

■ Удержание и обновление вербального и невербального материала в рабочей памяти при здоровом старении

Я.Р. Паникратова^{1,2} , О.А. Королькова^{1,3}, М.Е. Пчелинцева^{1,4}, А.В. Смирнова¹, С.М. Менинг^{1,4}, В.Е. Сеницын^{1,5}, Е.В. Печенкова^{1,4}

¹ Московский центр непрерывного математического образования, Москва, Российская Федерация

² Научный центр психического здоровья, Москва, Российская Федерация

³ Московский государственный психолого-педагогический университет, Москва, Российская Федерация

⁴ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Российская Федерация

⁵ Медицинский научно-образовательный институт Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

 panikratova@mail.ru

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Состояние рабочей памяти (РП) ухудшается в пожилом возрасте. Несмотря на наличие большого массива релевантных исследований, еще недостаточно хорошо охарактеризованы изменения вербальной и невербальной РП, сопряженные именно со здоровым старением, а также их мозговые основы.

Цель. Анализ изменений процессов удержания и обновления вербального и невербального материала в РП при здоровом старении (отсутствии когнитивного снижения, неврологических и психиатрических заболеваний, а также сердечно-сосудистых и цереброваскулярных событий, онкологических заболеваний в анамнезе).

Выборка. Финальные группы, эквивалентные по уровню образования и половому составу, включали 16 пожилых (65,7 ± 4,4 лет) и 16 молодых (23,3 ± 4,9 лет) праворуких участников.

Методы. Проанализированы поведенческие данные из проекта, в рамках которого с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) и магнитоэнцефалографии (МЭГ) регистрировалась активность головного мозга при выполнении разработанных нами ранее максимально сопоставимых вербальных и невербальных вариантов задач Стернберга и «N шагов назад». Это было сделано, чтобы преодолеть методические ограничения предыдущих исследований, в которых для оценки вербальной и невербальной РП использовались задачи, направленные на разные процессы (например, обновление вербальной и удержание материала в невербальной РП), а также характеризующиеся разной структурой, стимульным материалом и сложностью. Нейрофизиологические данные в текущей статье не анализировались.

Результаты. У пожилой группы во всех задачах наблюдалось значительно большее время ответов, чем у молодой. Точность в задаче Стернберга и в контрольной задаче «0 шагов назад» не была связана с возрастом, тогда как в задаче «2 шага назад» была ниже на 5–10% в пожилой группе по сравнению с молодой. Наблюдались отдельные свидетельства в пользу того, что невербальная РП может ухудшаться с возрастом в большей степени, чем вербальная.

Выводы. Удержание материала в РП не ухудшается при здоровом старении. Как собственно возрастное изменение РП может рассматриваться ухудшение обновления материала в РП при ее высокой нагрузке.

Ключевые слова: рабочая память, вербальный материал, невербальный материал, удержание, обновление, пожилой возраст, здоровое старение

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 23-78-00008, тема проекта «Уточнение мозговых механизмов рабочей памяти во взрослом возрасте и в процессе старения за счет совместного использования данных фМРТ и МЭГ».

Благодарности. Исследование выполнено на Уникальной научной установке «Центр нейрокогнитивных исследований (МЭГ-центр)» МГППУ. Авторы благодарят Андрея Олеговича Прокофьева, Евгения Алексеевича Шапошникова, Евгению Сергеевну Семину, Людмилу Андрияновну Маковскую, Марию Владимировну Егорову и Марию Андреевну Фомину за помощь в сборе данных, а Елену Александровну Мершину — за помощь в организации исследования.

Для цитирования: Паникратова, Я.Р., Королькова, О.А., Пчелинцева, М.Е., Смирнова, А.В., Менинг, С.М., Синицын, В.Е., Печенкова, Е.В. (2026). Удержание и обновление вербального и невербального материала в рабочей памяти при здоровом старении. *Национальный психологический журнал*, 21(2), 144–158. <https://doi.org/10.11621/npj.2026.0211>

Maintenance and Updating of Verbal and Nonverbal Material in Working Memory in Healthy Ageing

Yana R. Panikratova^{1,2} , Olga A. Korolkova^{1,3}, Mariia E. Pchelintseva^{1,4}, Anna V. Smirnova¹, Semyon M. Mening^{1,4}, Valentin E. Sinitsyn^{1,5}, Ekaterina V. Pechenkova^{1,4}

¹ Moscow Center for Continuous Mathematical Education, Moscow, Russian Federation

² Mental Health Research Center, Moscow, Russian Federation

³ Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russian Federation

⁴ HSE University, Moscow, Russian Federation

⁵ University Clinic, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

 panikratova@mail.ru

ABSTRACT

Background. Working memory (WM) declines with ageing. Despite a large body of relevant studies, changes in verbal and nonverbal WM, relevant specifically for healthy aging, and their brain correlates, remain understudied.

Objectives. Our study aimed to analyse changes in maintenance and updating of verbal and nonverbal material in WM in healthy ageing (i.e., the absence of cognitive decline, neurological and mental disorders, as well as the history of cardiovascular and cerebrovascular events and oncological diseases).

Study Participants. The final groups were equivalent in terms of education level and gender composition and comprised 16 older (65.7 ± 4.4 years) and 16 younger (23.3 ± 4.9 years) right-handed participants.

Methods. We analysed the behavioural data from the project wherein the brain activity was registered via functional magnetic resonance imaging (fMRI) and magnetoencephalography (MEG) while the participants performed maximally comparable verbal and nonverbal versions of the Sternberg and n-back tasks developed by us earlier. This was done to overcome the methodological limitations of previous studies which used verbal and nonverbal WM tasks that addressed different processes (e.g., updating of verbal or maintenance of non-verbal material in WM), and had different structure, stimuli, and difficulty. Neurophysiological data were not analysed in the current article.

Results. Older participants demonstrated slower responses in all tasks than the younger participants. Response accuracy in the Sternberg task and the 0-back task was independent of age, whereas it decreased in the 2-back task by 5–10% in the older participants compared to the younger group. Some evidence in favour of a more prominent decrease of nonverbal vs. verbal WM in older participants was observed.

Conclusions. Maintenance of material in WM is not affected by healthy ageing. Decline in updating observed in high WM load may be considered as a true age-related change of WM.

Keywords: working memory, verbal material, nonverbal material, maintenance, updating, elderly, healthy ageing

Funding. The study has been supported by Russian Science Foundation (RSF), project No. 23-78-00008, “Refined understanding of neural underpinnings of working memory in adult and ageing population through the combined use of fMRI and MEG data”.

Acknowledgements. The study was conducted at the unique research facility “Center for Neurocognitive Research (MEG-Center)” of MSUPE. The authors are grateful to Andrey Prokofiev, Evgeny Shaposhnikov, Evgenia Semina, Lyudmila Makovskaya, Maria Egorova, and Maria Fomina for their assistance in collecting data, and Elena Merzhina for her assistance in organizing the study.

For citation: Panikratova, Ya.R., Korolkova, O.A., Pchelintseva, M.E., Smirnova, A.V., Mening, S.M., Sinitsyn, V.E., Pechenkova, E.V. (2026). Maintenance and updating of verbal and nonverbal material in working memory in healthy ageing. *National Psychological Journal*, 21(2), 144–158. <https://doi.org/10.11621/npj.2026.0211>

ВВЕДЕНИЕ

Рабочая память (РП) — это система кратковременного хранения и обработки ограниченного объема информации, необходимой для текущей умственной активности (Logie et al., 2020). На данный момент в когнитивной психологии существует множество моделей РП, значительно отличающихся друг от друга. Тем не менее большинство исследователей выделяют в качестве ключевых процессов переработки информации в РП ее удержание и преобразование, которые оцениваются с помощью разных задач (Naveh-Benjamin, Cowan, 2023). Для оценки удержания используются простые задачи для измерения объема памяти (simple span tasks), предполагающие воспроизведение ряда ранее предъявленных стимулов, или задачи на отсроченное сравнение тестового стимула с эталонным (например, задача Стернберга). В свою очередь, преобразование материала во внутреннем плане может предполагать его структурирование в соответствии с определенными правилами (например, воспроизведение цифр в порядке возрастания); обновление содержания РП, т.е. замену более не релевантной информации на актуальную (например, в задаче «N шагов назад», n-back); а также оттормаживание интерференции (например, в сложных задачах на объем памяти, complex span, когда требуется запоминать материал при одновременном выполнении побочной задачи). Таким образом, активные операции преобразования создают большую нагрузку на регуляторные функции (executive functions), чем простое кратковременное удержание материала в РП.

