах, память о местоположениях и память о местоположениях объектов. Мы манипулировали различимостью объектов, используя изображения объектов, принадлежащие к одним и тем же или разным базовым категориям. В Эксперименте 1 мы показывали три изображения, расположенных по воображаемой окружности, и попросили испытуемых запомнить их и их местоположения (см. рис. 3А). После, два тестовых изображения было предъявлено (всегда из одной и той же категории, независимо от условий представления): одно изображение было старым (уже показанным в наборе), а другое было новым. Испытуемые должны были выбрать старый объект. На следующем шаге испытуемые должны были локализовать выбранный объект на окружности так, чтобы он соответствовал расположению этого элемента на исходном дисплее. Мы измеряли процент правильных ответов в задаче распознавания. Для задачи локализации мы использовали модификацию модели смещения (Zhang & Luck, 2008) "swar model" (Bays et al., 2009). Результатом модели "swar" является набор параметров, которые, как предполагается, отражают различные аспекты зрительной рабочей памяти. Эти параметры

включают P_{memory} , SD или точность, а также P_{swap} , отражающий вероятность ошибки связывания – ответа об нетестируемом элементе набора. В то время как P_{memory} и SD являются характеристиками памяти местоположения (насколько вероятно и насколько точно наблюдатели сами запоминают местоположения), P_{swap} отражает сбой определения местоположения объекта (как часто наблюдатели вспоминают объект в неправильном местоположении).

В Эксперименте 1 мы обнаружили, что различимость не влияет на процент правильных ответов в задаче распознавания и не влияет на точность локализации объектов (см. рис. 3В). Однако, мы обнаружили, что испытуемые допускали больше ошибок связывания среди объектов с низкой различимостью. Дополнительный анализ показал, что это увеличение нецелевых отчетов не было вызвано простым забыванием элементов. Мы пришли к выводу, что снижение различимости предметов ухудшило способность специфически запоминать объекты в связке с их местоположениями, а не способность распознавать объекты или запоминать местоположения.

В Эксперименте 2 мы в основном повторили дизайн эксперимента 1, но на этот раз мы протестировали память на местоположения объектов и на местоположения без задачи распознавания, чтобы устранить потенциальное вмешательство задачи распознавания на задачу локализации. Мы также добавили условие, при котором мы могли бы протестировать "чистую" память на местоположения с уменьшенными требованиями к связыванию. Мы получили те же результаты, что и в Эксперименте 1, и дополнительно показали, что точность "чистой" памяти на местоположения была такой же, как и в других условиях (требующих запоминания соединений объект-местоположение). Таким образом, мы пришли к выводу, что требования задачи к запоминанию объектов или привязке их к местоположениям не повлияли на точность локализации.

В Экспериментах 3А и 3В мы рассмотрели два правдоподобных объяснения эффектов различимости, наблюдаемых в Экспериментах 1 и 2. Во-первых, плохая различимость объектов может ухудшить память о местоположении объекта в целом и неспецифически. Высокие требования к зрительной рабочей памяти для

хранения малоразличимых элементов могут привести к компромиссу между запоминанием самих объектов и соединениями местоположение-объект. Во-вторых, извлечение информации об местоположениях объектов может зависеть от того, насколько легко конкретная целевая репрезентация может быть отделена от нецелевых репрезентаций на основе их межобъектных различий и пространственных сигналов. Основное различие между этими двумя предположениями заключается в том, что они предсказывают разное распределение ошибок. Первое предположение предсказывает, что если есть несколько объектов, обладающих разной различимостью, то ошибки должны проявляться случайным образом, независимо от сходства между конкретными объектами. Второе предположение предсказывает, что ошибки зависят от сходства между объектами: должно быть больше ошибок связывания между более похожими элементами.

