

© 2026. Миронец С. А.



Роль саккадической системы



обзорная статья

eLibrary EDN: YXHNCF

## Роль саккадической системы в зрительно-пространственной рабочей памяти и зрительном внимании

Миронец Софья Анатольевна

Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева, Россия, Москва

Российская академия образования, Россия, Москва

eLibrary Author SPIN: 3270-9246

<https://orcid.org/0000-0002-9763-109X>

Scopus Author ID: 57446526800

[sofia.mironets@dgoi.ru](mailto:sofia.mironets@dgoi.ru)

**Аннотация:** Рабочая память представляет собой механизм, поддерживающий релевантную информацию в активном, легкодоступном состоянии для ее последующего мысленного анализа и использования в управлении поведением. Мозжечок долгое время было принято считать только двигательным центром, и его роль в участии когнитивных процессов начали изучать не так давно. В литературе не описаны сложные взаимосвязи между теоретическим конструктом рабочей памяти, функционированием зрительного внимания и анатомией саккадической системы, которая их реализует, и местом мозжечка в этих процессах. Цель аналитического обзора – рассмотреть роль саккадической системы и отдельно мозжечка в нейрофизиологическом обеспечении зрительного внимания и зрительно-пространственной рабочей памяти с особым вкладом анатомических путей при реализации сложных сенсомоторных процессов за счет движений глаз. Для этого были подробно проанализированы нейровизуализационные, нейроанатомические, морфофункциональные и поведенческие исследования. В результате представлен обзор современного состояния проблемы зрительного внимания, рабочей памяти и участия мозжечка в этих процессах: переключение внимания предшествует саккадам, фронтальные глазодвигательные поля и теменная кора поддерживают пространственные представления, а стволовые генераторы реализуют фазические и тонические сигналы к глазодвигательным мышцам.

**Ключевые слова:** зрительно-пространственная рабочая память, внимание, саккадическая система, мозжечок

**Цитирование:** Миронец С. А. Роль саккадической системы в зрительно-пространственной рабочей памяти и зрительном внимании. *СибСкрипт*. 2026. Т. 28. № 2. С. 217–231. <https://doi.org/10.21603/sibscript-2026-28-2-217-231>

Поступила в редакцию 30.01.2026. Принята после рецензирования 27.03.2026. Принята в печать 30.03.2026.

review article

## Saccadic System in Visuo-Spatial Working Memory and Visual Attention

Sofia A. Mironets

Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology, and Immunology, Russia, Moscow

Russian Academy of Education, Russia, Moscow

eLibrary Author SPIN: 3270-9246

<https://orcid.org/0000-0002-9763-109X>

Scopus Author ID: 57446526800

[sofia.mironets@dgoi.ru](mailto:sofia.mironets@dgoi.ru)

**Abstract:** Working memory is a mechanism that maintains relevant information in an active, easily accessible state for mental analysis and behavioral control. While the cerebellum was long considered solely a motor center, its role in cognitive processes has only recently gained significant attention. There has been a lack of comprehensive

research into the complex relationships between the theoretical construct of working memory, the functioning of visual attention, the anatomy of the saccadic system, and the specific role of the cerebellum in these processes. This analytical review examines neuroimaging, neuroanatomical, morphofunctional, and behavioral studies on the role of the saccadic system and the cerebellum in the neurophysiological support of visual attention and visuo-spatial working memory. The focus is on the anatomical pathways implementing complex sensorimotor processes through eye movements. Visual attention, working memory, and the cerebellum correlate as follows: attentional shifts precede saccades; the frontal eye fields and parietal cortex support spatial representations; brainstem generators provide phasic and tonic signals to the oculomotor muscles.

**Keywords:** visuospatial working memory, attention, saccadic system, cerebellum

**Citation:** Mironets S. A. Saccadic System in Visuo-Spatial Working Memory and Visual Attention. *SibScript*, 2026, 28(2): 217–231. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/sibscript-2026-28-2-217-231>

Received 30 Jan 2026. Accepted after peer review 27 Mar 2026. Accepted for publication 30 Mar 2026.

## Введение

Когнитивная область представляет собой интегрированную систему психических процессов, которые способствуют восприятию, хранению, обработке и использованию информации из внешней среды. Зрительное внимание и рабочая память являются ключевыми компонентами этой системы, и их взаимодействие имеет решающее значение для целенаправленного поведения [Fu et al. 2023; Yeung et al. 2021; Yüce 2025]. Зрительное внимание осуществляет первоначальный сенсорный отбор и предварительный анализ зрительных стимулов. Рабочая память сохраняет и обрабатывает соответствующую информацию, необходимую для выполнения текущих задач и контроля поведения. Эти процессы функционально взаимосвязаны: рабочая память направляет зрительный поиск, в то время как зрительное внимание активирует соответствующие представления в рабочей памяти в ответ на изменения окружающей среды.

Рабочая память представляет собой механизм, поддерживающий релевантную информацию в активном, легкодоступном состоянии для ее последующего мысленного анализа и использования в управлении поведением. Это способность человека удерживать и использовать информацию для решения текущих задач в присутствии отвлекающих факторов. Емкость рабочей памяти ограничена и отличается у разных людей, в том числе здоровых взрослых. С возрастом емкость повышается у детей и снижается у пожилых людей [Kirchner 1958]. У лиц с повреждениями нервной системы емкость рабочей памяти также может быть ниже, для чего разрабатываются различные реабилитационные тренинги и методы [Li et al. 2023; Wang et al. 2023].

Этот механизм имеет фундаментальное значение для всей познавательной и исполнительской деятельности человека и играет особую роль в обучении и формировании поведенческих навыков у детей [Тихомирова 2025; Allen et al. 2019; Atkinson, Martin 2022; Živković et al. 2023].

Согласно классической модели А. Д. Бэддели и Г. Хитча, рабочая память характеризуется не только активным характером обработки информации, но и своей структурой, состоящий из трех подсистем [Baddeley, Hitch 1974]: вербальная рабочая память (или фонологическая петля), зрительная рабочая память и центральный управляющий блок [Barak, Tsodyks 2014; Miller et al. 2018]. Некоторые исследования в качестве главных параметров отличий рабочей памяти, которые влияют на ее производительность, определяют емкость рабочей памяти, контроль внимания и долговременную память [Unsworth, Engle 2007]. Кроме того, в решении сложных задач играют роль процессы интеграции, координации и связывания элементов. Минимум три компонента входят в рабочую память: (1) механизмы когнитивного контроля, которыми управляет префронтальная кора и другие структуры мозга; (2) несколько представлений в зоне внимания, которые поддерживает фронтально-париетальная сеть; (3) механизм извлечения, который помогает быстро извлекать информацию из долговременной памяти. Также с манипуляцией и обменом информацией в мозге связаны процессы, которые ассоциируют с контролем потоков информации, т.е. управляющие функции [Miyake, Friedman 2012]. Вербальная и зрительная рабочая память представляют собой относительно автономные хранилища информации,

обладающие прочными внутренними связями, в то время как их взаимосвязь друг с другом, с долговременной памятью и с процессами внимания является менее выраженной [Уточкин и др. 2016].

Саккадические движения глаз выступают ключевым сенсомоторным механизмом, обеспечивающим реализацию зрительного внимания, которое неразрывно связано с общей психической деятельностью человека. Нарушения в работе различных звеньев зрительно-глазодвигательной системы приводят к дефицитам психических функций, базирующихся на деятельности зрительного анализатора. В то же время характеристики саккадических движений глаз служат индикаторами функционального состояния мозговых структур, участвующих в процессах восприятия и внимания.

Данные клинических и нейрофизиологических исследований указывают на тесную связь процессов внимания и глазодвигательной активности, на анатомическое и функциональное перекрытие структур, обеспечивающих их регуляцию на всех уровнях головного мозга [Gabay et al. 2022; Karthikeyan et al. 2024].

Перед обработкой зрительной информации она удерживается в виде зрительно-пространственных образов в последовательности буферных хранилищ, последним из которых является буфер зрительной рабочей памяти [Skrzypulec, Chuderski 2020].