Большинство моделей РП также проводят различие между вербальной (слухоречевой; фонологической и артикуляторной) и невербальной (зрительной и/или пространственной) РП. Вербальным материалом для запоминания могут являться буквы, цифры, слова или предложения, а невербальным — геометрические фигуры, узоры, предметы, лица, места в пространстве, маршруты и пр. В различных моделях вербальная и невербальная РП рассматриваются либо как отдельные подсистемы, либо как процессы, специфичные для удержания различного материала. Так, в многокомпонентной модели Бэддели и Хитча фонологическая петля и зрительно-пространственный блокнот являются отдельными модулями РП (Baddeley et al., 2020), в то время как модель вложенных процессов (embedded processes) не предполагает наличия подсистем в РП, но различает механизмы удержания материала: вербального — за счет скрытой (беззвучной) артикуляции, а невербального — за счет удержания репрезентации в фокусе внимания (Cowan et al., 2020).

Состояние РП во многом определяет когнитивные ресурсы, и, следовательно, уровень бытового, социального и профессионального функционирования человека: например, способность самостоятельно совершать покупки в магазине, распоряжаться финансами, пользоваться телефоном, готовить и убирать, использовать транспорт, вовремя принимать лекарства и посещать врача; корректно понимать речь собеседника и сопоставлять жесты и лицевые экспрессии с ее содержанием, выполнять договоренности и удерживать собственные намерения (Naveh-Benjamin, Cowan, 2023; Raimo et al., 2024; Reuter-Lorenz, Sylvester, 2005). Дефицит РП занимает важное место в картине когнитивных нарушений пожилого возраста при деменциях, ассоциированных с различными заболеваниями, и мягком когнитивном снижении (Aurtenetxe et al., 2016; Kirova et al., 2015; Pillai et al., 2014; Sabahi et al., 2022). Состояние РП наряду со скоростью обработки информации, вниманием и планированием может предсказать развитие когнитивного снижения в будущем (Camino-Pontes et al., 2023).

Ухудшение РП само по себе наблюдается и при старении, не сопровождающемся когнитивным снижением (Cohen et al., 2019; Naveh-Benjamin, Cowan, 2023; Reuter-Lorenz, Sylvester, 2005). Понимание степени, структуры и механизмов данных изменений релевантно для уточнения теорий РП в когнитивной психологии, расширения базы знаний и развития диагностических инструментов возрастной нейропсихологии, а также для разработки эффективных когнитивных интервенций для людей пожилого возраста.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

В соответствии с недавно опубликованным обзором метаанализов и крупных исследований, адресованных состоянию РП у здоровых людей пожилого возраста (Naveh-Benjamin, Cowan, 2023), объем РП для хранения материала сам по себе уменьшается в умеренной степени (на 5–10%), однако при одновременном выполнении побочной задачи снижение усугубляется (до 25%). Выраженное ухудшение наблюдается для обновления материала, что проявляется, в частности, в виде снижения точности и увеличения времени ответа в задаче «N шагов назад» при $n \geq 2$ (когда текущий стимул необходимо сопоставлять с позапрошлым или ранее предъявленными стимулами). По мнению авторов обзора, данный паттерн неравномерного ухудшения процессов РП может объясняться регуляторным дефицитом, ограничением ресурсов внимания или снижением скорости обработки информации в пожилом возрасте. Кроме того, при старении, не сопровождающемся когнитивным снижением, в большей степени по сравнению с вербальной страдает зрительная/зрительно-пространственная РП. Возможными причинами могут быть большая связь вербального материала с содержанием семантической памяти (т.е. его знакомость) или большие возможности применения различных стратегий при запоминании вербального материала (например, повторение в фонологической петле или объединение в структурные единицы — чанки (Naveh-Benjamin, Cowan, 2023)). Также причиной может выступать ухудшение переработки зрительной и зрительно-пространственной информации, наблюдаемое у здоровых пожилых людей (Bao et al., 2025).

Несмотря на наличие достаточно большого массива данных об изменениях РП в пожилом возрасте, опубликованные исследования имеют методологические ограничения. В частности, корректное сравнение состояния вербальной

и невербальной РП требует использования методик, нацеленных на один и тот же процесс в РП (например, удержание или обновление материала) и сопоставимых по инструкции, структуре, физическим признакам стимульного материала и сложности. Однако используемые в соответствующих исследованиях методики для оценки невербальной и вербальной РП чаще всего различаются по одному или нескольким из перечисленных параметров (например, Hale et al., 2011; Johnson et al., 2010). Так, в работе Джонсон и соавторов (Johnson et al., 2010) с участием более 95 тыс. людей в возрасте от 18 до 90 лет для оценки зрительной РП использовались задачи связывания признаков (feature binding; в данной задаче необходимо указать цвет, форму и место в пространстве для ранее предъявленных стимулов), запоминания зрительных паттернов (visual pattern span; отметить те ячейки матрицы, которые были закрашены) и определения пространственной ориентации (spatial orientation; ответить, в какой руке человека, который может располагаться по-разному по отношению к наблюдателю, находится синий мяч). При этом для оценки вербальной РП использовались задачи повторения цифровых рядов (forward digit span) и запоминания последних слов в предложениях одновременно с определением того, является ли каждое из утверждений логически верным. Очевидно, что прямое сопоставление результатов, полученных с помощью этих двух групп задач, не представляется возможным.

С целью преодоления подобных методических трудностей мы разработали эквивалентные варианты методик для оценки процессов удержания и обновления материала в вербальной и невербальной РП — всего четыре задачи (Korolkova et al., in press). Стимулы в вербальных и невербальных вариантах задач сходны во всем, кроме возможности актуализации их слухоречевой и/или артикуляторной репрезентации.

В данной статье мы приводим результаты сопоставления поведенческих данных о выполнении этих задач здоровыми пожилыми (60–75 лет) и молодыми людьми (18–35 лет), собранных в рамках проекта по изучению мозговых основ РП и ее возрастных изменений. Поведенческие данные регистрировались параллельно с получением нейрофизиологических данных (магнитоэнцефалография, МЭГ, и функциональная магнитно-резонансная томография, фМРТ); рассмотрение нейрофизиологических результатов остается за рамками данной статьи. Поскольку известно, что многие возраст-ассоциированные заболевания — инфаркт миокарда (Johansen et al., 2023), инсульт (Cramer et al., 2023; Lugtmeijer et al., 2021; Tang et al., 2018), онкологические заболевания (Hardy et al., 2018; Lange et al., 2019) и другие — могут оказывать существенное негативное влияние на состояние когнитивных функций, в нашем исследовании был реализован тщательный отбор пожилых участников, позволяющий исследовать изменения РП, связанные именно с процессами старения, а не с заболеваниями, часто встречающимися в пожилом возрасте. Опираясь на данные, обобщенные в работе Нав-Бенджамина и Кована (Naveh-Benjamin, Cowan, 2023), мы предположили, что возрастным изменениям будет подвержено в первую очередь обновление материала в РП. Также по этим данным можно предположить, что возрастное снижение может быть больше выражено для невербальной РП по сравнению с вербальной. Однако поскольку использованные в предыдущих работах вербальные и невербальные задачи плохо сопоставимы, обнаруженный эффект может быть связан с этой методической проблемой, а не отражать реальную неравномерность возрастного ухудшения РП. Мы предполагаем, что в таком случае данный эффект не будет воспроизведен в нашем исследовании с использованием эквивалентных вербальных и невербальных задач.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Оборудование

Исследование проводилось с использованием двух экспериментальных установок. В фМРТ-среде использовался МР-томограф Siemens Vida 3 T, установленный в МНОИ МГУ имени М.В. Ломоносова. Зрительные стимулы предъявлялись на МР-совместимом экране SensaVue с диагональю 32 дюйма (Invivo Corporation, США). Испытуемые лежали в томографе и смотрели на экран через систему зеркал, закрепленных на головной катушке. Регистрация и запись поведенческих данных осуществлялись с помощью МР-совместимой установки Lumina с кнопками модели LS-PAIR (Cedrus, США); использовался один из двух пультов (две кнопки). Системы предъявления стимулов и регистрации поведенческих данных были интегрированы друг с другом и с томографом.