В Эксперименте 3А мы протестировали память на местоположения объектов для четырех объектов из одной, двух или четырех категорий (рис. 3С). Вместо использования непрерывного отчета (как в Экспериментах 1 и 2), мы использовали четырехальтернативный выбор. То есть после предъявления объектов, местоположение одного из предъявленных объектов было выделено, и испытуемые должны были выбрать, какой из четырех предъявленных объектов был предъявлен в указанном месте. В Эксперименте 3В те же наборы объектов были протестированы в задаче на распознавание (так же, как на этапе распознавания эксперимента 1). Как и в предыдущих двух экспериментах, было обнаружено, что различимость влияет на процент правильных в задаче определения местоположения объекта (Эксперимент 3А), так что испытуемые совершали больше ошибок связывания, когда запоминаемый набор состоял из четырех объектов, взятых из одной категории. В то же время не было обнаружено никаких различий в задаче на распознавание (Эксперимент 3В). Затем мы более внимательно рассмотрели распределение ответов в критическом условии, когда четыре объекта были из двух разных категорий, то есть всегда были нецелевые объекты, которые были более похожи на цель, и нецелевые объекты, которые

были более непохожи на цель. Неправильные ответы (ошибки связывания) были распределены неравномерно между нецелевыми объектами в зависимости от их сходства с целью. Мы обнаружили, что не-цели из той же категории, что и цель, выбирались чаще, чем любая из альтернатив из другой категории (рисунок 3D). Таким образом, мы обнаружили, что память о местоположении объекта определяется сходством между элементами.

Результаты наших экспериментов показывают интересную диссоциацию между влиянием различимости объектов на простое распознавание (никакого эффекта) и на память о местоположении объекта (менее различимые объекты с большей вероятностью “меняются” местами в памяти). Чтобы объяснить эту диссоциацию, мы предположили, что решающие различия между извлечением информации об объектах и информации о местоположениях объектов могут быть объяснены существующими моделями зрительной рабочей памяти: при помощи теорий о зашумленные репрезентациях или сигналах знакомства, конкурирующих на нескольких этапах обработки (например, Oberauer & Lin, 2017; Schneegans & Bays, 2017; Swan & Wyble, 2014; Schurgin, Wixted, & Brady, 2020). В соответствии с некоторыми предыдущими моделями внимания и зрительного поиска (Duncan & Humphreys, 1989), различие целевого и нецелевого объекта играет решающую роль также в задачах запоминания. Поскольку все репрезентации зашумлены, то различимость влияет на то, насколько отделимы репрезентации относительно шума. Здесь разница между задачами возникает из-за того, как именно делаются суждения о знакомстве альтернативы. В задаче распознавания "старый-новый" с двух-альтернативным выбором сигнал знакомства, создаваемый целью, сравнивается с сигналом, создаваемым альтернативой, предъявленной при тестировании. В этом случае различимость закодированных элементов не сильно влияет на процент правильных ответов в задаче распознавания, поскольку любая отдельная цель выдает более сильный сигнал, чем “новый” объект предъявленный во время тестирования, в то время как сравнение между различными объектами из предъявленного изначально набора не требуется. В задаче определения местоположения объекта испытуемые должны были различать конкурирующие

зашумленные репрезентации всех элементов, связанных с различными местоположениями. В Эксперименте 3А нецелевые объекты из той же категории, что и цель, выбирались чаще, чем нецелевые объекты из другой категории, потому что сигнал о местоположении вызывал большее знакомство с прежним нецелевым объектом. Расширенная модель обнаружения сигнала, изображенная на рис. 3Е, иллюстрирует эту теоретическую идею (Macmillan & Creelman, 2005; Schurgin et al., 2020). Различие между целевым и нецелевым объектом определяет вероятность нецелевого ответа. Чем сильнее распределение смещено вправо, тем более вероятно, что в качестве ответа будет выбран соответствующий объект. Разделение между распределениями определяется различимостью объектов. Распределение знакомства нецелевых объектов одной и той же категории в большей степени совпадает с распределением знакомства целевого объекта. То есть в отдельной пробе нецелевой объект той же категории имеет больше шансов вызвать более сильный сигнал знакомства, чем любой из нецелевых объектов другой категории. Поэтому мы предполагаем, что ошибки определения местоположения объекта возникают из-за репрезентативной конкуренции сигналов во время извлечения информации из памяти. Саму репрезентацию зрительной рабочей памяти можно рассматривать как зашумленный сигнал, который сравнивается с другими сигналами, предоставляемыми альтернативными вариантами при тестировании. Этот теоретический взгляд на репрезентации зрительной рабочей памяти не противоречит нашим ранее упомянутым идеям иерархической организации: эти сигналы знакомства могут возникать для репрезентаций различных уровней этой иерархии от отдельных признаков до объектов, групп и наборов.