Научные исследования показывают, что когнитивные и двигательные функции имеют общую нейробиологическую основу. За их реализацию отвечают одни и те же структуры головного мозга, в частности мозжечок и дорсолатеральная префронтальная кора [Diamond 2000]. Эти области, вместе с базальными ганглиями, участвуют не только в координации движений конечностей, но и в контроле движений глаз. У дошкольников успешность выполнения двигательных заданий тесно связана со способностью решать зрительно-пространственные задачи [Фаликман 2009]. Примечательно, что глазодвигательные реакции выполняют двоякую функцию: они обеспечивают последующую обработку зрительных стимулов и одновременно направляют произвольное внимание на наиболее значимые объекты [Walcher et al. 2024].

Проблема заключается в особой значимости зрительного внимания и зрительно-пространственной рабочей памяти для обучения и в поиске нейрофизиологических механизмов этих когнитивных процессов. Цель аналитического обзора – рассмотреть

роль саккадической системы и отдельно мозжечка в нейрофизиологическом обеспечении зрительного внимания и зрительно-пространственной рабочей памяти с особым вкладом анатомических путей при реализации сложных сенсомоторных процессов за счет движений глаз.

## Результаты

### Зрительная рабочая память и мозжечок

В большинстве зарубежных исследований именно рабочая память вносит вклад в школьную успешность [Персиянцева и др. 2024; Ding et al. 2023; Dubuc et al. 2020; Wu et al. 2017]. Самое важное свойство рабочей памяти состоит в том, что она является предиктором как в чтении и математике [Altemeier et al. 2008; St Clair-Thompson, Gathercole 2006], так и в целом в школьной успеваемости [Brocki, Bohlin 2004; Monette et al. 2011; Nayfeld et al. 2013].

Примерно в 12 лет происходит скачок в развитии словесной рабочей памяти и целенаправленного поведения [Anderson et al. 2001; Deviatierikova et al. 2024].

Нейронная основа рабочей памяти, вероятно, зависит от характера решаемой задачи, отражая требования, характерные для типа информации, которую необходимо обработать, и потенциально указывая на высокие требования к конфигурации и реконфигурации сетей, отвечающих за текущую задачу; например, задачи на вербальную рабочую память обычно активируют зону Брока [Baddeley 2000; Sadus et al. 2026].

Исследования нейровизуализации показали важную роль мозжечка в процессах запоминания, включая как рабочую память, так и эпизодическую [Jaffe, Constantinidis 2021; Stein 2021]. Активация мозжечка была обнаружена во время выполнения заданий как на вербальную, так и на невербальную рабочую память [Hautzel et al. 2009]. Задняя часть мозжечка (двусторонние дольки VI и голень I) и правая доля VIIIА, по-видимому, обычно задействованы при выполнении задач рабочей памяти [Stoodley, Schmahmann 2009]. Вклад мозжечка в различные аспекты вербальной рабочей памяти (кодирование, поддержание и извлечение информации) был исследован с использованием классической задачи Штернберга на запоминание [Chen, Desmond 2005]. В частности, лобно-мозжечковая петля, включающая область Брока и доли VI правого полушария мозжечка, была активна во время кодирования, а теменно-мозжечковая петля, включающая левую

нижнюю теменную область и правые доли мозжечка (VIIIB и VIIIA), была активна как во время кодирования, так и при переходе в хранение информации [Clark et al. 2021; Tan et al. 2025; Vandervert 2009]. Задняя часть червеобразного отростка была активирована на этапах извлечения [Fastenrath et al. 2022; Thommesen et al. 2024].

Результаты как функциональных, так и структурных нейровизуализационных исследований на выборках и здоровых взрослых участников, и людей с поражениями головного мозга дают достаточно доказательств того, что мозжечок играет важную роль в когнитивных функциях. В частности, было обнаружено участие мозжечка в различных когнитивных функциях, включая внимание, пространственную обработку, рабочую память, речь, эпизодическую память, управляющие функции и обработку эмоций [Stoodley, Schmahmann 2009].

Функциональное МРТ-исследование у молодых здоровых взрослых в задаче на рабочую память фиксирует, что активируются области моторного планирования мозжечка (например, VI доля мозжечка и I колено) при отсутствии активации в первичной моторной коре мозжечка (например, IV / V доли мозжечка). Таким образом, во время работы рабочей памяти стратегически задействуются области моторного планирования и подготовки [Kakei et al. 2026; Koziol et al. 2014]. Аналогичным образом активация мозжечка наблюдалась при выполнении заданий по составлению слов [Lurito et al. 2000; Petersen et al. 1989], беглости речи [Gurd et al. 2002], оценке словарного запаса [Ojemann et al. 1998] и фонологической обработке [McDermott et al. 2003].

Вклад мозжечка в рабочую память может быть интерпретирован как контроль ожидаемых и наблюдаемых результатов (корректировка, обусловленная ошибками, и внутреннее распределение времени) [Ben-Yehudah et al. 2007] или как прогнозирование временного порядка и хронометража [Henson et al. 2000].

### Зрительное внимание и движения глаз

Обеспечивающая процессы внимания глазодвигательная деятельность включает саккады (быстрые скачкообразные движения, меняющие фокус внимания) и фиксации (удержание взгляда на объекте, отражающее устойчивую концентрацию). Эти показатели служат индикаторами двух типов когнитивных процессов [Calvo, Meseguer 2002; Mock et al. 2016].

1. Восходящие (*bottom-up*) модуляции или процессы: управляются стимулом, его характеристиками, расположением, движением и т.д. и связаны с перцепцией и непровольным вниманием (например, позиция и длительность первой фиксации).

2. Нисходящие (*top-down*) модуляции: управляются целью, заданной при просмотре, или внутренней мотивацией респондента, отражают влияние произвольного контроля, установок и мотивации, предполагая более глубокую обработку. Лобные поля посылают сигналы обратной связи в зрительные области, подготавливая их к восприятию определенных стимулов. В зависимости от поставленной задачи (например, поиск цвета или формы) нейроны фронтальных полей активируют соответствующие нейроны во вторичной зрительной коре, отвечающие за обработку этих характеристик. Фронтальные центры могут избирательно повышать чувствительность нейронов зрительной коры, ответственных за конкретную область поля зрения, куда направлен взор и внимание, помогая отсеивать нерелевантную информацию. Активность фронтальных полей тесно связана с подготовкой саккадических движений глаз, что обеспечивает согласованную работу зрительного восприятия и движений глаз [Панфилова и др. 2024; Chen, Machado 2016; Ekstrom et al. 2008; Mahon et al. 2018; Moore, Armstrong 2003]. В процессе старения нисходящая регуляция подвержена изменениям, т.к. наименее устойчива [Peltsch et al. 2011].

Кроме того, паттерны движений глаз могут указывать на вовлеченность одной из двух зрительных систем: вентральной (что?) или дорсальной (где?) [Pannasch et al. 2008; Velichkovsky et al. 2005]. Морфологически эти пути различаются [Mishkin et al. 1983]: вентральный поток (от затылочных к височным долям) обрабатывает детальную фoveальную информацию медленнее, а дорсальный поток (к теменным долям) передает сигналы быстрее, но с меньшим пространственным разрешением. Функционально вентральный поток специализируется на предметном восприятии, а дорсальный – на пространственной локализации и наведении внимания.

Одно из последних наблюдений в поведенческих исследованиях заключается в том, что пространственное внимание переключается на цель до начала движения [Deubel, Schneider 1996; Jonikaitis et al. 2017; Peterson et al. 2019; Puntiroli et al. 2015; Rolfs, Carrasco 2012]. Эти переключения внимания коррелируют с латентностью саккад: чем раньше внимание

переключается на цель, тем короче латентность саккады [Jonikaitis, Deubel 2011; Jonikaitis, Theeuwes 2013]. До саккады внимание лучше всего сосредоточено на фактическом местоположении саккады (где приземлится фовеа), а не на заданном положении (где фовеа должна приземлиться) [Deubel, Schneider 1996]. Способность концентрироваться на местах, удаленных от цели, снижается во время подготовки движения [Deubel 2008; Szinte et al. 2015].

В то время как взаимосвязь между направлением взгляда и вниманием изучается давно, систематическое исследование отношений внимания и рабочей памяти началось лишь около десяти лет назад. Ранние эксперименты выявили, что удержание определенной позиции в рабочей памяти ускоряет обработку стимулов именно в этой позиции, а отвлечение внимания от запомненного места ухудшает выполнение пространственных мнемических задач. Также было обнаружено, что фокусировка внимания на уже закодированных в память объектах (процедура, известная как ретрокуинг – *retro-cue*) повышает точность их последующего воспроизведения [Jonikaitis, Moore 2019; Kuo et al. 2014].