В МЭГ-среде (МЭГ-центр МГППУ) исследование проводилось в помещении с магнитным и акустическим экранированием (AK3b, Vacuumschmelze GmbH, Германия), где была установлена система dc-SQUID Neuromag VectorView (Elekta-Neuromag, Финляндия). Участники сидели в анатомическом кресле, перед которым на уровне глаз располагался проекционный экран. Стимульный материал демонстрировался при помощи проектора Panasonic PT-D7700E-K DLP. Регистрация ответов участников выполнялась с помощью одного из двух пультов МЭГ-совместимой оптоволоконной системы Current Designs (США).

Предъявление стимулов и регистрация времени и точности ответов испытуемых проводились с использованием PsychoPy (Peirce et al., 2019), версия 2022.2.4 для МЭГ и 2022.2.5 для фМРТ. Угловые размеры изображения на экране в фМРТ-среде составляли 10° по высоте и 17° по ширине, в МЭГ-среде — 22° и 28°, соответственно.

2. Материалы и процедура

Для данного исследования были использованы варианты двух наиболее популярных методик изучения РП, применяемых в нейровизуализации, одна из которых — «N шагов назад» (n-back) — позволяет оценить процесс обновления

РП (Kirchner, 1958), а другая — задача Стернберга — процесс кратковременного удержания материала без его преобразования (Sternberg, 1966). Применялись ранее разработанные нами сопоставимые вербальные и невербальные варианты указанных задач (Korolkova et al., in press)¹.

В вербальных вариантах в качестве стимулов для запоминания использовались заглавные согласные буквы русского алфавита, в невербальных — символы шрифта BACS2sans (Vidal et al., 2017), специально созданного для исследований в области когнитивной психологии и нейронаук. Буквы являются одним из наиболее часто используемых вербальных материалов в исследованиях РП (например, Hidalgo-Lopez et al., 2025; Owen et al., 2005). В ранних исследованиях кратковременной памяти в когнитивной психологии было показано, что у носителей соответствующего языка после зрительного предъявления букв они перекодируются: их зрительная репрезентация сохраняется в течение примерно 2–2,5 с, после чего остаются только слухоречевые репрезентации (Posner et al., 1969). Для трудновербализуемых символов искусственного алфавита нет однозначных репрезентаций в виде наборов звуков речи или слов; кроме того, краткое время их предъявления позволяет свести к минимуму возможности вербализации.

На группе из 35 молодых испытуемых было показано (Korolkova et al., in press), что точность и время ответа являются сопоставимыми в вербальной и невербальной версиях задачи «N шагов назад», нацеленной на оценку обновления информации в РП. Точность и время ответа в вербальной и невербальной версиях задачи Стернберга также являются сопоставимыми после подстройки размера ряда для запоминания (2 символа соответствуют 4 буквам, 4 символа 8 буквам). Это согласуется с современными представлениями о том, что объем РП, выраженный в структурных единицах материала, определяется общим количеством доступных ресурсов обработки информации и сложностью обработки отдельных единиц для данного материала (Ma et al., 2014).

В задаче «N шагов назад» участнику поочередно предъявляется ряд стимулов; требуется как можно быстрее отвечать, совпадает ли текущий стимул с тем, который был предъявлен n шагов назад. Сложность варьируется при помощи увеличения n. В данном исследовании задача «N шагов назад» включала два условия: основное — «2 шага назад» и контрольное — «0 шагов назад», которые чередовались друг с другом. В каждом условии на экране поочередно предъявлялись десять стимулов, каждый на 2,1 с. В контрольном условии первый стимул в ряду являлся целевым, и каждый из последующих девяти требовалось сопоставлять с ним. В основном условии требовалось начинать с третьей буквы/символа отвечать, совпадает ли текущий стимул с позапрошлым (ответ требовался для 8 стимулов в ряду). Выполнение основного и контрольного условий разделялось периодами отдыха по 10 с (на экране появлялась надпись «Отдых»).

В использованной нами модификации задачи Стернберга участнику необходимо было запомнить ряд стимулов, предъявленных одновременно, и после интервала удержания как можно быстрее дать ответ, присутствовал ли в этом ряду тестовый стимул. Увеличение количества запоминаемых элементов повышает загрузку кратковременной памяти и, соответственно, сложность задачи. В нашем исследовании ряд стимулов предъявлялся в течение 2 с: строка из 4, 6 либо 8 букв в вербальном варианте или из 2, 4 либо 6 символов в невербальном варианте. В обоих вариантах ряд дополнялся по краям до 8 элементов при помощи символов решетки (#). В контрольном условии предъявлялся ряд из 8 символов решетки. За предъявлением ряда следовал пустой экран (6 с), затем тестовый стимул (3 с), во время появления которого необходимо было дать ответ с помощью нажатия на одну из двух кнопок. Каждая проба начиналась с предъявления фиксационного креста на 1 с и завершалась межпробным интервалом продолжительностью 3 с.

Каждый участник выполнял на каждой из экспериментальных установок по два подхода вербальной и невербальной задачи Стернберга (по 9 проб для каждого уровня загрузки РП за один подход, продолжительность каждого подхода около 10 мин). Каждые 12 проб в задаче Стернберга участнику показывалась обратная связь в виде общего процента правильных ответов с начала текущего подхода. Продолжительность выполнения каждой версии задачи «N шагов назад» на каждой установке составляла около 8 мин (по 6 блоков основной и контрольной задачи), но при записи фМРТ она разбивалась на два подхода по техническим причинам. Порядок выполнения задач был сбалансирован между участниками и между установками для каждого участника. Ответ давался нажатием на одну из двух кнопок, фиксировались точность и время ответа.

Перед каждым сеансом нейрофизиологической записи (и фМРТ, и МЭГ) все участники получали подробные инструкции ко всем задачам и проходили тренировку на ноутбук в обычном помещении.

3. Анализ данных

В каждой из задач анализировались точность и время ответа. Из анализа исключались пробы, в которых время ответа было меньше, чем медиана минус 3 MAD (медианное абсолютное отклонение), рассчитанные отдельно для каждого участника. Дополнительно из анализа времени ответа исключались пробы, ответ в которых был неверным либо пропущенным. Точность ответа анализировалась при помощи обобщенной линейной модели со смешанными эффектами; время ответа — при помощи общей линейной модели со смешанными эффектами. Для точности ответа функцией связи в модели был логит, для времени ответа — функция идентичности (нормальное распределение). Оба типа моделей были реализованы в среде статистической обработки R 4.4.0² и рассчитывались с использованием пакетов lme4 1.1.35.5 (Bates et al., 2015), lmerTest 3.1.3 (Kuznetsova et al., 2017) и multcomp 1.4.26 (Hothorn et al., 2008). Для данных по обеим

¹ <https://osf.io/54c6m/>

² R Core Team. (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/> (accessed: 25.01.2026).