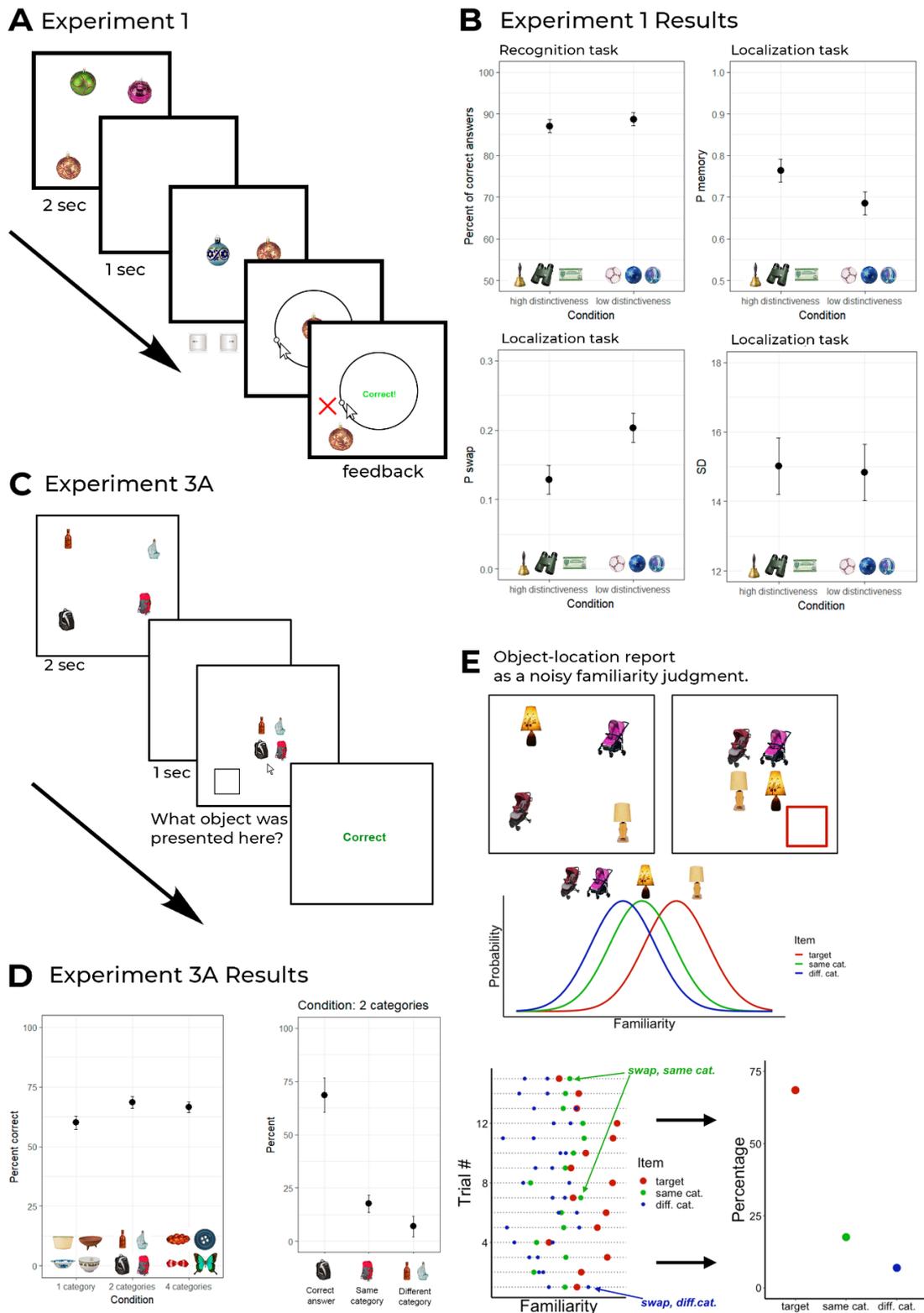


Рисунок 3. А: Пример пробы Эксперимента 1. Б: Результаты эксперимента 1 для задачи распознавания (процент правильных ответов) и задачи локализации (P_{memory} , P_{swap} , SD). Столбики ошибок отображают 95% CIs. С: Пример пробы Эксперимента 3А. D: Результаты эксперимента 3А. Процент правильных ответов для всех условий и процент правильных ответов для условия с двумя категориями. Е: Отчет о местоположении объекта как шумное суждение о сигнале знакомства. Адаптировано по Markov, & Utochkin, 2022.

Заключение

В серии исследований мы исследовали структуру единиц хранения информации зрительной рабочей памяти. Мы обнаружили, что единицами рабочей памяти являются ни объекты, ни признаки, а иерархически организованные "связки" признаков (Brady et al., 2011). Это означает, что репрезентации в зрительной рабочей памяти в различных задачах могут извлечь выгоду, как от независимого хранения признаков, так и от их организации в целостные объекты. Наши результаты показывают, что данная структура хранения может быть применена как к простым геометрическим стимулам, так и к сложным объектам реального мира и являться основной единицей зрительной рабочей памяти.

Мы предполагаем, что информация не хранится на отдельных "полках" в зрительной рабочей памяти и что извлечение информации из зрительной рабочей памяти зависит от требований текущей задачи. Зрительная система может извлекать информацию из различных уровней иерархии. Зрительная система в значительной степени зависит от конкуренции зашумленных сигналов "знакомства" (familiarity signals), доступными на этапе