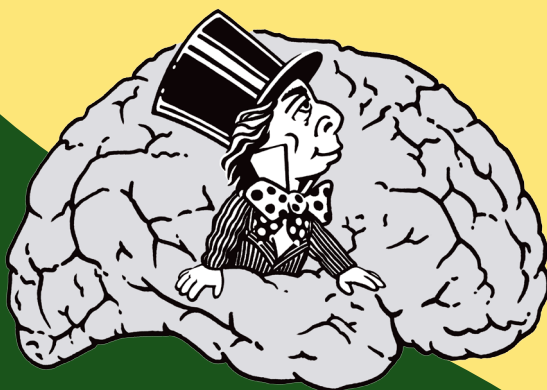


# КОГНИТИВНАЯ НАУКА

В МОСКВЕ



НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

МАТЕРИАЛЫ  
КОНФЕРЕНЦИИ  
2023

Под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман, А.Я. Койфман

УДК 159.9  
ББК 88.25  
К57

Когнитивная наука в Москве: новые исследования. Материалы конференции 21 – 22 июня 2023 г. Под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман, А.Я. Койфман. – М.: ООО «Буки Веди», Московский институт психоанализа. 2023 г. – 604 стр.

© Авторы статей, 2023

ISBN 978-5-4465-3880-5

УДК 159.9  
ББК 88.25

ISBN 978-5-4465-3880-5

© Авторы статей, 2023

## ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ РАЗЛИЧИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ В ГОЛОВНОМ МОЗГЕ, СООТНОСЯЩИЕСЯ С ОБЪЕМОМ РАБОЧЕЙ ПАМЯТИ ПРИ ЧТЕНИИ

Е. В. Печенкова\* (5, 1), Я. Р. Паникратова (2, 5), М. А. Фомина (5, 3),  
Е. А. Мершина (3), Д. А. Баженова (3), Л. А. Маковская (5), А. Д. Румшиская (4),  
О. В. Федорова (3), И. С. Лебедева (2), В. Е. Сеницын (5, 3)

[evp@virtualcoglab.org](mailto:evp@virtualcoglab.org)

1 – НИУ ВШЭ, Москва; 2 – НЦПЗ, Москва; 3 – МГУ им. М. В. Ломоносова,  
Москва; 4 – ГКБ № 23 им.И. В. Давыдовского, Москва; 5 – Московский центр  
непрерывного математического образования, Москва

**Аннотация.** Тесты вербальной рабочей памяти, которые используются в исследованиях ее функциональной нейроанатомии, обычно в большей степени затрагивают аспект кратковременной памяти, чем обработки материала. Однако в психолингвистике отдается предпочтение методикам, которые позволяют выявить индивидуальные различия по способности распределять ресурсы рабочей памяти между хранением и обработкой материала; такие тесты (complex spans) лучше предсказывают реальные языковые способности людей. Мы использовали психолингвистический тест Данеман – Карпентер (reading span; Daneman, Carpenter, 1980) для поиска особенностей функциональных связей головного мозга, соответствующих индивидуальным различиям в вербальной рабочей памяти человека при чтении. Функциональные связи регистрировались в покое с помощью фМРТ. По всему мозгу был подсчитан показатель ICC (intrinsic connectivity contrast), оценивающий корреляцию BOLD-сигнала между каждым элементом объема (вокселем) и всем остальным мозгом. Обнаружилось, что уменьшение объема рабочей памяти по тесту Данеман – Карпентер сопровождается усилением функциональных связей билатеральной области в медиальной орбитофронтальной коре. Дальнейший анализ, в котором эта область использовалась в качестве зоны интереса (seed), показал, что усиливаются главным образом функциональные связи между орбитофронтальной корой и областью в средней и нижней височных извилинах правого полушария. Обнаруженные различия могут свидетельствовать о различиях в функциональных системах, обеспечивающих эффективное выполнение когнитивной задачи у людей с различным объемом вербальной рабочей памяти, в частности, о рекрутировании дополнительных ресурсов правого полушария при более низком объеме памяти.

**Ключевые слова:** вербальная рабочая память, объем рабочей памяти, семантическая память, чтение, фМРТ покоя, функциональные связи, орбитофронтальная кора

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-78-00008, <https://rscf.ru/project/23-78-00008/> «Уточнение мозговых механизмов рабочей памяти во взрослом возрасте и в процессе старения за счет совместного использования данных фМРТ и МЭГ».

## Введение

Рабочая память (РП) — это система кратковременного хранения и обработки ограниченного объема информации, необходимой для текущей умственной активности. РП реализует и когнитивные, и регуляторные функции и служит одним из важнейших предикторов интеллектуальных возможностей индивида, в том числе обучаемости. В силу этого детальное описание мозговых механизмов вербальной и невербальной РП является одной из важнейших задач когнитивной нейронауки.