задачам фиксированными факторами являлись Группа (молодые/пожилые), Тип запоминаемого материала (вербальный/невербальный) и Условия выполнения (МЭГ/фМРТ); также вводился фиксированный фактор для уровня загрузки РП: для задачи «N шагов назад» — фактор Блок («0 шагов назад»/«2 шага назад»), а для задачи Стернберга — Длина запоминаемой строки (0, 2, 4, 6, 8 элементов). Взаимодействия всех факторов и случайный эффект участника были включены во все модели. Зависимой переменной служила точность ответа (верно/неверно) либо время ответа в секундах. На основании моделей рассчитывались апостериорные контрасты с поправкой Бенджамини — Хохберга (FDR) в каждой задаче: между разными группами участников, типами материала, уровнями сложности и условиями выполнения. Расчет контрастов в задаче Стернберга между вербальным и невербальным материалом проводился с учетом эквивалентности данных задач при разной длине строки: по сложности строка из 2 символов соответствует строке из 4 букв, а строка из 4 символов — строке из 8 букв (Korolkova et al., in press). Строки из 6 букв либо символов при расчете контрастов не использовались. Также дополнительно был подсчитан коэффициент корреляции Спирмена для связи между приростом времени ответа (время в условии «2 шага назад» минус время в условии «0 шагов назад») и уменьшением точности (точность в условии «0 шагов назад» минус точность в условии «2 шага назад») при увеличении загрузки РП в задаче «N шагов назад». Корреляции были рассчитаны отдельно для каждой возрастной группы и вида материала, уровень значимости корректировался поправкой Бенджамини — Хохберга.

ВЫБОРКА

Участие в исследовании приняли пожилые ($n = 21$) и молодые ($n = 17$) добровольцы из академического сообщества г. Москвы. Исследование было одобрено Локальным этическим комитетом МНОИ МГУ имени М.В. Ломоносова. Все добровольцы дали письменное информированное согласие на участие в исследовании. Участники, прошедшие все этапы исследования, получили денежное вознаграждение.

В исследование были включены праворукие участники с нормальной или скомпенсированной остротой зрения и нормальным слухом, а также родным русским языком. Критериями исключения для всех участников являлись противопоказания к МРТ или невозможность проведения записи МЭГ (например, наличие ортодонтического ретейнера), диагностированные заболевания ЦНС (в том числе нейродегенеративные) или психические заболевания, а для пожилой группы — также инфаркт миокарда, острое нарушение мозгового кровообращения, онкологические или аутоиммунные системные заболевания в анамнезе. Для пожилой группы дополнительно проводилась оценка состояния когнитивных функций по «Монреальской когнитивной шкале» (MoCA (Nasreddine et al., 2005)) и структурных изображений головного мозга по шкале Фазекаса. Из-за низкого балла по шкале MoCA (<23) были исключены данные одного участника, по результатам описания структурных изображений (2 балла по шкале Фазекаса) — данные еще двоих. Также данные одного молодого и двух пожилых участников были исключены, поскольку они не прошли все этапы исследования.

В итоговую выборку вошли 16 пожилых и 16 молодых участников (характеристики групп приведены в Таблице 1). Группы не отличались по количеству лет образования ($t(30) = 0,65$; $p = 0,519$). Все участники исследования были праворукими (балл по Эдинбургскому опроснику для оценки ведущей руки (Oldfield, 1971) выше 40).

Таблица 1

Характеристики участников исследования

	Молодые участники	Пожилые участники
Возраст (M ± SD)	23,3 ± 4,9	65,7 ± 4,4
Пол (мужской/женский)	3/13	3/13
Количество лет образования	14,8 ± 3,0	15,4 ± 2,1
Ведущая рука (Oldfield, 1971), балл	83,3 ± 17,7	93,8 ± 14,0
Монреальская когнитивная шкала, балл	—	26,5 ± 1,5

Table 1

Characteristics of participant groups

	Younger participants	Older participants
Age (M ± SD)	23.3 ± 4.9	65.7 ± 4.4
Sex (male/female)	3/13	3/13
Years of education	14.8 ± 3.0	15.4 ± 2.1
Handedness (Oldfield, 1971), score	83.3 ± 17.7	93.8 ± 14.0
MoCA, score	—	26.5 ± 1.5

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Задача Стернберга

В Таблице 2 представлены средние значения и стандартные отклонения точности и времени ответа в задаче Стернберга.

Таблица 2

**Точность и время выполнения задачи Стернберга
 (средние и стандартные отклонения;
 время — только для верных ответов)**

Группа	Условия	Тип материала	Длина строки	Точность		Время (с)	
				Среднее	Ст. откл.	Среднее	Ст. откл.
Пожилые	фМРТ	Невербальный	0	1,000	0,000	0,641	0,272
			2	0,894	0,309	1,191	0,431
			4	0,669	0,471	1,303	0,426
			6	0,644	0,480	1,369	0,442
		Вербальный	0	1,000	0,000	0,647	0,283
			4	0,961	0,194	1,147	0,394
			6	0,824	0,382	1,254	0,442
			8	0,769	0,422	1,339	0,470
	МЭГ	Невербальный	0	1,000	0,000	0,582	0,260
			2	0,929	0,257	1,028	0,376
			4	0,733	0,443	1,167	0,401
			6	0,639	0,481	1,252	0,428
		Вербальный	0	1,000	0,000	0,580	0,252
			4	0,958	0,201	1,048	0,383
			6	0,868	0,340	1,141	0,430
			8	0,739	0,440	1,211	0,411
Молодые	фМРТ	Невербальный	0	0,996	0,060	0,549	0,333
			2	0,954	0,209	0,899	0,367
			4	0,827	0,379	1,025	0,351
			6	0,708	0,455	1,093	0,390
		Вербальный	0	0,996	0,060	0,543	0,338
			4	0,972	0,165	0,920	0,395
			6	0,905	0,294	0,982	0,399
			8	0,810	0,393	1,044	0,422
	МЭГ	Невербальный	0	0,993	0,081	0,511	0,312
			2	0,940	0,237	0,863	0,341
			4	0,813	0,391	1,014	0,414
			6	0,704	0,457	1,047	0,418
		Вербальный	0	1,000	0,000	0,489	0,276
			4	0,943	0,233	0,850	0,333
			6	0,878	0,327	0,941	0,377
			8	0,765	0,425	1,012	0,449

Table 2

Sternberg task response accuracy and response time in correct trials (mean and standard deviation)

Group	Method	Series	Set Size	Response accuracy		Response time (s)	
				Mean	SD	Mean	SD
Older participants	fMRI	Nonverbal	0	1.000	0.000	0.641	0.272
			2	0.894	0.309	1.191	0.431
			4	0.669	0.471	1.303	0.426
			6	0.644	0.480	1.369	0.442
		Verbal	0	1.000	0.000	0.647	0.283
			4	0.961	0.194	1.147	0.394
			6	0.824	0.382	1.254	0.442
			8	0.769	0.422	1.339	0.470
	MEG	Nonverbal	0	1.000	0.000	0.582	0.260
			2	0.929	0.257	1.028	0.376
			4	0.733	0.443	1.167	0.401
			6	0.639	0.481	1.252	0.428
		Verbal	0	1.000	0.000	0.580	0.252
			4	0.958	0.201	1.048	0.383
			6	0.868	0.340	1.141	0.430
			8	0.739	0.440	1.211	0.411
Younger participants	fMRI	Nonverbal	0	0.996	0.060	0.549	0.333
			2	0.954	0.209	0.899	0.367
			4	0.827	0.379	1.025	0.351
			6	0.708	0.455	1.093	0.390
		Verbal	0	0.996	0.060	0.543	0.338
			4	0.972	0.165	0.920	0.395
			6	0.905	0.294	0.982	0.399
			8	0.810	0.393	1.044	0.422
	MEG	Nonverbal	0	0.993	0.081	0.511	0.312
			2	0.940	0.237	0.863	0.341
			4	0.813	0.391	1.014	0.414
			6	0.704	0.457	1.047	0.418
		Verbal	0	1.000	0.000	0.489	0.276
			4	0.943	0.233	0.850	0.333
			6	0.878	0.327	0.941	0.377
			8	0.765	0.425	1.012	0.449