тестирования. В простой задаче распознавания (двух альтернативный выбор) знакомство цели сравнивается с предъявленной альтернативой при тестировании, и испытуемые выбирают какой из объектов выглядит более знакомым. В задачах, где объект должен быть запомнен (связан) вместе с его контекстуальной информацией, такой как местоположение, знакомство цели конкурирует с репрезентациями других запоминаемых объектов, вызывая значительную интерференцию между объектами. Наши результаты согласуются и развивают современные модели зрительной рабочей памяти – ресурсные модели (например, Bays & Husain, 2008), модель интерференции (Oberauer & Lin, 2017), модель конкуренции целевого сигнала (Schurgin, Wixted, & Brady, 2020), демонстрируя аналогичные эффекты как для простых стимулов, так для сложных объектов. Таким образом, наши результаты свидетельствуют о том, что репрезентации зрительной рабочей памяти являются гибкими, иерархическими и сильно зависят от текущей задачи.

Благодарности

Я хочу выразить свою особую благодарность моему научному руководителю, профессору Уточкину Игорю Сергеевичу за предоставленную мне возможность выполнить множество проектов, за то, что он руководил и помогал мне с самого начала моей академической карьеры в Лаборатории когнитивных исследований НИУ ВШЭ. Я также благодарен команде Лаборатории когнитивных исследований и факультету психологии НИУ ВШЭ, профессору Василию Ключареву и многим другим преподавателям, коллегам и студентам, и особенно профессору Фаликман Марии Вячеславовне и кан. псих. наук Горбуновой Елене Сергеевне за комментарии и предложения по ранней версии диссертации.