Вклад структур, контролирующих взгляд, в поддержание зрительно-пространственной информации хорошо изучен, при этом исследования показывают, что инактивация фронтальных глазодвигательных полей приводит к ухудшению выполнения задач саккад, управляемых памятью [Acker et al. 2016; Clark et al. 2012; Dias, Segreaves 1999]. Исследования фМРТ у человека показывают устойчивую задержку активности во фронтальных глазодвигательных полях (8 поле по Бродману – центр произвольного движения глаз) и теменной коре [Ester et al. 2015; Sprague et al. 2014]. Например, зрительно-вызванные саккады быстрее достигают целей, соответствующих шаблонам памяти [Hollingworth et al. 2013]. Соответственно, подготовка саккады к месту стимула, которое запомнилось, улучшает удержание информации о признаках в этом месте [Ohl, Rolfs 2017]. Подготовка к выполнению двух саккад улучшает память, основанную на признаках, в обоих местах по сравнению с местами без саккад, но производительность в обоих местах снижается по сравнению с задачей с одной саккадой [Hanning, Deubel 2018].

В. В. Шульговский рассматривает психофизиологические механизмы пространственного зрительного внимания, фокусируясь на взаимодействии саккадических движений глаз и когнитивных процессов,

и описывает роль центральной нервной системы в управлении зором и выделении важных объектов в зрительном поле [Шульговский 2004]. Выделяют четыре уровня организации саккадической системы, где мозжечок принято относить к третьему уровню управления саккадами. Эти теоретические модели находят эмпирическое подтверждение в современных методах исследования, таких как видеоокулография (айтрекинг), которая позволяет детально изучить динамику саккад (латентность, амплитуду, точность приземления), фиксаций и пост-саккадических осцилляций. Кроме того, она количественно оценивает восходящие и нисходящие модуляции внимания, выявляет когнитивные дефициты зрительно-пространственной рабочей памяти и пространственного восприятия [Арлаков и др. 2023; Робин, Кружкова 2024; Смирнова 2023; Pollmann, Schneider 2022].

#### Анатомия глазодвигательной системы

Перед глазодвигательной системой стоит множество сложных задач по управлению движением, основная цель которой – направлять глаза для стабильного удержания изображений в центральной ямке сетчатки, области с наивысшей остротой зрения [Markanday et al. 2021]. Глаза могут вращаться в горизонтальном, вертикальном и торсионном (вокруг оси зора) направлениях и требуют скоординированного действия в общей сложности 12 мышц. Голова, расположенная на верхней части тела, перемещается в трехмерном пространстве. Поэтому, если глазодвигательная система не может решить этот набор проблем стабилизации, в зрительную систему поступают размытые, движущиеся или двойные изображения. Многие участки коры головного мозга и ствола головного мозга задействованы для решения этой сложной задачи управления системой [Waitzman 2017].

Анатомия путей, реализующих саккадические движения, представленная на рисунке 1, демонстрирует, что верхние холмики (SC) получают входы от базальных ганглиев, и что существует конвергенция сигналов из различных областей коры головного мозга на верхние холмики. Эта схема основана на описаниях в работе [Hikosaka et al. 2000] и адаптирована из работы [Parr, Friston 2017a]. Таким образом, верхние холмики являются одной из центральных структур, отвечающих за реализацию саккады.

Для наглядности другие входы в верхние холмики опущены, однако следует помнить, что вестибулярные и мозжечковые проекции в средний мозг играют критически важную роль в некоторых аспектах контроля саккадических движений глаз.

Базальные ганглии воздействуют на верхние холмики через ретикулярную часть черной субстанции (SNr reticulata), которая является точкой конвергенции прямого, непрямого и прямого путей. На схеме показаны все три пути (с некоторыми упрощениями):

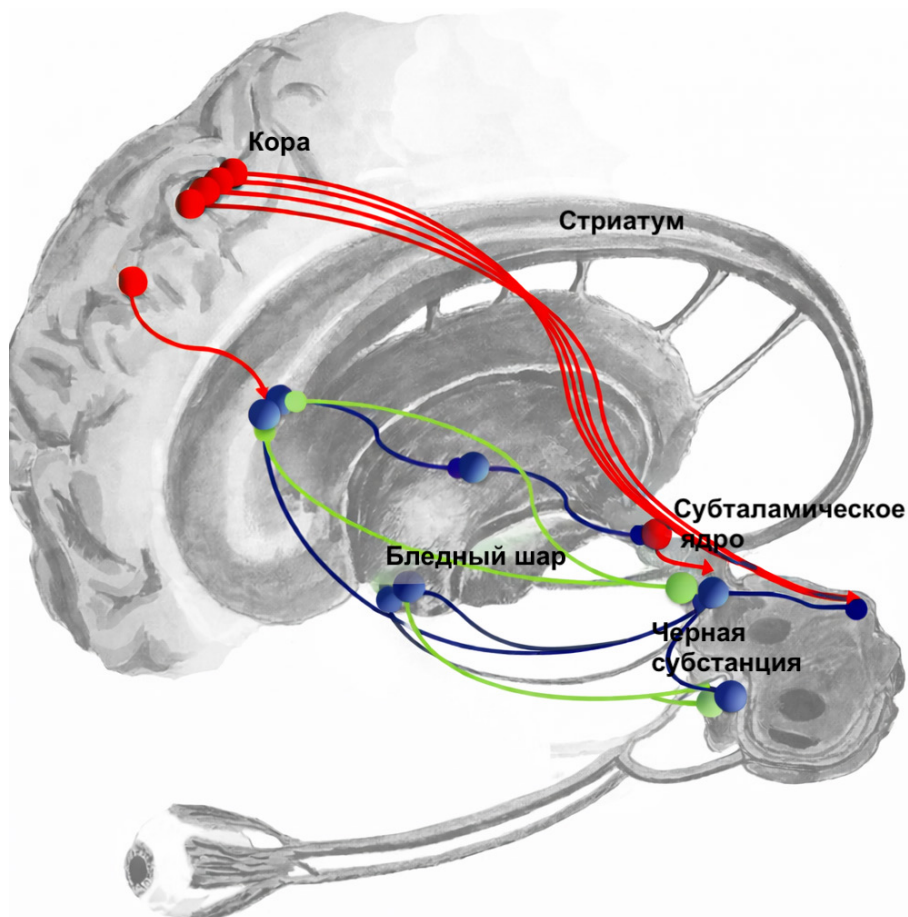
- прямой путь: кора → стриатум → SNr;
- не прямой путь: кора → стриатум → наружный сегмент бледного шара (GPe) → субталамическое ядро (STN) → SNr;
- гиперпрямой путь: кора → STN → SNr.

Часть черной субстанции (SNcompacta), а также вентральная покрышечная область (VTA) обеспечивают дофаминергический вход в стриатум.

Верхний бугорок играет ключевую роль в управлении саккадическими движениями глаз и расположен в среднем мозге рядом с глазодвигательным

ядром (III черепно-мозгового нерва). Каждый его слой содержит топографически организованную карту: поверхностный – визуальную карту в координатах сетчатки, опирающуюся на прямые сигналы с нее; промежуточный – моторную карту, задающую цели саккад; глубокий – мультисенсорную карту с соматотопической информацией. К нему прилегают кортикальные зоны, включая лобные глазодвигательные области, латеральную интрапариетальную кору и дополнительные глазодвигательные зоны, что способствует выявлению потенциальных саккадических целей.

Торможение верхнего бугорка обеспечивается сигналом из черной субстанции pars reticulata (SNr) – гамма-аминомасляного ядра базальных ганглиев. Нарушения nigroколликулярного пути или активности нейронов SNr приводят к проблемам с фиксацией взгляда и росту спонтанных саккад, подтверждая роль базальных ганглиев в тоническом торможении с фазовым растормаживанием для запуска саккад.