1.1. Точность ответа в задаче Стернберга

При фильтрации данных на основании времени ответа из анализа был исключен 1% проб. Обобщенная логистическая регрессионная модель, построенная по результатам точности выполнения задачи Стернберга, имеет остаточный девианс 8855,2 при 9225 степенях свободы (отношение 0,96; $p = 0,997$, что свидетельствует об отсутствии сверхдисперсии). Информационный критерий Акаике составил 6014,6. Псевдо- R^2 Найджелкерка составил 0,52. Апостериорные контрасты не выявили значимых различий между группами молодых и пожилых участников при анализе по данным всех серий ($z = 0,869$; $p = 0,385$), а также между точностью выполнения вербальных и невербальных вариантов задачи ($z = 1,071$; $p = 0,284$), однако при сравнении в каждой из групп и в каждом из условий выполнения была выявлена значимо более высокая точность решения вербальной, чем невербальной задачи с короткой длиной строки пожилыми участниками в условиях фМРТ ($z = 2,944$; $p = 0,0382$). Различий между точностью выполнения заданий в условиях фМРТ и МЭГ не выявлено ($z = 0,452$; $p = 0,652$). Взаимодействия между группой участников и типом материала также не выявлено ($z < 2,302$; $p > 0,063$).

1.2. Время ответа в задаче Стернберга

Из анализа времени ответа было дополнительно исключено 13,3% проб с ошибочными или пропущенными ответами. Линейная модель, описывающая время ответа в задаче Стернберга, имеет остаточный девианс 911,8 при 7995 степенях свободы (отношение 0,114; $p = 1$). Псевдо- R^2 Найджелкерка составил 0,46. Время ответа в группе пожилых участников было значимо больше, чем в группе молодых, при анализе по данным всех серий ($z = 3,032$; $p = 0,002$). Время выполнения вербальных и невербальных задач в среднем не обнаружило значимых различий ($z = 0,145$; $p = 0,885$), однако оно увеличивалось в условиях фМРТ по сравнению с условиями МЭГ ($z = 8,557$; $p < 0,001$). Взаимодействия между группой участников и типом материала не выявлено ($z < 0,550$; $p > 0,924$).

2. Задача «N шагов назад»

В Таблице 3 представлены средние значения и стандартные отклонения точности и времени ответа в задаче «N шагов назад».

Таблица 3

Точность и время выполнения задачи «N шагов назад»
 (средние и стандартные отклонения; время — только для верных ответов)

Группа	Условия	Тип материала	Блок	Точность		Время (с)	
				Среднее	Ст. откл.	Среднее	Ст. откл.
Пожилые	фМРТ	Невербальный	0	0,917	0,276	0,801	0,302
			2	0,786	0,411	1,058	0,347
		Вербальный	0	0,927	0,261	0,748	0,265
			2	0,846	0,361	1,028	0,351
	МЭГ	Невербальный	0	0,946	0,226	0,688	0,248
			2	0,829	0,377	0,998	0,345
		Вербальный	0	0,952	0,214	0,655	0,253
			2	0,843	0,364	0,937	0,320
Молодые	фМРТ	Невербальный	0	0,931	0,253	0,650	0,207
			2	0,892	0,310	0,867	0,303
		Вербальный	0	0,952	0,213	0,600	0,170
			2	0,923	0,266	0,831	0,274
	МЭГ	Невербальный	0	0,931	0,254	0,589	0,222
			2	0,899	0,301	0,826	0,302
		Вербальный	0	0,935	0,246	0,554	0,216
			2	0,908	0,290	0,813	0,322

Table 3

N-back task accuracy and response time in correct trials (mean and standard deviation)

Group	Method	Series	Block	Response accuracy		Response time	
				Mean	SD	Mean	SD
Older participants	fMRI	Nonverbal	0	0.917	0.276	0.801	0.302
			2	0.786	0.411	1.058	0.347
		Verbal	0	0.927	0.261	0.748	0.265
			2	0.846	0.361	1.028	0.351
	MEG	Nonverbal	0	0.946	0.226	0.688	0.248
			2	0.829	0.377	0.998	0.345
		Verbal	0	0.952	0.214	0.655	0.253
			2	0.843	0.364	0.937	0.320

Younger participants	fMRI	Nonverbal	0	0.931	0.253	0.650	0.207	
			2	0.892	0.310	0.867	0.303	
		Verbal	0	0.952	0.213	0.600	0.170	
			2	0.923	0.266	0.831	0.274	
	MEG	Nonverbal		0	0.931	0.254	0.589	0.222
				2	0.899	0.301	0.826	0.302
Verbal			0	0.935	0.246	0.554	0.216	
			2	0.908	0.290	0.813	0.322	

2.1. Точность ответа в задаче «N шагов назад»

При фильтрации данных на основании времени ответа из анализа были исключены 2% проб. Обобщенная логистическая регрессионная модель, построенная по результатам точности выполнения задачи «N шагов назад», имеет остаточный девианс 7779,7 при 13027 степенях свободы (отношение 0,597; $p = 0,453$, что свидетельствует об отсутствии сверхдисперсии). Информационный критерий Акаике составил 7888,6. Псевдо- R^2 Найджелкерка составил 0,1. Апостериорные контрасты показали, что в задаче «N шагов назад» наблюдаются значимые различия в точности ответа в зависимости от возраста участников (у молодых участников точность значимо выше, чем у пожилых: $z = 2,709$; $p = 0,007$), типа материала (в вербальной задаче точность значимо выше, чем в невербальной: $z = 3,584$; $p < 0,001$) и его сложности (в условии «0 шагов назад» точность выше, чем в условии «2 шага назад»: $z = 12,54$; $p < 0,001$).

Молодые участники точнее пожилых выполняли задания с высоким уровнем сложности — «2 шага назад», но в контрольных заданиях — «0 шагов назад» — не было выявлено различий между группами участников. Все участники точнее выполняли задания с низким уровнем сложности, чем с высоким. Значения z-статистики и уровни значимости для контрастов по отдельным типам материала и условиям фМРТ/МЭГ представлены в Таблице 4.

Сравнение между вербальным и невербальным материалом отдельно по каждой среде и сложности выявило различия только в задаче «2 шага назад» в среде фМРТ ($z = 3,756$; $p < 0,001$), тогда как для других условий различий не обнаружено (задача «0 шагов назад» в фМРТ: $z = 2,114$, $p = 0,131$; задача «0 шагов назад» в МЭГ: $z = 0,680$, $p = 0,936$; задача «2 шага назад» в МЭГ: $z = 0,903$, $p = 0,839$).

Различий между выполнением задач в среде фМРТ и МЭГ не выявлено как по всем условиям в целом ($z = -1,619$; $p = 0,105$), так и по отдельным типам материала и сложности задания (вербальная задача «0 шагов назад»: $z = -0,449$, $p = 0,986$; вербальная задача «2 шага назад»: $z = 1,020$, $p = 0,771$; невербальная задача «0 шагов назад»: $z = -1,895$, $p = 0,213$; невербальная задача «2 шага назад»: $z = -1,926$, $p = 0,200$).

Взаимодействия между группой участников и типом материала не выявлено ($z = 0,064$; $p = 0,802$).