Я хочу выразить свою искреннюю благодарность профессору Майклу Херцугу за прекрасную возможность стажироваться в Лаборатории психофизики EPFL, работать над интересными проектами вместе с замечательной командой. Я хочу поблагодарить PhD Дэвида Паскучи за сотрудничество, за множество замечательных дискуссий и за помощь в работе.

Я хочу поблагодарить проф. Дэрила Фунье за возможность стать онлайн-частью Fougnie Lab. Я благодарю PhD Эдиту Сасин, мы вместе провели много экспериментов и вели замечательные беседы о науке.

Я благодарю проф. Виолу Штормер и проф. Тимоти Брейди и хочу сказать спасибо всем сотрудникам USCD за стажировку, отличное время и классные проекты.

Я также хочу поблагодарить PhD Федора Кондрашова, PhD Петра Власова и всю команду Школы молекулярной и теоретической биологии. SMTB - это причина, по которой я выбрал академическую карьеру.

Я хочу поблагодарить свою семью. Я хочу поблагодарить любовь всей моей жизни, жену и замечательную коллегу, кан. псих. наук Тюрину Наталью Александровну, за большую помощь и поддержку во время моих исследований. Это было бы невозможно без тебя. И спасибо моему коту Тимоти за его тепло и поддержку.

Литература

- 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>
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. *Psychology of Learning and Motivation - Advances in Research and Theory*, *8*(C), 47–89. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60452-1](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60452-1)
- Balaban, H., Assaf, D., Meir, M. A., & Luria, R. (2019). Different Features of Real-World Objects Are Represented in a Dependent Manner in Long-Term Memory. *Journal of Experimental Psychology: General*. <https://doi.org/10.1037/xge0000716>
- Bays, P. M. (2014). Noise in neural populations accounts for errors in working memory. *Journal of Neuroscience*, *34*(10), 3632–3645. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3204-13.2014>
- Bays, P. M. (2015). Spikes not slots: Noise in neural populations limits working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, *19*(8), 431–438. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.06.004>
- Bays, P. M. (2016). Evaluating and excluding swap errors in analogue tests of working memory. *Scientific Reports*, *6*. <https://doi.org/10.1038/srep19203>
- 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>
- 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). <https://doi.org/10.1167/9.10.7>

- Bays, P. M., Wu, E. Y., & Husain, M. (2011). Storage and binding of object features in visual working memory. *Neuropsychologia*, *49*(6), 1622–1631. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.12.023>
- 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., & Störmer, V. S. (2020). Greater capacity for objects than colors in visual working memory : Comparing memory across stimulus spaces requires maximally dissimilar foils. *PsyArXiv*.
- 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), 1–34. <https://doi.org/10.1167/11.5.1>
- 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), 1–34. <https://doi.org/10.1167/11.5.1>
- Brady, T. F., Konkle, T., Alvarez, G. A., & Oliva, A. (2013). Real-world objects are not represented as bound units: Independent forgetting of different object details from visual memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, *142*(3), 791–808. <https://doi.org/10.1037/a0029649>
- Brady, T. F., Störmer, V. S., & Alvarez, G. A. (2016). Working memory is not fixed-capacity: More active storage capacity for real-world objects than for simple stimuli. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *113*(27), 7459–7464. <https://doi.org/10.1073/pnas.1520027113>
- Cohen, M. A., Konkle, T., Rhee, J. Y., Nakayama, K., & Alvarez, G. A. (2014). Processing multiple visual objects is limited by overlap in neural channels. *Proceed-*