Одной из методических проблем, стоящих на пути решения этой задачи, является многообразие психодиагностических методик, используемых для измерения свойств РП в различных исследованиях. Так, тесты, которые используются в исследованиях функциональной нейроанатомии вербальной РП, обычно в большей степени затрагивают аспект кратковременной памяти, чем аспект обработки материала. В то же время в психолингвистике отдается предпочтение методикам, которые позволяют выявить индивидуальные различия людей по способности распределять ресурсы рабочей памяти между хранением и обработкой материала; такие тесты (*complex spans*) лучше предсказывают реальные языковые способности. Наиболее известная методика такого рода — тест Данеман — Карпентер, позволяющий измерить объем вербальной РП в процессе чтения (*reading span*; Daneman, Carpenter, 1980).

Нейрофизиологические показатели, используемые для изучения РП, также многообразны. Один из перспективных подходов заключается в поиске корреляций между индивидуальными различиями в характеристиках РП и в активности мозга в покое, измеренной с помощью фМРТ или электрофизиологических методов. Предположительно, активность мозга в покое отражает наиболее устойчивые, внеситуативные функциональные связи, которые могут стоять за индивидуальными различиями в психических процессах.

В недавнем фМРТ-исследовании М. Осаки и коллег (Osaka et al., 2021) были рассмотрены функциональные связи (ФС) в покое между сетью работы мозга по умолчанию (*default mode network* — DMN) и несколькими сетями, ассоциирующимися с умственной активностью. У людей с большим объемом вербальной РП (согласно тесту Данеман — Карпентер) была обнаружена тенденция к более интенсивной связи между медиальной префронтальной корой (DMN) и правой заднетеменной корой (*fronto-parietal control network*, FPCN), а также к менее интенсивным ФС между множеством зон лобной, височной и теменной коры. В то же время анализ ФС по зонам интереса обладает одним существенным недостатком: области, представляющие реальный интерес, могут быть пропущены, если исследователи исходно не выдвигают в их отношении никаких гипотез.

Поэтому мы предприняли поиск особенностей ФС головного мозга, соответствующих индивидуальным различиям по объему вербальной РП человека при чтении, с помощью другого подхода, ведомого данными и свободным от гипотез. Для этого по всему мозгу был подсчитан показатель ICC (*intrinsic connectivity contrast*), оценивающий корреляцию BOLD-сигнала между каждым элементом объема (вокселем) и всем остальным мозгом. Затем был проведен поиск зон мозга, в которых ICC коррелирует с измеренным по тесту Дане-

ман —Карпендер объемом РП. На последнем этапе мы проверили, формируются ли эти корреляции за счет диффузной ФС с разными отделами мозга или же имеются компактно локализованные зоны мозга, ФС которых вносят вклад в корреляцию между ИСС и объемом вербальной РП.

## Методика

В исследовании приняли участие 92 человека, праворукие, неврологически здоровые добровольцы, носители русского языка; после исключения данных, содержащих артефакты МРТ (12), и данных участника, неверно понявшего инструкцию, итоговая выборка составила 79 человек ( $24 \pm 5$  лет, 51 женщина, средняя продолжительность образования  $14.9 \pm 2.5$  года). Все участники исследования прошли измерение объема вербальной РП в процессе чтения на русском языке по методике Данеман —Карпендер с применением процентного метода подсчета (Федорова и др., 2018) и функциональную МРТ поюка с закрытыми глазами (Philips Ingenia 3T, 34 среза, параллельных линии АС-РС, сторона изотропического воксела 3.1 мм, TR/TE/FA = 2000мс/35мс/90°, 300 объемов общей продолжительностью 10 минут). Во время той же сессии сканирования регистрировались T1-взвешенные анатомические изображения со стороны воксела 1 мм и карты неоднородности магнитного поля с той же разметкой срезов, что и протоколы фМРТ. МРТ-данные, использованные в настоящем исследовании, частично представлены в датасете <https://doi.org/10.18112/openneuro.ds003469.v1.0.0>, ранее подготовленном в рамках проекта РФФИ 18-00-01598 (18-00-01592).