2.2. Время ответа в задаче «N шагов назад»

Из анализа времени ответа было дополнительно исключено 10% проб с ошибочными или пропущенными ответами. Линейная модель, описывающая время ответа в задаче «N шагов назад», имеет остаточный девианс 811,598 при 11777 степенях свободы (отношение 0,069; $p = 1$). Псевдо- R^2 Найджелкерка составил 0,31. Время ответа зависело от возраста участников (молодые участники выполняли задачи значимо быстрее, чем пожилые: $z = -4,582$; $p < 0,001$), типа материала (в вербальной задаче время значимо меньше, чем в невербальной: $z = 7,862$; $p < 0,001$), его сложности (в условии «0 шагов назад» время меньше, чем в условии «2 шага назад»: $z = -53,14$; $p < 0,001$) и среде проведения исследования (в среде фМРТ время значимо выше, чем в среде МЭГ: $z = 13,62$; $p < 0,001$).

Молодые участники быстрее пожилых выполняли все задания — как «0 шагов назад», так и «2 шага назад». Все участники быстрее выполняли задания с низким уровнем сложности, чем с высоким. Значения z-статистики и уровни значимости для контрастов по отдельным типам материала и условиям фМРТ/МЭГ представлены в Таблице 4.

Сравнение между вербальным и невербальным материалом отдельно по каждой среде и сложности также выявило различия во всех условиях (задача «0 шагов назад» в фМРТ: $z = 5,301$, $p < 0,001$; задача «2 шага назад» в фМРТ: $z = 3,148$, $p < 0,001$; задача «0 шагов назад» в МЭГ: $z = 3,748$, $p < 0,001$; задача «2 шага назад» в МЭГ: $z = 3,667$, $p < 0,001$).

Различия между выполнением задач в среде фМРТ и МЭГ также выявлены по всем типам материала и сложности задания (вербальная задача «0 шагов назад»: $z = 7,808$, $p < 0,001$; вербальная задача «2 шага назад»: $z = 5,588$, $p < 0,001$; невербальная задача «0 шагов назад»: $z = 9,279$, $p < 0,001$; невербальная задача «2 шага назад»: $z = 4,984$, $p < 0,001$).

Взаимодействия между группой участников и типом материала не выявлено ($z = 0,005$; $p = 0,418$).

2.3. Связь между временем ответа и точностью в задаче «N шагов назад»

Из четырех связей между приростом времени ответа и уменьшением точности при увеличении загрузки РП в задаче «N шагов назад», то есть при переходе от условия «0 шагов назад» к условию «2 шага назад», значимой оказалась

только корреляция на вербальном материале в группе пожилых участников (коэффициент Спирмена $\rho = -0,45$, $p = 0,037$, с поправкой Бенджамини — Хохберга).

Таблица 4

Апостериорные контрасты в регрессионной модели по результатам задачи «N шагов назад»

	Вербальная задача				Невербальная задача			
	фМРТ		МЭГ		фМРТ		МЭГ	
	z	p	z	p	z	p	z	p
Молодые участники по сравнению с пожилыми: «2 шага назад»								
время ответа	-5,693	<0,001	-3,541	0,002	-5,351	<0,001	-4,908	<0,001
точность	3,726	0,002	3,199	0,011	4,331	<0,001	3,258	0,009
Молодые участники по сравнению с пожилыми: «0 шагов назад»								
время ответа	-4,380	<0,001	-2,972	0,011	-4,300	<0,001	-2,847	0,016
точность	1,873	0,348	-1,293	0,771	0,949	0,946	-1,119	0,876
Все участники: «0 шагов назад» по сравнению с «2 шага назад»								
время ответа	-26,52	<0,001	-28,05	<0,001	-23,67	<0,001	-28,22	0,001
точность	5,094	<0,001	6,528	<0,001	6,753	<0,001	6,813	<0,001

Table 4

Post hoc contrasts in a regression model based on the results of the n-back task

	Verbal task				Nonverbal task			
	fMRI		MEG		fMRI		MEG	
	z	p	z	p	z	p	z	p
Younger participants vs. older participants: 2-back task								
response time	-5.693	<0.001	-3.541	0.002	-5.351	<0.001	-4.908	<0.001
accuracy	3.726	0.002	3.199	0.011	4.331	<0.001	3.258	0.009
Younger participants vs. older participants: 0-back task								
response time	-4.380	<0.001	-2.972	0.011	-4.300	<0.001	-2.847	0.016
accuracy	1.873	0.348	-1.293	0.771	0.949	0.946	-1.119	0.876
All participants: 0-back task vs. 2-back task								
response time	-26.52	<0.001	-28.05	<0.001	-23.67	<0.001	-28.22	0.001
accuracy	5.094	<0.001	6.528	<0.001	6.753	<0.001	6.813	<0.001

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данное исследование было направлено на проверку гипотезы о наличии возрастного снижения удержания и обновления материала в РП у здоровых пожилых людей, не переносивших заболеваний, существенным образом влияющих на ЦНС (таких как сердечно-сосудистые и цереброваскулярные события и онкологические заболевания). Мы также проверили, будет ли наблюдаться описанное в литературе более выраженное снижение эффективности невербальной РП в пожилом возрасте, если использовать для тестирования вербальные и невербальные задачи, нацеленные на один и тот же процесс в РП (удержание или обновление материала) и сопоставимые по инструкции, структуре, физическим признакам стимульного материала и сложности.

Во всех задачах время ответа пожилых участников оказалось значимо больше, чем время ответа молодых. Факт возрастного снижения скорости реакции хорошо известен и неоднократно описан в литературе, хотя продолжается обсуждение того, связан ли он с большей осторожностью пожилых участников, предпочитающих давать более точные ответы за счет снижения скорости, или же с замедлением обработки информации о стимуле и подготовки моторного ответа (Hardwick et al., 2022). Наши результаты свидетельствуют о том, что замедление ответа может наступать по обеим причинам. О снижении скорости сенсомоторных процессов свидетельствует замедление примерно в 100 мс, которое наблюдается

у пожилых участников по сравнению с молодыми в контрольном условии к задаче Стернберга, по сути представляющем собой задачу на простое время реакции. О возможности стратегического замедления свидетельствует обнаруженная нами в пожилой, но не в молодой группе отрицательная связь между приростом времени ответа и снижением его точности при росте загрузки РП в задаче «N шагов назад»: за счет увеличения времени ответа сокращается разрыв в точности. Примечательно, что этот эффект наблюдался в нашем исследовании только на вербальном материале. В популяционном исследовании молодых участников, выполнявших невербальные задачи «N шагов назад», обнаруживалась связь в другом направлении, то есть более точные при возрастающей нагрузке участники были также и более быстрыми (Li et al., 2021).

При этом скорость процесса сканирования кратковременной памяти, судя по нашим данным, при здоровом старении не снижается. Оригинальная задача Стернберга использовалась в эксперименте, направленном на изучение процесса сканирования кратковременной памяти: при возрастании количества элементов в запоминаемом ряду наблюдалось пропорциональное увеличение времени ответа, что свидетельствует о последовательном сканировании единиц материала (Sternberg, 1966). В дополнительном анализе мы не обнаружили значимого взаимодействия между нагрузкой РП (длиной стимульного ряда) и возрастной группой ни для вербального ($z = 0,953$; $p = 0,565$), ни для невербального ($z = 1,132$; $p = 0,449$) материала, и таким образом не обнаружили различий во времени, которое пожилые и молодые участники тратили на обработку одного элемента при сканировании кратковременной памяти. Это совпадает с данными, полученными в 1980-е годы с использованием сходной с нашей модификации задачи Стернберга, в которой эталонный ряд цифр предъявлялся одновременно, а не последовательно, и также не было обнаружено значимых различий по скорости сканирования памяти между пожилыми и молодыми участниками (Cerella et al., 1986).

Согласно нашим результатам по выполнению задачи Стернберга, у группы здорового старения не наблюдается снижения возможностей удержания материала в РП, что верно и для вербального, и для невербального материала. Задача «0 шагов назад» также предполагает преимущественно удержание материала в памяти, хотя речь идет всего об одной единице материала. Эта контрольная задача выполняется пожилыми участниками с той же точностью, что и молодыми. В то же время в задаче «2 шага назад», оценивающей обновление материала в РП, для обоих видов материала наблюдается уменьшение точности у пожилой группы по сравнению с молодой (снижение на 5–10% в различных условиях).