- ings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(24), 8955–8960. <https://doi.org/10.1073/pnas.1317860111>
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: a reconsideration of mental storage capacity. *The Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 87–185. <https://doi.org/10.1017/S0140525X01003922>
- 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>
- Cowan, N., Chen, Z., & Rouder, J. N. (2004). Constant capacity in an immediate serial-recall task: A logical sequel to Miller (1956). *Psychological Science*, 15(9), 634–640. <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2004.00732.x>
- Dent, K., & Smyth, M. M. (2005). Verbal coding and the storage of form-position associations in visual-spatial short-term memory. *Acta Psychologica*, 120(2), 113–140. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2005.03.004>
- Duncan, J., & Humphreys, G. W. (1989). Visual search and stimulus similarity. *Psychological Review*, 96(3), 433–458. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.96.3.433>
- Emrich, S. M., & Ferber, S. (2012). Competition increases binding errors in visual working memory. *Journal of Vision*, 12(4), 1–16. <https://doi.org/10.1167/12.4.12>
- Fougnie, D., & Alvarez, G. A. (2011). Object features fail independently in visual working memory: Evidence for a probabilistic feature-store model. *Journal of Vision*, 11(12), 1–12. <https://doi.org/10.1167/11.12.1>
- Fougnie, D., Asplund, C. L., & Marois, R. (2010). What are the units of storage in visual working memory? *Journal of Vision*, 10(12), 1–11. <https://doi.org/10.1167/10.12.27>

- Fougnie, D., Cormiea, S. M., & Alvarez, G. A. (2013). Object-based benefits without object-based representations. *Journal of Experimental Psychology: General*, *142*(3), 621–626. <https://doi.org/10.1037/a0030300>
- Fukuda, K., Vogel, E., Mayr, U., & Awh, E. (2010). Quantity, not quality: The relationship between fluid intelligence and working memory capacity. *Psychonomic Bulletin and Review*, *17*(5), 673–679. <https://doi.org/10.3758/17.5.673>
- Hardman, K. O., & Cowan, N. (2015). Remembering complex objects in visual working memory: Do capacity limits restrict objects or features? *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, *41*(2), 325–347. <https://doi.org/10.1037/xlm0000031>
- Hollingworth, A., & Rasmussen, I. P. (2010). Binding objects to locations: The relationship between object files and visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *36*(3), 543–564. <https://doi.org/10.1037/a0017836>
- Hunt, R. R. (2006). The Concept of Distinctiveness in Memory Research. In *Distinctiveness and memory* (p. 476). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195169669.003.0001>
- Isabel E. Asp, Störmer, V., & Brady, T. (2019). *Greater visual working memory capacity for visually-matched stimuli when they are recognized as meaningful*. 1–17.
- Jiang, Y. V., Lee, H. J., Asaad, A., & Remington, R. (2016). Similarity effects in visual working memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, *23*(2), 476–482. <https://doi.org/10.3758/s13423-015-0905-5>
- Kahneman, D., Treisman, a, & Gibbs, B. J. (1992). The reviewing of object files: object-specific integration of information. *Cognitive Psychology*, *24*(2), 175–219. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(92\)90007-O](https://doi.org/10.1016/0010-0285(92)90007-O)

- Lee, D., & Chun, M. M. (2001). What are the units of visual short-term memory, objects or spatial locations? *Perception & Psychophysics*, *63*(2), 253–257. <https://doi.org/10.3758/BF03194466>
- Liang, Y., Pertzov, Y., Nicholas, J. M., Henley, S. M. D., Crutch, S., Woodward, F., Leung, K., Fox, N. C., & Husain, M. (2016). Visual short-term memory binding deficit in familial Alzheimer's disease. *Cortex*, *78*, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.01.015>
- Lin, P.-H., & Luck, S. J. (2009). The Influence of Similarity on Visual Working Memory Representations. *Visual Cognition*, *17*(3), 356–372. <https://doi.org/10.1080/13506280701766313>
- Logie, R. (1988). Working memory, Alan Baddeley, Oxford University Press, Oxford 1986. No. of pages: 289. Price £30.00 (Hardback), ISBN 0 19 852116 2. *Applied Cognitive Psychology*, *2*(2), 166–168. <https://doi.org/10.1002/acp.2350020209>
- Logie, R. H. (2003). Spatial and Visual Working Memory: A Mental Workspace. *Psychology of Learning and Motivation - Advances in Research and Theory*, *42*, 37–78. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(03\)01002-8](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(03)01002-8)
- 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>
- Luria, R., & Vogel, E. K. (2011). Shape and color conjunction stimuli are represented as bound objects in visual working memory. *Neuropsychologia*, *49*(6), 1632–1639. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.11.031>
- Macmillan, & Creelman. (2005). Detection theory: A user's guide, 2nd ed. *Lawrence Erlbaum Associates Publishers*.