Прим.: красным цветом показаны возбуждающие связи, синим – тормозящие, зеленым – модулирующие.  
Note: Excitatory (red), inhibitory (blue), and modulatory (green) connections

Рис. 1. Анатомия путей, реализующих саккадические движения (изображение перепечатано и адаптировано из [Parr, Friston 2017a])  
Fig. 1. Saccadic pathways [Parr, Friston 2017a]

SNr интегрирует сигналы от стриатума и субталамического ядра (STN) через прямой и непрямой пути: прямой подавляет мишени SNr, а непрямой усиливает ингибирование. Их баланс регулируется дофаминергическими проекциями на стриатум, которые активируют D1-рецепторы в средних шиповидных нейронах прямого пути и подавляют D2-рецепторы в нейронах непрямого пути, проецирующихся через внешний отдел бледного шара на STN [Parr, Friston 2017b].

Схематическая модель стволового генератора саккадических движений глаз (рис. 2) приведена авторами [Кубарко, Кубарко 2005], адаптирована из [Leigh, Kennard 2004]. Горизонтально действующие экстраокулярные мышцы, такие как латеральная прямая мышца, иннервируются мотонейронами отводящего ядра (CN VI), которые получают саккадические команды от парамедианной ретикулярной формации моста (PPRF). Вертикально действующие экстраокулярные мышцы, например верхняя прямая мышца, иннервируются мотонейронами

глазодвигательного ядра (CN III) и блокового ядра (не показано); эти мотонейроны получают саккадические команды от нейронов, расположенных в ростральном интерстициальном ядре медиального продольного пучка (riMLF) в среднем мозге. Взрывные (*burst*) нейроны как в PPRF, так и в riMLF получают тормозящие сигналы от омнипаузных нейронов, локализованных во вставочном ядре шва (RIP) моста. Когда омнипаузные нейроны прекращают разряд, активированные нейроны PPRF и riMLF генерируют саккадический импульс, который передается на мотонейроны и вызывает физическое сокращение экстраокулярных мышц, быстро перемещающее глаз в новое положение при саккаде. Горизонтальные саккадические импульсы интегрируются сетью нейронов в ядре преддверно-подъязычного комплекса (*nucleus prepositus hypoglossi*) и прилегающем медиальном вестибулярном ядре (NPH / MVN); вертикальные саккадические импульсы интегрируются в интерстициальном ядре Кахала (INC) среднего мозга.

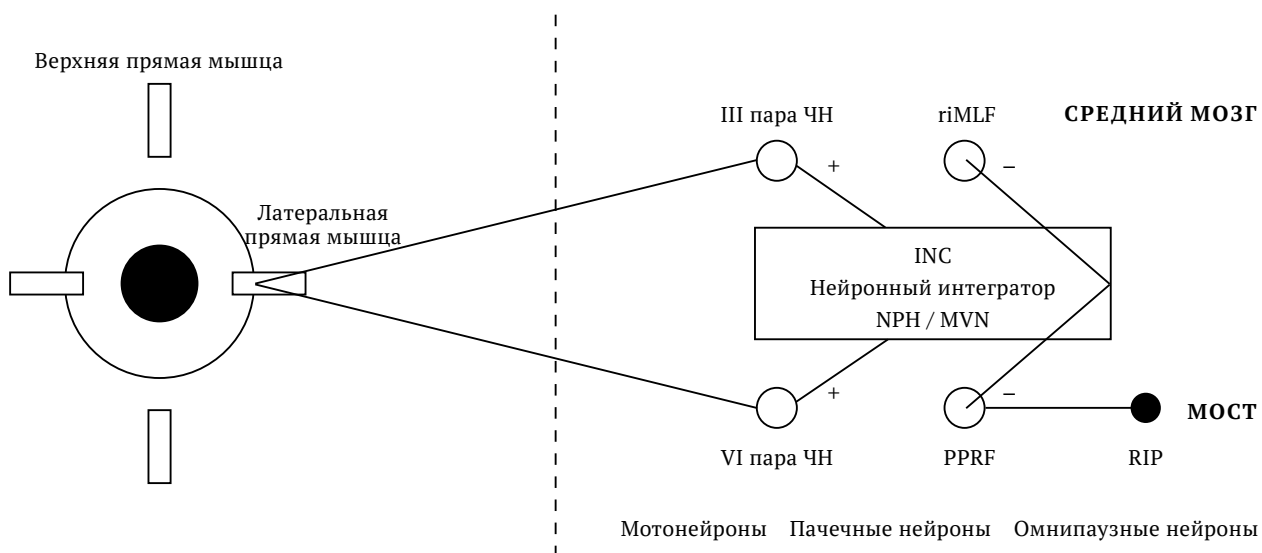


Рис. 2. Схематическое описание стволового генератора саккад [Кубарко, Кубарко 2005; Leigh, Kennard 2004]  
 Fig. 2. Schematic description of brainstem saccade generator [Kubarko, Kubarko 2005; Leigh, Kennard 2004]

Прим.: ЧН III, VI – ядра 3-й и 6-й пар черепных нервов; riMLF (rostral interstitial nucleus of the medial longitudinal fasciculus) – ростральное интерстициальное ядро медиального продольного пучка в среднем мозге; INC (interstitial nucleus of Cajal) – интерстициальное ядро Кахала; PPRF (paramedian pontine reticular formation) – парамедианная ретикулярная формация моста; NPH (nucleus prepositus hypoglossi) – препозитное периподъязычное ядро; MVN (medial vestibular nucleus) – прилежащее медиальное вестибулярное ядро в продолговатом мозге; RIP (nucleus raphe interpositus) – вставочное ядро шва.  
 Note: ЧН III, VI – nuclei of the 3rd and 6th pairs of cranial nerves; riMLF – rostral interstitial nucleus of the medial longitudinal fasciculus; INC – interstitial nucleus of Cajal; PPRF – paramedian pontine reticular formation; NPH – nucleus prepositus hypoglossi; MVN – medial vestibular nucleus; RIP – nucleus raphe interpositus.

В результате работы этого нейронного интегратора формируется ступенчатый сигнал, который позволяет экстраокулярным мышцам поддерживать тоническое сокращение и удерживать глаз в новом положении.

Мозжечок также участвует в зрительной и пространственной обработке [Feng et al. 2017]. Особый интерес при патологии мозжечка представляет изучение взаимосвязи между параметрами движения глаз и зрительным вниманием и рабочей памятью у лиц, страдающих дисфункцией мозжечка. Исследователи описали глазодвигательный дефицит, который сопровождался когнитивными нарушениями, такими как устойчивое нарушение внимания и снижение объема зрительно-пространственной рабочей памяти у детей, перенесших лечение по поводу мозжечковых опухолей [Shurupova, Latanov 2024; Shurupova et al. 2021].

На рисунке 3 представлены зоны участия мозжечка, вовлеченные в движения глаз [Beh et al. 2017].

Вестибулярные области мозжечка: *flocculus*, *paraflocculus*, *nodulus*, *uvula*, *tonsil* и *pyramis* – участвуют в удержании взора, прослеживающих движениях и вестибуло-окулярном рефлексе. Окуломоторные области мозжечка: *vermis-declive* (дорсальный), *folium*, *tuber*, – а также *lobuli semilunares superior et inferior* и внутримозжечковое ядро *nucleus fastigii* вносят вклад в управление саккадической системой, но также принимают участие в прослеживающих и вергентных движениях глаз. Мозжечок модулирует амплитуду саккад путем подстройки ингибиторного воздействия, осуществляемого клетками Пуркинью, червя мозжечка на ядро шатра, а также клетками Пуркинью, лежащими вне червя, проецирующимися на другие ядра мозжечка [Шурупова и др. 2016; 2020; Quaia et al. 1999].