Таким образом, наши результаты соответствуют данным метаанализа Нав-Бенджамина и Кована (Naveh-Benjamin, Cowan, 2023), и именно ухудшение обновления материала в РП при ее высокой нагрузке можно рассматривать как специфически возрастное изменение РП. Удержание материала в РП не страдает при здоровом старении.

Что же касается возможного более раннего снижения возможностей невербальной РП по сравнению с вербальной, то мы получили только отдельные факты, тем не менее в совокупности свидетельствующие в пользу этого предположения. Во-первых, при использовании вербальных и невербальных задач Стернберга, уравненных по сложности на основании данных молодых испытуемых, в пожилой группе точность при низком уровне загрузки РП была больше в вербальной задаче, чем в невербальной. Во-вторых, в пожилой группе наблюдалось значимо большее время ответа в невербальном варианте задачи «2 шага назад» по сравнению с вербальным. В-третьих, как уже указывалось выше, большая точность при увеличении загрузки РП в задаче «N шагов назад» достигалась за счет увеличения времени ответа только у пожилых участников и только в вербальных задачах, что указывает на успешное использование ими компенсаторных стратегий на вербальном, но не невербальном материале.

ВЫВОДЫ

Время ответа было больше у пожилых участников, чем у молодых, во всех предложенных задачах. Точность ответов снижалась только в задаче на обновление рабочей памяти («2 шага назад»), но не в задачах, требующих удержания материала в рабочей памяти. Снижение точности ответов наблюдалось и в вербальном, и в невербальном варианте задачи «2 шага назад». Наблюдались отдельные свидетельства в пользу того, что невербальная рабочая память может ухудшаться с возрастом в большей степени, чем вербальная. В связи с тщательным отбором в группу здорового старения участников, не только не демонстрирующих когнитивного снижения, но и не имеющих истории сердечно-сосудистых событий и онкологических заболеваний, оказывающих существенное влияние на ЦНС, полученные результаты могут рассматриваться именно как возрастные изменения, а не следствие перенесенных заболеваний.

REFERENCES

- Aurtenetxe, S., García-Pacios, J., del Rio, D., López, M.E., Pineda-Pardo, J.A., Marcos, A., Delgado Losada, M.L., López-Frutos, J.M., Maestú, F. (2016). Interference impacts working memory in mild cognitive impairment. *Frontiers in Neuroscience*, 10, 443. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00443>
- Baddeley, A., Hitch, G., Allen, R. (2020). A multicomponent model of working memory. In: R.H. Logie, V. Camos, N. Cowan, (eds.). *Working memory: State of the science*. (pp. 10–43). Oxford: Oxford University Press.
- Bao, R., Chang, S., Liu, R., Wang, Y., Guan, Y. (2025). Research status of visuospatial dysfunction and spatial navigation. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 17, 1609620. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2025.1609620>

- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Camino-Pontes, B., Gonzalez-Lopez, F., Santamaria-Gomez, G., Sutil-Jimenez, A.J., Sastre-Barrios, C., Sastre-Barrios, C., Fernandez de Pierola, I., Cortes, J.M. (2023). One-year prediction of cognitive decline following cognitive-stimulation from real-world data. *Journal of Neuropsychology*, 17(2), 302–318. <https://doi.org/10.1111/jnp.12307>
- Cerella, J., DiCara, R., Williams, D., Bowles, N. (1986). Relations between information processing and intelligence in elderly adults. *Intelligence*, 10(1), 75–91. [https://doi.org/10.1016/0160-2896\(86\)90028-0](https://doi.org/10.1016/0160-2896(86)90028-0)
- Cohen, R.A., Marsiske, M.M., Smith, G.E. (2019). Neuropsychology of aging. *Handbook of Clinical Neurology*, 167, 149–180. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804766-8.00010-8>
- Cowan, N., Morey, C.C., Naveh-Benjamin, M. (2020). An embedded-processes approach to working memory: How is it distinct from other approaches, and to what ends? In: R.H. Logie, V. Camos, N. Cowan, (eds.). *Working memory: State of the science*. (pp. 44–84). Oxford: Oxford University Press.
- Cramer, S.C., Richards, L.G., Bernhardt, J., Duncan, P. (2023). Cognitive deficits after stroke. *Stroke*, 54(1), 5–9. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.122.041775>
- Hale, S., Rose, N.S., Myerson, J., Strube, M.J., Sommers, M., Tye-Murray, N., Spehar, B. (2011). The structure of working memory abilities across the adult life span. *Psychology and Aging*, 26(1), 92–110. <https://doi.org/10.1037/a0021483>
- Hardwick, R.M., Forrence, A.D., Costello, M.G., Zackowski, K., Haith, A.M. (2022). Age-related increases in reaction time result from slower preparation, not delayed initiation. *Journal of Neurophysiology*, 128(3), 582–592. <https://doi.org/10.1152/jn.00072.2022>
- Hardy, S.J., Krull, K.R., Wefel, J.S., Janelins, M. (2018). Cognitive changes in cancer survivors. *American Society of Clinical Oncology Educational Book*, 38, 795–806. https://doi.org/10.1200/EDBK_201179
- Hidalgo-Lopez, E., Noachtar, I., Pletzer, B.A. (2025). N-back task revisited: Comparing the neural correlates of updating and interference control. *Imaging Neuroscience*, (3). <https://doi.org/10.1162/IMAG.a.1025>
- Hothorn, T., Bretz, F., Westfall, P. (2008). Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical Journal*, 50(3), 346–363. <https://doi.org/10.1002/bimj.200810425>
- Johansen, M.C., Ye, W., Gross, A., Gottesman, R.F., Han, D., Whitney, R., Briceño, E.M. et al. (2023). Association between acute myocardial infarction and cognition. *JAMA Neurology*, 80(7), 723–731. <https://doi.org/10.1001/jamaneurol.2023.1331>
- Johnson, W., Logie, R.H., Brockmole, J.R. (2010). Working memory tasks differ in factor structure across age cohorts: Implications for dedifferentiation. *Intelligence*, 38(5), 513–528. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2010.06.005>
- Kirchner, W.K. (1958). Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *Journal of Experimental Psychology*, 55(4), 352–358. <https://doi.org/10.1037/h0043688>
- Kirova, A.M., Bays, R.B., Lagalwar, S. (2015). Working memory and executive function decline across normal aging, mild cognitive impairment, and Alzheimer's disease. *BioMed Research International*, 2015(6), 1–9. <https://doi.org/10.1155/2015/748212>
- Korolkova, O.A., Smirnova, A.V., Panikratova, Y.R., Pchelintseva, M.E., Mening, S.M. et al. (in press). Comparable tasks to study brain correlates of verbal and nonverbal working memory via fMRI and MEG. *Herald of the Russian Academy of Sciences*.
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P.B., Christensen, R.H.B. (2017). lmerTest package: Tests in linear mixed effects models. *Journal of Statistical Software*, 82(13), 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>
- Lange, M., Joly, F., Vardy, J., Ahles, T., Dubois, M., Tron, L., Winocur, G., De Ruiter, M.B., Castel, H. (2019). Cancer-related cognitive impairment: an update on state of the art, detection, and management strategies in cancer survivors. *Annals of Oncology*, 30(12), 1925–1940. <https://doi.org/10.1093/annonc/mdz410>
- Li, G., Chen, Y., Le, T.M., Wang, W., Tang, X., Li, C.-S.R. (2021). Neural correlates of individual variation in two-back working memory and the relationship with fluid intelligence. *Scientific Reports*, 11, 9980. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89433-8>
- Logie, R.H., Belleter, C., Doherty, J.M. (2020). Integrating theories of working memory. In: R.H. Logie, V. Camos, N. Cowan, (eds.). *Working Memory: State of the science*. (pp. 389–430). Oxford: Oxford University Press.
- Lugtmeijer, S., Lammers, N.A., de Haan, E.H.F., de Leeuw, F.E., Kessels, R.P.C. (2021). Post-stroke working memory dysfunction: A meta-analysis and systematic review. *Neuropsychology Review*, 31(4), 202–219. <https://doi.org/10.1007/s11065-020-09462-4>
- Ma, W.J., Husain, M., Bays, P.M. (2014). Changing concepts of working memory. *Nature Neuroscience*, 17, 347–356. <https://doi.org/10.1038/nn.3655>
- Nasreddine, Z.S., Phillips, N.A., Bedirian, V., Charbonneau, S., Whitehead, V., Collin, I., Cummings, J.L., Chertkow, H. (2005). The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: a brief screening tool for mild cognitive impairment. *Journal of the American Geriatrics Society*, 53(4), 695–699. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2005.53221.x>
- Naveh-Benjamin, M., Cowan, N. (2023). The roles of attention, executive function and knowledge in cognitive ageing of working memory. *Nature Reviews Psychology*, 2, 151–165. <https://doi.org/10.1038/s44159-023-00149-0>
- Oldfield, R.C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Owen, A.M., McMillan, K.M., Laird, A.R., Bullmore, E. (2005). N-back working memory paradigm: A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human Brain Mapping*, 25, 46–59. <https://doi.org/10.1002/hbm.20131>
- 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, 195–203. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-01193-y>
- Pillai, J.A., Bonner-Jackson, A., Walker, E., Mourany, L., Cummings, J.L. (2014). Higher working memory predicts slower functional decline in autopsy-confirmed Alzheimer's disease. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 38(3–4), 224–233. <https://doi.org/10.1159/000362715>
- Posner, M.I., Boies, S.J., Eichelman, W.H., Taylor, R.L. (1969). Retention of visual and name codes of single letters. *Journal of Experimental Psychology*, 79(1), 1–16. <https://doi.org/10.1037/h0026947>
- Raimo, S., Maggi, G., Ilardi, C.R., Cavallo, N.D., Torchia, V., Pilgrom, M.A., Cropano, M., Roldán-Tapia, M.D., Santangelo, G. (2024). The relation between cognitive functioning and activities of daily living in normal aging, mild cognitive impairment, and dementia: A meta-analysis. *Neurological Science*, 45(6), 2427–2443. <https://doi.org/10.1007/s10072-024-07366-2>