- Magen, H., & Emmanouil, T. A. (2019). Spatial Organization in Self-Initiated Visual Working Memory. *Frontiers in Psychology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02734>
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 101(2), 343–352. <https://doi.org/10.1037/h0043158>
- O'Donnell, R. E., Clement, A., & Brockmole, J. R. (2018). Semantic and functional relationships among objects increase the capacity of visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 44(7), 1151–1158. <https://doi.org/10.1037/xlm0000508>
- Oberauer, K., & Eichenberger, S. (2013). Visual working memory declines when more features must be remembered for each object. *Memory & Cognition*, 41(8), 1212–1227. <https://doi.org/10.3758/s13421-013-0333-6>
- Oberauer, K., & Lin, H. (2017). An Interference Model of Visual Working Memory. *Psychological Review*, 124(1), 1–39. <https://doi.org/10.1037/rev0000044>
- Oberauer, K., & Lin, H. (2017). An Interference Model of Visual Working Memory. *Psychological Review*, 124(1), 1–39. <https://doi.org/10.1037/rev0000044>
- Olson, I. R., & Jiang, Y. (2002). Is visual short-term memory object based? Rejection of the "strong-object" hypothesis. *Perception and Psychophysics*, 64(7), 1055–1067. <https://doi.org/10.3758/BF03194756>
- 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., Dong, M. Y., Peich, M. C., & Husain, M. (2012). Forgetting What Was Where: The Fragility of Object-Location Binding. *PLoS ONE*, 7(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048214>
- Pertsov, Y., Dong, M. Y., Peich, M. C., & Husain, M. (2012). Forgetting What Was Where: The Fragility of Object-Location Binding. *PLoS ONE*, 7(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048214>
- Postma, A., & De Haan, E. H. F. (1996). What Was Where? Memory for Object Locations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 49(1), 178–199. <https://doi.org/10.1080/713755605>
- Pratte, M. S. (2019). Swap errors in spatial working memory are guesses. *Psychonomic Bulletin & Review*, 26(3), 958–966. <https://doi.org/10.3758/s13423-018-1524-8>
- Qian, J., Zhang, K., Liu, S., & Lei, Q. (2019). The transition from feature to object: Storage unit in visual working memory depends on task difficulty. *Memory & Cognition*, 47(8), 1498–1514. <https://doi.org/10.3758/s13421-019-00956-y>
- Rouder, J. N., Morey, R. D., Cowan, N., Zwilling, C. E., Morey, C. C., & Pratte, M. S. (2008). An assessment of fixed-capacity models of visual working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(16), 5975–5979. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711295105>
- Rouder, J. N., Morey, R. D., Cowan, N., Zwilling, C. E., Morey, C. C., & Pratte, M. S. (2008). An assessment of fixed-capacity models of visual working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(16), 5975–5979. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711295105>
- Schneegans, S., & Bays, P. M. (2017). Neural Architecture for Feature Binding in Visual Working Memory. *The Journal of Neuroscience : The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 37(14), 3913–3925. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3493-16.2017>