Предварительная обработка МР-изображений проводилась в пакетах SPM12 (поправка на неодновременность регистрации срезов, применение карт неоднородности магнитного поля, коррекция движения, пространственная нормализация, сглаживание) и Conn20b (ART, aCompCor, полосовой фильтр [0.008 0.9] Гц). Статистическая обработка проводилась с помощью Conn. По каждому вокселу был рассчитан показатель ИСС, представляющий собой среднее квадратическое корреляций BOLD-сигнала между этим вокселом и всеми остальными вокселями в объеме мозга; показатели ИСС по всему объему мозга были нормализованы. С помощью общей линейной модели был проведен поиск участков, ФС которых коррелировала с объемом РП; среднее движение головы в ходе сканирования, пол, возраст и количество лет образования включались в модель в качестве ковариат. Выявленная таким образом область, которая продемонстрировала корреляцию ФС с РП, использовалась для последующего анализа в качестве зоны интереса (seed). Этот анализ позволил проверить, имеются ли локализованные (недиффузные) области, вносящие вклад в обнаруженную корреляцию. Для этого использовалась аналогичная общая линейная модель, в которой в качестве мер ФС выступали корреляции BOLD-сигнала между зоной интереса и каждым вокселом по всему остальному объему мозга (seed-based connectivity). В качестве статистически значимых рассматривались результаты с порогом  $p_{\text{uncorr}} < .005$  на уровне воксела и  $p_{\text{FDR}} < .05$  на уровне кластера (по параметрическим критериям на основе теории случайных полей).

## Результаты

Средний показатель объема рабочей памяти составил  $45(\pm 15)\%$ . Поиск на основе нормализованного показателя ICC выявил зону в медиальной лобной/орбитофронтальной коре обоих полушарий, ФС которой отрицательно коррелировали с объемом РП в процессе чтения. Использование выявленной области в качестве зоны интереса для дальнейшего поиска ФС (seed-based connectivity analysis) показало, что имеется локализованная область в правой височной доле (преимущественно в средней трети средней височной и нижней височной извилин), ФС которой с медиальной лобной корой вносит вклад в обнаруженный эффект: чем меньше объем вербальной РП, тем выше ФС между зонами в лобной коре и правой височной доле. Обнаруженные области представлены на рис. 1 и в табл. 1.

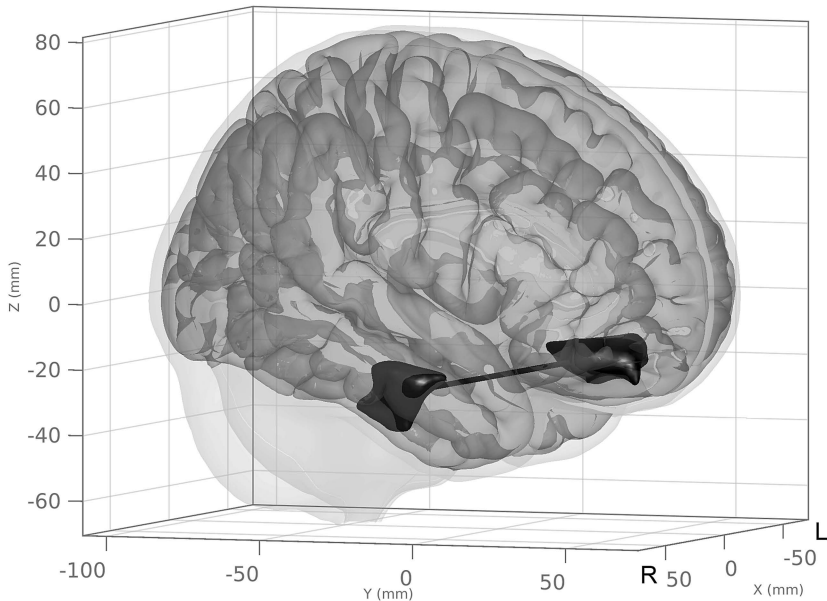
## Обсуждение и выводы

Проведенное фМРТ-исследование позволило обнаружить нейрофизиологические корреляты объема вербальной РП в виде ФС за пределами стандартных широкомасштабных сетей покоя. При уменьшении объема РП усиливаются ФС между областями в медиальной лобной/орбитофронтальной коре и в средней и нижней височных извилинах правого полушария. В литературе ранее уже отмечалось, что для людей с большим объемом вербальной РП может быть характерно ослабление ФС между различными отделами мозга (del Rio et al., 2012; Osaka et al., 2021). Обнаруженные различия могут свидетельствовать о различиях в функциональных системах, обеспечивающих эффективное выполнение когнитивной задачи у людей с различным объемом вербальной РП. Функции обеих выявленных в нашем исследовании областей связывают с долговременной памятью: хранением (височные области) и извлечением материала (вентромедиальная префронтальная и орбитофронтальная кора; Hebscher et al., 2016). Таким образом, полученные результаты, по-видимому, демонстрируют более активное обращение к семантической памяти у людей с меньшим объемом вербальной РП. Дальнейшие исследования с применением структурных и функциональных методов нейровизуализации помогут проверить эту гипотезу.