- Reuter-Lorenz, P.A., Sylvester, C.-Y.C. (2005). The cognitive neuroscience of working memory and aging. In: R. Cabeza, L. Nyberg, D. Park, (eds.). *Cognitive Neuroscience of Aging: Linking Cognitive and Cerebral Aging*. (pp. 186–217). Oxford: Oxford University Press.
- Sabahi, Z., Farhoudi, M., Naseri, A., Talebi, M. (2022). Working memory assessment using cambridge neuropsychological test automated battery can help in the diagnosis of mild cognitive impairment: A systematic review and meta-analysis. *Dementia and Neuropsychologia*, 16(4), 444–456. <https://doi.org/10.1590/1980-5764-dn-2022-0006>
- Stemberg, S. (1966). High-speed scanning in human memory. *Science*, 153(3736), 652–654. <https://doi.org/10.1126/science.153.3736.652>
- Tang, E.Y., Amiesimaka, O., Harrison, S.L., Green, E., Price, C., Robinson, L., Siervo, M., Stephan, B.C. (2018). Longitudinal effect of stroke on cognition: A systematic review. *Journal of the American Heart Association*, 7(2). <https://doi.org/10.1161/JAHA.117.006443>
- Vidal, C., Content, A., Chetail, F. (2017). BACS: The Brussels Artificial Character Sets for studies in cognitive psychology and neuroscience. *Behavior Research Methods*, 49(6), 2093–2112. <https://doi.org/10.3758/s13428-016-0844-8>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / ABOUT THE AUTHORS



**Яна Романовна
Паникратова**

Yana R. Panikratova

Кандидат психологических наук, старший научный сотрудник Московского центра непрерывного математического образования; старший научный сотрудник лаборатории нейровизуализации и мультимодального анализа Института биологической психиатрии Научного центра психического здоровья, Москва, Российская Федерация, panikratova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5698-4251>

Cand. Sci. (Psychol.), Senior Researcher, Moscow Center for Continuous Mathematical Education; Senior Researcher at the Laboratory of Neuroimaging and Multimodal Analysis, Institute of Biological Psychiatry, Mental Health Research Center, Moscow, Russian Federation, panikratova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5698-4251>



**Ольга Александровна
Королькова**

Olga A. Korolkova

Кандидат психологических наук, старший научный сотрудник Московского центра непрерывного математического образования; ведущий научный сотрудник Института экспериментальной психологии Московского государственного психолого-педагогического университета, Москва, Российская Федерация, olga.kurakova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4814-7266>

Cand. Sci. (Psychol.), Senior Researcher, Moscow Center for Continuous Mathematical Education; Leading Researcher, Institute for Experimental Psychology, Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russian Federation, olga.kurakova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4814-7266>



**Мария Евгеньевна
Пчелинцева**

Mariia E. Pchelintseva

Научный сотрудник Московского центра непрерывного математического образования; стажер-исследователь научно-учебной лаборатории когнитивных исследований департамента психологии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва, Российская Федерация, mepchelintseva@edu.hse.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1347-1404>

Researcher, Moscow Center for Continuous Mathematical Education; Research Assistant at the Laboratory for Cognitive Research, School of Psychology, HSE University, Moscow, Russian Federation, mepchelintseva@edu.hse.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1347-1404>



**Анна Владимировна
Смирнова**

Anna V. Smirnova

Научный сотрудник Московского центра непрерывного математического образования, Москва, Российская Федерация, smir0220@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7673-0696>

Researcher, Moscow Center for Continuous Mathematical Education, Moscow, Russian Federation, smir0220@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7673-0696>



**Семен Михайлович
Менинг**

Semyon M. Mening

Научный сотрудник Московского центра непрерывного математического образования; стажер-исследователь научно-учебной лаборатории когнитивных исследований департамента психологии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва, Российская Федерация, simening@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-1740-4932>

Researcher, Moscow Center for Continuous Mathematical Education; Research Assistant at the Laboratory for Cognitive Research, School of Psychology, HSE University, Moscow, Russian Federation, simening@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-1740-4932>



**Валентин Евгеньевич
Синицын**

Valentin E. Sinitsyn

Доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник Московского центра непрерывного математического образования; заведующий отделом лучевой диагностики Медицинского научно-образовательного института Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация, vsini@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>

Dr. Sci. (Med.), Professor, Leading Researcher, Moscow Center for Continuous Mathematical Education; Head of the Radiology Department, University Clinic, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, vsini@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>



**Екатерина Васильевна
Печенкова**

Ekaterina V. Pechenkova

Кандидат психологических наук, старший научный сотрудник Московского центра непрерывного математического образования; заведующая научно-учебной лабораторией когнитивных исследований департамента психологии факультета социальных наук Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва, Российская Федерация, evp@virtualcoglab.org, <https://orcid.org/0000-0003-3409-3703>

Cand. Sci. (Psychol.), Senior Researcher, Moscow Center for Continuous Mathematical Education; Head of the Laboratory for Cognitive Research, School of Psychology, Faculty of Social Sciences, HSE University, Moscow, Russian Federation, evp@virtualcoglab.org, <https://orcid.org/0000-0003-3409-3703>

Поступила 20.11.2025. Получена после доработки
08.12.2025. Принята в печать 11.02.2026.

Received 20.11.2025. Revised
08.12.2025. Accepted 11.02.2026.