- Schurgin, M. W., Wixted, J. T., & Brady, T. F. (2020). Psychophysical scaling reveals a unified theory of visual memory strength. *Nature Human Behaviour*, 4(11), 1156–1172. <https://doi.org/10.1038/s41562-020-00938-0>
- Shin, H., & Ji Ma, W. (2017). Visual short-term memory for oriented, colored objects. *Journal of Vision*, 17(9), 1–19. <https://doi.org/10.1167/17.9.12>
- Sims, C. R., Jacobs, R. A., & Knill, D. C. (2012). An ideal observer analysis of visual working memory. *Psychological Review*, 119(4), 807–830. <https://doi.org/10.1037/a0029856>
- Spachholz, P., & Kuhbandner, C. (2017). Visual long-term memory is not unitary: Flexible storage of visual information as features or objects as a function of affect. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 1–10. <https://doi.org/10.3758/s13415-017-0538-4>
- Stoermer, V., & Brady, T. (2021). The role of meaning in visual working memory: Real-world objects, but not simple features, benefit from deeper processing. *Journal of Vision*, 21(9), 2644. <https://doi.org/10.1167/jov.21.9.2644>
- Toh, Y. N., Sisk, C. A., & Jiang, Y. V. (2020). Effects of changing object identity on location working memory. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 82(1), 294–311. <https://doi.org/10.3758/s13414-019-01738-z>
- Treisman, A. (1996). The binding problem. *Current Opinion in Neurobiology*, 6(2), 171–178. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(96\)80070-5](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(96)80070-5)
- Treisman, A. (1999). Solutions to the binding problem: Progress through controversy and convergence. *Neuron*, 24(1), 105–110. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(00\)80826-0](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(00)80826-0)
- Treisman, A. (2006). How the deployment of attention determines what we see. In *Visual Cognition* (Vol. 14, Issues 4–8). <https://doi.org/10.1080/13506280500195250>

- Trick, L. M., & Pylyshyn, Z. W. (1993). What Enumeration Studies Can Show Us About Spatial Attention: Evidence for Limited Capacity Preattentive Processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *19*(2), 331–351. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.19.2.331>
- Unsworth, N., Fukuda, K., Awh, E., & Vogel, E. K. (2015). Working memory delay activity predicts individual differences in cognitive abilities. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *27*(5), 853–865. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00765
- Utochkin, I. S., & Brady, T. F. (2020). Individual representations in visual working memory inherit ensemble properties. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *46*(5), 458–473. <https://doi.org/10.1037/xhp0000727>
- Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2001). Storage of features, conjunctions and objects in visual working memory. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, *27*(1), 92–114. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.27.1.92>
- Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2001). Storage of features, conjunctions and objects in visual working memory. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, *27*(1), 92–114. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.27.1.92>
- Wang, B., Cao, X., Theeuwes, J., Olivers, C. N. L., & Wang, Z. (2017). Separate capacities for storing different features in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *43*(2), 226–236. <https://doi.org/10.1037/xlm0000295>
- Wheeler, M. E., & Treisman, A. M. (2015). Binding in Short-Term Visual Memory . *From Perception to Consciousness*, 350–368. <https://doi.org/10.1093/acprof:osobl/9780199734337.003.0033>
- Wilken, P., & Ma, W. J. (2004). A detection theory account of change detection. *Journal of Vision*, *4*(12), 11–11. <https://doi.org/10.1167/4.12.11>

- Wolfe, J. M., & Bennett, S. C. (1997). Preattentive object files: Shapeless bundles of basic features. *Vision Research*, *37*(1), 25–43. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(96\)00111-3](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(96)00111-3)
- Xu, Y. (2002). Limitations of object-based feature encoding in visual short-term memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *28*(2), 458–468. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.28.2.458>
- Xu, Y., & Chun, M. M. (2006). Dissociable neural mechanisms supporting visual short-term memory for objects. *Nature*, *440*(7080), 91–95. <https://doi.org/10.1038/nature04262>
- Zhang, W., & Luck, S. J. (2008). Discrete Fixed-Resolution Representations in Visual Working Memory Weiwei. *Nature*, *453*(7192), 233–235. <https://doi.org/10.1038/nature06860>.Discrete