Основными структурами, которые играют важную роль в зрительно-моторной функции мозжечка, являются дольки VI и VII глазодвигательного червя [Beh et al. 2017]. Окуломоторный мозжечок получает

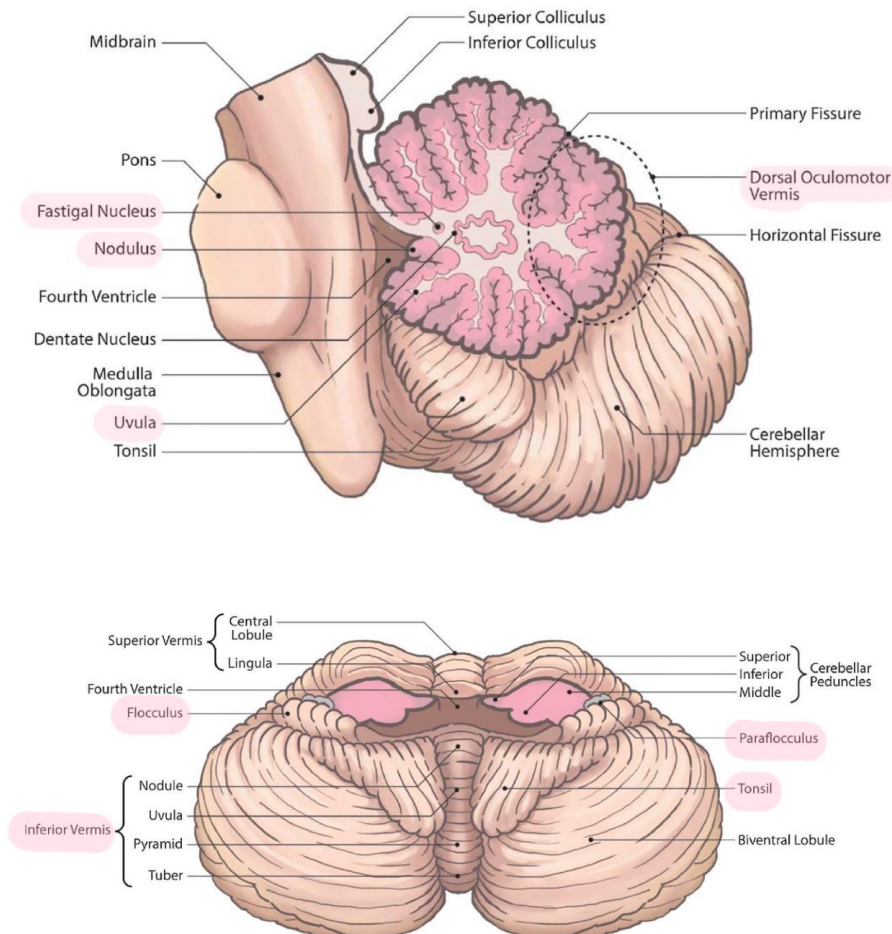


Рис. 3. Структуры мозжечка, обеспечивающие зрительно-моторную функцию (отмечены розовым) (адаптировано из [Beh et al. 2017])

Fig. 3. Cerebellar structures (pink) supporting visuo-motor function [Beh et al. 2017]

афферентные сигналы в виде мшистых волокон от парамедианной ретикулярной формации моста (PRFM / PPRF), ретикулярных ядер покрышки моста (NRTP), вестибулярных ядер, ядра преддверно-подъязычного комплекса (NPH), дорсолатеральных и дорсомедиальных ядер моста, а также через пикообразные волокна от ядер нижней оливы (ION).

Эфферентные проекции окуломоторного мозжечка формируются аксонами клеток Пуркинье и направляются к ипсилатеральному фастигиальному ядру (*nucleus fastigii*). Само ядро шатра принимает пикообразные волокна от ION и мшистые – от мостовых ядер.

Эфференты ядра шатра сначала идут к контралатеральному фастигиальному ядру, затем по верхним ножкам мозжечка достигают омнипаузных нейронов ядер шва (RIP) и контралатеральных пачечных нейронов стволового генератора саккад. Дополнительно проекции ядер шатра проецируются на вестибулярные ядра, таламус и роstralную часть верхних холмиков.

## Заключение

В данной статье рассмотрены взаимосвязи между зрительной рабочей памятью, ролью саккадических движений глаз, которые играют существенную роль в ее реализации, и участием мозжечка в процессах зрительного внимания, рабочей памяти и физиологии глазодвигательной системы. Мозжечок играет важную роль в их нейрофизиологическом

обеспечении, активируясь в задачах рабочей памяти (дольки VI, VIIA/B, червь), координируя саккады, внимание и память через лобно-мозжечковые и теменно-мозжечковые петли, а также контроль ошибок и временных последовательностей. Он модулирует амплитуду саккад через клетки Пуркинье, интегрируя афференты от ствола мозга и эфференты к омнипаузным нейронам и верхним холмикам. Нарушения (например, при мозжечковых патологиях) приводят к дефицитам внимания и зрительно-пространственной памяти, опосредуемым в том числе и саккадическими дисфункциями, подтверждая общую нейробиологическую основу когнитивных и двигательных функций.

Зрительное внимание и зрительно-пространственная рабочая память образуют интегрированную когнитивную систему, в которой саккадические движения глаз выступают ключевым сенсомоторным механизмом, обеспечивающим селекцию и удержание информации, что имеет особое значение для обучения школьников, адаптации человека в современном информационном мире.

**Конфликт интересов:** Автор заявил об отсутствии потенциальных конфликтов интересов в отношении исследования, авторства и / или публикации данной статьи.

**Conflict of interests:** The author declared no potential conflict of interests regarding the research, authorship, and / or publication of this article.

## Литература / References

- Арлаков Е. А., Белимова П. А., Джумагулова А. Ф. Айттрекинг как инструмент для исследований восприятия искусства: подход и перспективы удобства использования. *Культура и технологии*. 2023. Т. 8. № 1. С. 17–24. [Arlakov E. A., Belimova P. A., Dzhumagulova A. F. Eye tracking as a tool for art perception research: A usability perspective. *Kultura i tekhnologii*, 2023, 8(1): 17–24. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/cjncli>
- Кубарко А. И., Кубарко Ю. А. Динамика саккадических движений глаз и ее механизмы. *Медицинский журнал*. 2005. № 3. С. 77–79. [Kubarko A. I., Kubarko J. A. A dynamics of an eye's saccades and its mechanisms. *Medical Journal*, 2005, (3): 77–79. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/rsjuwd>
- Панфилова Е. А., Асланова М. С., Леонов С. В., Сухачев П. Ю., Седогин Е. А., Поликанова И. С. Применение систем регистраций движений глаз в оценке зрительно-пространственной памяти у детей дошкольного возраста. *Национальный психологический журнал*. 2024. Т. 19. № 4. С. 58–77. [Panfilova E. A., Aslanova M. S., Leonov S. V., Sukhochev P. Yu., Sedogin E. A., Polikanova I. S. The application of eye movement registration systems in the assessment of visuospatial memory in preschool children. *National Psychological Journal*, 2024, 19(4): 58–77. (In Russ.)] <https://doi.org/10.11621/npj.2024.0404>
- Персиянцева С. В., Адамович Т. В., Маракшина Ю. А., Исмагуллина В. И. Исследование рабочей памяти в обучении: традиционные и инновационные подходы. *Мир науки. Педагогика и психология*. 2024. Т. 12. № 5. [Persiantseva S. V., Adamovich T. V., Marakshina Yu. A., Ismatullina V. I. Research of working memory in learning:

- Traditional and innovative approaches. *World of Science. Pedagogy and Psychology*, 2024, (5). (In Russ.) URL: <https://mir-nauki.com/103PSMN524.html> (accessed 10 Jan 2026). <https://elibrary.ru/uatyqb>
- Робин С. Д., Кружкова О. В. Возможности применения технологии айтрекинга в психолого-педагогической диагностике обучающихся с ограниченными возможностями здоровья и детей с синдромом дефицита внимания и гиперактивности. *Специальное образование*. 2024. № 3. С. 53–67. [Robin S. D., Kruzhkova O. V. Application of the eye tracking technology in psycho-pedagogical diagnostics of students with disabilities and children with attention deficit hyperactivity disorder. *Special Education*, 2024, (3): 53–67. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/ozgijm>
- Смирнова Я. К. Айтрекинг-исследование визуального внимания детей с нарушением слуха в ситуации обучения. *Экспериментальная психология*. 2023. Т. 16. № 1. С. 4–22. [Smirnova Ya. K. Eye tracking study of visual attention of children with hearing impairments in a learning situation. *Experimental Psychology (Russia)*, 2023, 16(1): 4–22. (In Russ.)] <https://doi.org/10.17759/exppsy.2023160101>
- Тихомирова Т. Н. Измерение зрительно-пространственной рабочей памяти у школьников в контексте учебных результатов: показатели точности, объема и эффективности. *Экспериментальная психология*. 2025. Т. 18. № 4. С. 194–210. [Tikhomirova T. N. Measuring visual-spatial working memory among schoolchildren: Accuracy, capacity, and efficiency in educational outcomes. *Experimental Psychology (Russia)*, 2025, 18(4): 194–210. (In Russ.)] <https://doi.org/10.17759/exppsy.2025180412>
- Уточкин И. С., Юревич М. А., Булатова М. Е. Зрительная рабочая память: методы, исследования, теории. *Российский журнал когнитивной науки*. 2016. Т. 3. № 3. – С. 58–76. [Utochkin I. S., Yurevich M. A., Bulatova M. E. Visual working memory: Methods, research, theories. *Rossiiskii zhurnal kognitivnoi nauki*, 2016, 3(3): 58–76. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/xzrpsx>
- Фаликман М. В. Современные исследования взаимосвязи становления когнитивных и двигательных функций: предпосылки успешного освоения письма. *Психологическая наука и образование www.psyedu.ru*. 2009. № 1. [Falikman M. V. Relationship between the development of cognitive and motor functions: Prerequisites for successful writing acquisition. *Psychological Science and Education www.psyedu.ru*, 2009, (1). (In Russ.)] URL: [https://psyjournals.ru/journals/psyedu/archive/2009\\_n1/psyedu\\_2009\\_n1\\_Falikman.pdf](https://psyjournals.ru/journals/psyedu/archive/2009_n1/psyedu_2009_n1_Falikman.pdf) (accessed 10 Jan 2026). <https://elibrary.ru/kizpid>
- Шульговский В. В. Психофизиология пространственного зрительного внимания у человека. *Соросовский образовательный журнал*. 2004. Т. 8. № 1. С. 17–23. [Shulgovskiy V. V. Psychophysiology of human visuo-spatial attention. *Sorosovskii obrazovatelnyi zhurnal*, 2004, 8(1): 17–23. (In Russ.)]
- Шурупова М. А., Анисимов В. Н., Латанов А. В., Касаткин В. Н. Особенности нарушений движений глаз при поражениях мозжечка различной локализации. *Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова*. 2016. Т. 24. № 3. С. 154–163. [Shurupova M. A., Anisimov V. N., Latanov A. V., Kasatkin V. N. Features of eye movement disorders in patients with cerebellar lesions of different localization. *I. P. Pavlov Russian Medical Biological Herald*, 2016, 24(3): 154–163. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/wlyxnl>
- Шурупова М. А., Касаткин В. Н., Анисимов В. Н., Латанов А. В. Влияние мозжечковой дисфункции, приобретенной в результате лечения опухоли, на функционирование саккадической системы у детей. *Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова*. 2020. Т. 106. № 7. С. 866–879. [Shurupova M. A., Kasatkin V. N., Anisimov V. N., Latanov A. V. Influence of surgery-related cerebellar dysfunction on the saccadic system performance in children. *Russian Journal of Physiology*, 2020, 106(7): 866–879. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S0869813920070079>
- Acker L., Pino E. N., Boyden E. S., Desimone R. FEF inactivation with improved optogenetic methods. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(146): E7297–E7306. <https://doi.org/10.1073/pnas.1610784113>
- Allen K., Higgins S., Adams J. The relationship between visuospatial working memory and mathematical performance in school-aged children: A systematic review. *Educational Psychology Review*, 2019, 31: 509–531. <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09470-8>
- Altemeier L. E., Abbott R. D., Berninger V. W. Executive functions for reading and writing in typical literacy development and dyslexia. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 2008, 30(5): 588–606. <https://doi.org/10.1080/13803390701562818>

- Anderson V. A., Anderson P., Northam E., Jacobs R., Catroppa C. Development of executive functions through late childhood and adolescence in an Australian sample. *Developmental Neuropsychology*, 2001, 20(1): 385–406. [https://doi.org/10.1207/s15326942dn2001\\_5](https://doi.org/10.1207/s15326942dn2001_5)
- Atkinson S. J., Martin C. R. Early detection of risk of reading difficulties using a working memory assessment battery. *British Educational Research Journal*, 2022, 48(6): 1183–1197. <https://doi.org/10.1002/berj.3821>
- Baddeley A. D. Short-term and working memory. *The Oxford handbook of memory*, eds. Tulving E., Craik F. I. M. Oxford: Oxford University Press, 2000, 77–92.
- Baddeley A. D., Hitch G. Working memory. *Psychology of Learning and Motivation*, 1974, 8: 47–89. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60452-1](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60452-1)
- Barak O., Tsodyks M. Working models of working memory. *Current Opinion in Neurobiology*, 2014, 25: 20–24. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2013.10.008>
- Beh S. C., Frohman T. C., Frohman E. M. Cerebellar control of eye movements. *Journal of Neuro-Ophthalmology*, 2017, 37(1): 87–98. <https://doi.org/10.1097/WNO.0000000000000456>
- Ben-Yehudah G., Guediche S., Fiez J. A. Cerebellar contributions to verbal working memory: Beyond cognitive theory. *Cerebellum*, 2007, 6(3): 193–201. <https://doi.org/10.1080/14734220701286195>
- Brocki K. C., Bohlin G. Executive functions in children aged 6 to 13: A dimensional and developmental study. *Developmental Neuropsychology*, 2004, 26(2): 571–593. [https://doi.org/10.1207/s15326942dn2602\\_3](https://doi.org/10.1207/s15326942dn2602_3)
- Calvo M. G., Meseguer E. Eye movements and processing stages in reading: Relative contribution of visual, lexical, and contextual factors. *The Spanish Journal of Psychology*, 2002, 5(1), 66–77. <https://doi.org/10.1017/S1138741600005849>
- Chen P. L., Machado L. Age-related deficits in voluntary control over saccadic eye movements: Consideration of electrical brain stimulation as a therapeutic strategy. *Neurobiology of Aging*, 2016, 41: 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2016.02.010>
- Chen S. H. A., Desmond J. E. Cerebrocerebellar networks during articulatory rehearsal and verbal working memory tasks. *NeuroImage*, 2005, 24(2): 332–338. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.08.032>
- Clark K. L., Noudoost B., Moore T. Persistent spatial information in the frontal eye field during object-based short-term memory. *Journal of Neuroscience*, 2012, 32: 10907–10914. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1450-12.2012>
- Clark S. V., Semmel E. S., Aleksionis H. A., Steinberg S. N., King T. Z. Cerebellar-subcortical-cortical systems as modulators of cognitive functions. *Neuropsychology Review*, 2021, 31(3): 422–446. <https://doi.org/10.1007/s11065-020-09465-1>
- Deubel H. The time course of presaccadic attention shifts. *Psychological Research*, 2008, 72(6): 630–640. <https://doi.org/10.1007/s00426-008-0165-3>
- Deubel H., Schneider W. X. Saccade target selection and object recognition: Evidence for a common attentional mechanism. *Vision Research*, 1996, 36(12): 1827–1837. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00294-4](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00294-4)
- Deviaterikova A., Kasatkin V., Malykh S. The role of the cerebellum in visual-spatial memory in pediatric posterior fossa tumor survivors. *Cerebellum*, 2024, 23(1): 197–203. <https://doi.org/10.1007/s12311-023-01525-5>
- Diamond A. Close interrelation of motor development and cognitive development and of the cerebellum and prefrontal cortex. *Child Development*, 2000, 71(1): 44–56. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00117>
- Dias E. C., Segraves M. A. Muscimol-induced inactivation of monkey frontal eye field: Effects on visually and memory-guided saccades. *Journal of Neurophysiology*, 1999, 81(5): 2191–2214. <https://doi.org/10.1152/jn.1999.81.5.2191>
- Ding J., Zhang Y., Liang P., Li X. Modulation of working memory capacity on predictive processing during language comprehension. *Language, Cognition and Neuroscience*, 2023, 38(8): 1133–1152. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1080/23273798.2023.2212819>
- Dubuc M.-M., Aubertin-Leheudre M., Karelis A. D. Relationship between interference control and working memory with academic performance in high school students: The Adolescent Student Academic Performance longitudinal study (ASAP). *Journal of Adolescence*, 2020, 80: 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.adolescence.2020.03.001>
- Ekstrom L. B., Roelfsema P. R., Arsenault J. T., Bonmassar G., Vanduffel W. Bottom-up dependent gating of frontal signals in early visual cortex. *Science*, 2008, 321(5887): 414–417. <https://doi.org/10.1126/science.1153276>
- Ester E. F., Sprague T. C., Serences J. T. Parietal and frontal cortex encode stimulus-specific mnemonic representations during visual working memory. *Neuron*, 2015, 87(4): 893–905. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.07.013>