**Таблица 1.** Характеристики кластеров, функциональные связи между которыми отрицательно коррелируют с объемом вербальной РП при чтении

Анатомическая локализация	Центр масс	Объем, мм <sup>3</sup>	$p_{\text{uncorr}}$	$p_{\text{FDR}}$	Метод анализа
Медиальная лобная кора, подмозолистая извилина, орбитофронтальная кора	0+34 –20	10 160	<.000001	.000006	ICC
Нижняя височная извилина, задняя часть (R), средняя височная извилина (R)	+54 –14 –22	6 736	.000153	.006583	SBC

Примечание.  $p_{\text{uncorr}}$  — значение для статистики размера кластера без поправки на множественные сравнения;  $p_{\text{FDR}}$  — скорректированное методом FDR; центр масс — приведены координаты x, y, z в пространстве MNI; анатомическая локализация приведена на основе Harvard-Oxford Cortical Atlas



**Рисунок 1.** Визуализация зон в медиальной лобной/орбитофронтальной коре и в коре правой височной доли, ФС между которыми обратно коррелирует с объемом вербальной РП при чтении. Представлены координатные оси пространства MNI

## Литература

Федорова О.В., Ципенко А.А., Потанина Ю.Д. Психолингвистическое исследование особенностей рабочей памяти русскоязычных детей 12 лет // Социо-и психолингвистические исследования. 2018. № 6. С. 7 – 16.

Daneman M., Carpenter P.A. Individual differences in working memory and reading // Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior. 1980. Vol. 19. No. 4. P. 450 – 466. [https://doi.org/10.1016/s0022-5371\(80\)90312-6](https://doi.org/10.1016/s0022-5371(80)90312-6)

del Río D., Cuesta P., Bajo R., García-Pacios J., López-Higes R., Del-Pozo F., Maestú F. Efficiency at rest: Magnetoencephalographic resting-state connectivity and individual differences in verbal working memory // International Journal of Psychophysiology. 2012. Vol. 86. No. 2. P. 160 – 167. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.08.011>

Hebscher M., Barkan-Abramski M., Goldsmith M., Aharon-Peretz J., Gilboa A. Memory, decision-making, and the ventromedial prefrontal cortex (vmPFC): the roles of subcallosal and posterior orbitofrontal cortices in monitoring and control processes // Cerebral Cortex. 2016. Vol. 26. No. 12. P. 4590 – 4601. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv220>

Osaka M., Kaneda M., Azuma M., Yaoi K., Shimokawa T., Osaka N. Capacity differences in working memory based on resting state brain networks // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. No. 1. P. 19502. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98848-2>

## INDIVIDUAL DIFFERENCES IN BRAIN FUNCTIONAL CONNECTIVITY ASSOCIATED WITH READING SPAN

E. V. Pechenkova\* (5, 1), Ya. R. Panikratova (5, 2), M. A. Fomina (5, 3),  
E. A. Merzhina (3), D. A. Bazhenova (3), L. A. Makovskaya (5),  
A. D. Rumshiskaya (4), O. V. Fedorova (3), I. S. Lebedeva (2), V. E. Sinitsyn (5, 3)  
[evp@virtualcoglab.org](mailto:evp@virtualcoglab.org)

1 – HSE University, Moscow;

2 – Mental Health Research Center, Moscow;

3 – Lomonosov Moscow State University, Moscow;

4 – Davidovskiy City Hospital, Moscow;

5 – Moscow Center for Continuous Mathematical Education, Moscow

**Abstract.** Verbal working memory tests used in studies of its functional neuroanatomy typically load short-term memory more than information processing. However, psycholinguistic tests usually address individual differences in the allocation of working memory resources between information storage and processing; these tests (called complex spans) better predict real-life language skills. We used the Daneman and Carpenter (1980) reading span test to identify brain functional connectivity features that correspond to individual differences in verbal working memory capacity. Functional connectivity was evaluated with resting-state fMRI. An intrinsic connectivity contrast (ICC) was calculated, reflecting the measure of BOLD signal correlation between each voxel and the rest of the brain. Lower reading span was associated with higher functional connectivity of a bilateral region in the medial frontal/orbitofrontal cortex. Further seed-based connectivity analysis based on this region as a seed demonstrated that the results were driven by higher functional connectivity between the orbitofrontal cortex and a region in the right middle and inferior temporal gyri. The differences may indicate diverse functional systems that enable individuals with varying verbal working memory spans to perform the cognitive task effectively, particularly the recruitment of additional right hemispheric resources in individuals with lower working memory spans.

**Keywords:** verbal working memory, reading span, semantic memory, reading, resting-state fMRI, functional connectivity, orbitofrontal cortex

Research supported by Russian Science Foundation Grant #23-78-00008, <https://rscf.ru/project/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”.