- Fastenrath M., Spalek K., Coynel D., Loos E., Milnik A., Egli T., Schicktzanz N., Geissmann L., Rooszendaal B., Papassotiropoulos A., de Quervain D. J.-F. Human cerebellum and corticocerebellar connections involved in emotional memory enhancement. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(41). <https://doi.org/10.1073/pnas.2204900119>
- Feng X., Li L., Zhang M., Yang X., Tian M., Xie W., Lu Y., Liu L., Bélanger N. N., Meng X., Ding G. Dyslexic children show atypical cerebellar activation and cerebro-cerebellar functional connectivity in orthographic and phonological processing. *Cerebellum*, 2017, 16(2): 496–507. <https://doi.org/10.1007/s12311-016-0829-2>
- Fu Y., Guan C., Tam J., O'Donnell R. E., Shen M., Wyble B., Chen H. Attention with or without working memory: Mnemonic reselection of attended information. *Trends in Cognitive Sciences*, 2023, 27(12): 1111–1122. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2023.08.010>
- Gabay L., Miller P., Alia-Klein N., Lewin M. P. Circadian effects on attention and working memory in college students with attention deficit and hyperactivity symptoms. *Frontiers in Psychology*, 2022, 13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.851502>
- Gurd J. M., Amunts K., Weiss P. H., Zafiris O., Zilles K., Marshall J. C., Fink G. R. Posterior parietal cortex is implicated in continuous switching between verbal fluency tasks: An fMRI study with clinical implications. *Brain*, 2002, 125(pt. 5): 1024–1038. <https://doi.org/10.1093/brain/awf093>
- Hanning N. M., Deubel H. Independent effects of eye and hand movements on visual working memory. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 2018, 12. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2018.00037>
- Hautzel H., Mottaghy F. M., Specht K., Müller H.-W., Krause B. J. Evidence of a modality-dependent role of the cerebellum in working memory? An fMRI study comparing verbal and abstract n-back tasks. *NeuroImage*, 2009, 47(4): 2073–2082. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.06.005>
- Henson R. N., Burgess N., Frith C. D. Recoding, storage, rehearsal and grouping in verbal short-term memory: An fMRI study. *Neuropsychologia*, 2000, 38(4): 426–440. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(99\)00098-6](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(99)00098-6)
- Hikosaka O., Takikawa Y., Kawagoe R. Role of the basal ganglia in the control of purposive saccadic eye movements. *Physiological Reviews*, 2000, 80(3): 953–978. <https://doi.org/10.1152/physrev.2000.80.3.953>
- Hollingworth A., Matsukura M., Luck S. J. Visual working memory modulates rapid eye movements to simple onset targets. *Psychological Science*, 2013, 24(5): 790–796.
- Jaffe R. J., Constantinidis C. Working memory: From neural activity to the sentient mind. *Comprehensive Physiology*, 2021, 11(4): 2547–2587. <https://doi.org/10.1002/cphy.c210005>
- Jonikaitis D., Deubel H. Independent allocation of attention to eye and hand targets in coordinated eye-hand movements. *Psychological Science*, 2011, 22(3): 339–347. <https://doi.org/10.1177/0956797610397666>
- Jonikaitis D., Klapetek A., Deubel H. Spatial attention during saccade decisions. *Journal of Neurophysiology*, 2017, 118(1): 149–160. <https://doi.org/10.1152/jn.00665.2016>
- Jonikaitis D., Moore T. The interdependence of attention, working memory and gaze control: Behavior and neural circuitry. *Current Opinion in Psychology*, 2019, 29: 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2019.01.012>
- Jonikaitis D., Theeuwes J. Dissociating oculomotor contributions to spatial and feature-based selection. *Journal of Neurophysiology*, 2013, 110(7): 1525–1534. <https://doi.org/10.1152/jn.00275.2013>
- Takei S., Bostan A. C., Ebner T. J., Fakharian M. A., Gomi H., Guell X. et al. Consensus paper: Models of cerebellar functions. *Cerebellum*, 2026, 25(15). <https://doi.org/10.1007/s12311-025-01939-3>
- Karthikeyan R., Carrizales J., Johnson C., Mehta R. K. A window into the tired brain: Neurophysiological dynamics of visuospatial working memory under fatigue. *Human Factors*, 2024, 66(2): 528–543. <https://doi.org/10.1177/00187208221094900>
- Kirchner W. K. Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *Journal of Experimental Psychology*, 1958, 55(4): 352–358. <https://doi.org/10.1037/h0043688>
- Koziol L. F., Budding D., Andreasen N., D'Arrigo S., Bulgheroni S., Imamizu H., Ito M., Manto M., Marvel C., Parker K., Pezzulo G., Ramnani N., Riva D., Schmahmann J., Vandervert L., Yamazaki T. Consensus paper: The cerebellum's role in movement and cognition. *Cerebellum*, 2014, 13(1): 151–177. <https://doi.org/10.1007/s12311-013-0511-x>
- Kuo B.-C., Stokes M. G., Murray A. M., Nobre A. C. Attention biases visual activity in visual short-term memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2014, 26(7): 1377–1389. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00577](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00577)

- Leigh R. J., Kennard C. Using saccades as a research tool in the clinical neurosciences. *Brain*, 2004, 127(3): 460–477. <https://doi.org/10.1093/brain/awh035>
- Li Y., Fu W., Zhang Q., Chen X., Li X., Du B., Deng X., Ji F., Dong Q., Jaeggi S. M., Chen C., Li J. Effects of forward and backward span trainings on working memory: Evidence from a randomized controlled trial. *Psychophysiology*, 2023, 60(1). <https://doi.org/10.1111/psyp.14154>
- Lurito J. T., Kareken D. A., Lowe M. J., Chen S. H., Mathews V. P. Comparison of rhyming and word generation with fMRI. *Human Brain Mapping*, 2000, 10(3): 99–106. [https://doi.org/10.1002/1097-0193\(200007\)10:3%3C99::AID-HBM10%3E3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/1097-0193(200007)10:3%3C99::AID-HBM10%3E3.0.CO;2-Q)
- Mahon A., Clarke A. D. F., Hunt A. R. The role of attention in eye-movement awareness. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 2018, 80(7): 1691–1704. <https://doi.org/10.3758/s13414-018-1553-4>
- Markanday A., Inoue J., Dicke P. W., Thier P. Cerebellar complex spikes multiplex complementary behavioral information. *PLoS Biology*, 2021, 19(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001400>
- McDermott K. B., Petersen S. E., Watson J. M., Ojemann J. G. A procedure for identifying regions preferentially activated by attention to semantic and phonological relations using functional magnetic resonance imaging. *Neuropsychologia*, 2003, 41(3): 293–303. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(02\)00162-8](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(02)00162-8)
- Miller E. K., Lundqvist M., Bastos A. M. Working Memory 2.0. *Neuron*, 2018, 100(2): 463–475. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.09.023>
- Mishkin M., Ungerleider L. G., Macko K. A. Object vision and spatial vision: Two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, 1983, 6(10): 414–417. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(83\)90190-X](https://doi.org/10.1016/0166-2236(83)90190-X)
- Miyake A., Friedman N. P. The nature and organization of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, 2012, 21(1): 8–14. <https://doi.org/10.1177/0963721411429458>
- Mock J., Huber S., Klein E., Moeller K. Insights into numerical cognition: Considering eye-fixations in number processing and arithmetic. *Psychological Research*, 2016, 80(3), 334–359. <https://doi.org/10.1007/s00426-015-0739-9>
- Monette S., Bigras M., Guay M.-C. The role of the executive functions in school achievement at the end of Grade 1. *Journal of Experimental Child Psychology*, 2011, 109(2): 158–173. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.01.008>
- Moore T., Armstrong K. M. Selective gating of visual signals by microstimulation of frontal cortex. *Nature*, 2003, 421(6921): 370–373. <https://doi.org/10.1038/nature01341>
- Nayfeld I., Fuccillo J., Greenfield D. B. Executive functions in early learning: Extending the relationship between executive functions and school readiness to science. *Learning and Individual Differences*, 2013, 26: 81–88. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1016/j.lindif.2013.04.011>
- Ohl S., Rolfs M. Saccadic eye movements impose a natural bottleneck on visual short-term memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 2017, 43(5): 736–748. <https://doi.org/10.1037/xlm0000338>
- Ojemann J. G., Buckner R. L., Akbudak E., Snyder A. Z., Ollinger J. M., McKinstry R. C., Rosen B. R., Petersen S. E., Raichle M. E., Conturo T. E. Functional MRI studies of word-stem completion: Reliability across laboratories and comparison to blood flow imaging with PET. *Human Brain Mapping*, 1998, 6(4): 203–215. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0193\(1998\)6:4%3C203::aid-hbm2%3E3.0.co;2-7](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0193(1998)6:4%3C203::aid-hbm2%3E3.0.co;2-7)
- Pannasch S., Helmert J. R., Roth K., Herbold A.-K., Walter H. Visual fixation durations and saccade amplitudes: Shifting relationship in a variety of conditions. *Journal of Eye Movement Research*, 2008, 2(2): 1–19. <https://doi.org/10.16910/jemr.2.2.4>
- Parr T., Friston K. J. The active construction of the visual world. *Neuropsychologia*, 2017a, 104: 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.08.003>
- Parr T., Friston K. J. Working memory, attention, and salience in active inference. *Scientific Reports*, 2017b, 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15249-0>
- Peltsch A., Hemraj A., Garcia A., Munoz D. P. Age-related trends in saccade characteristics among the elderly. *Neurobiology of Aging*, 2011, 32(4):669–679. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2009.04.001>
- Petersen S. E., Fox P. T., Posner M. I., Mintun M., Raichle M. E. Positron emission tomographic studies of the processing of single words. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1989, 1(2): 153–170. <https://doi.org/10.1162/jocn.1989.1.2.153>

- Peterson M. S., Kelly S. P., Blumberg E. J. Saccadic eye movements smear spatial working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2019, 45(2): 255–263. <https://doi.org/10.1037/xhp0000596>
- Pollmann S., Schneider W. X. Working memory and active sampling of the environment: Medial temporal contributions. *Handbook of Clinical Neurology*, 2022, 187: 339–357. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823493-8.00029-8>
- Puntiroli M., Kerzel D., Born S. Perceptual enhancement prior to intended and involuntary saccades. *Journal of Vision*, 2015, 15(2). <https://doi.org/10.1167/15.4.2>
- Quaia C., Lefèvre P., Optican L. M. Model of the control of saccades by superior colliculus and cerebellum. *Journal of Neurophysiology*, 1999, 82(2): 999–1018. <https://doi.org/10.1152/jn.1999.82.2.999>
- Rolfs M., Carrasco M. Rapid simultaneous enhancement of visual sensitivity and perceived contrast during saccade preparation. *Journal of Neuroscience*, 2012, 32(40): 13744–13752. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2676-12.2012>
- Sadus K., Schubert A. L., Löffler C., Hemming W., Hagemann D. Neurophysiological signature of working memory updating during encoding. *Cortex*, 2026, 194: 191–219. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2025.11.013>
- Shurupova M., Deviaterikova A., Latanov A., Kasatkin V. Interaction between oculomotor impairments, voluntary attention and working memory disorders in children with cerebellar tumors. *Advances in Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics: Intercognsci 2020*, eds. Velichkovsky B. M., Balaban P. M., Ushakov V. L. Cham: Springer, 2021, vol. 1358, 547–553. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-71637-0\\_63](https://doi.org/10.1007/978-3-030-71637-0_63)
- Shurupova M. A., Latanov A. V. Oculomotor impairments in children after posterior fossa tumors treatment. *Cerebellum*, 2024, 23(2): 444–454. <https://doi.org/10.1007/s12311-023-01553-1>
- Skrzypulec B., Chuderski A. Nonlinear effects of spatial connectedness implicate hierarchically structured representations in visual working memory. *Journal of Memory and Language*, 2020, 113. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2020.104124>
- Sprague T. C., Ester E. F., Serences J. T. Reconstructions of information in visual spatial working memory degrade with memory load. *Current Biology*, 2014, 24(18): 2174–2180. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.07.066>
- St Clair-Thompson H. L., Gathercole S. E. Executive functions and achievements in school: Shifting, updating, inhibition, and working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 2006, 59(4): 745–759. <https://doi.org/10.1080/17470210500162854>
- Stein H. Why does the neocortex need the cerebellum for working memory? *Journal of Neuroscience*, 2021, 41(30): 6368–6370. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0701-21.2021>
- Stoodley C. J., Schmahmann J. D. The cerebellum and language: Evidence from patients with cerebellar degeneration. *Brain and Language*, 2009, 110(3): 149–153. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2009.07.006>
- Szinte M., Carrasco M., Cavanagh P., Rolfs M. Attentional trade-offs maintain the tracking of moving objects across saccades. *Journal of Neurophysiology*, 2015, 113(7): 2220–2231. <https://doi.org/10.1152/jn.00966.2014>
- Tan J. B., Orlando I. F., Whyte C., Bryant A. G., Munn B. R., Baracchini G., King M., O'Callaghan C., Müller E. J., Shine J. M. Cerebellar and subcortical contributions to working memory manipulation. *Communications Biology*, 2025, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s42003-025-08467-0>
- Thommesen K. K., Damgaard V., Mariegaard J., Jespersen A. E., Ysbæk-Nielsen A. T., Mikkelsen C., Didriksen M., Ostrowski S. R., Jørgensen M. B., Macoveanu J., Miskowiak K. W. Neural underpinnings of memory encoding and retrieval: Validation of a novel ecologically valid fMRI paradigm. *Neuroscience Applied*, 2024, 3. <https://doi.org/10.1016/j.nsa.2024.104084>
- Unsworth N., Engle R. W. The nature of individual differences in working memory capacity: Active maintenance in primary memory and controlled search from secondary memory. *Psychological Review*, 2007, 114(1): 104–132. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.114.1.104>
- Vandervert L. R. Working memory, the cognitive functions of the cerebellum and the child prodigy. *International Handbook on Giftedness*, ed. Shavinina L. V. Springer, Dordrecht, 2009, 295–316. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6162-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6162-2_13)
- Velichkovsky B. M., Joos M., Helmert J. R., Pannasch S. Two visual systems and their eye movements: Evidence from static and dynamic scene perception. *Proceedings of the XXVII annual conference of the Cognitive Science Society*, eds. Bara B. G., Barsalou L., Bucciarelli M. Mahwah: Lawrence Erlbaum 2005, 2283–2288.

- Waitzman D. M. Oculomotor systems and control. *Conn's Translational Neuroscience*, ed. Michael Conn P. Academic Press, 2017, 439–465. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802381-5.00032-4>
- Walcher S., Korda Ž., Körner C., Benedek M. How workload and availability of spatial reference shape eye movement coupling in visuospatial working memory. *Cognition*, 2024, 249. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2024.105815>
- Wang X., Liu Z., Zhang H., Ji C. Effects of high-intensity interval training on executive functions in college students: Evidence from different doses. *Brain Sciences*, 2023, 13(4). <https://doi.org/10.3390/brainsci13040571>
- Wu N., Chen Y., Yang J., Li F. Childhood obesity and academic performance: The role of working memory. *Frontiers in Psychology*, 2017, 8. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00611>
- Yeung M. K., Lee T. L., Chan A. S. Negative mood is associated with decreased prefrontal cortex functioning during working memory in young adults. *Psychophysiology*, 2021, 58(6). <https://doi.org/10.1111/psyp.13802>
- Yüce A. E. Cost of being online for brain: Changing working memory attributes, associated metacognitive knowledge and long-term memory processing. *Psikiyatride Güncel Yaklaşımlar*, 2025, 17(1): 166–178. <https://psycnet.apa.org/doi/10.18863/pgy.1433144>
- Živković M., Pellizzoni S., Mammarella I. C., Passolunghi M. C. The relationship between math anxiety and arithmetic reasoning: The mediating role of working memory and self-competence. *Current Psychology*, 2023, 42(17): 14506–14516. <https://doi.org/10.1007/s12144-022-02765-0>