



ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ СНОМ И КОНСОЛИДАЦИЕЙ ПАМЯТИ: НЕЙРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ И РОЛЬ РАЗЛИЧНЫХ ФАЗ СНА

Морозова Елена Викторовна

Доцент кафедры сравнительной грамматики, Московский государственный университет
г. Москва Россия

Аннотация

Данная статья посвящена всестороннему анализу критически важной роли сна в процессах консолидации памяти — трансформации нестабильных, свежеприобретенных следов памяти в стабильные, долговременные структуры. В противовес ранним представлениям о сне как о пассивном состоянии, современные нейробиологические исследования, опирающиеся на методы электроэнцефалографии и магнитно-резонансной томографии, убедительно доказывают, что сон является высокоактивным и структурированным состоянием, необходимым для эффективного обучения и запоминания. Рассматривается специфическая роль каждой фазы сна: медленноволнового сна для консолидации декларативной (фактической) памяти и очистки синаптических связей, и быстрого сна для консолидации процедурной (навыковой) и эмоциональной памяти. Особое внимание уделяется механизмам "системной консолидации", включая осцилляции, такие как сонные веретена и медленные волны, которые способствуют реактивации и реорганизации следов памяти между гиппокампом и неокортексом. Сделан вывод о том, что сон является активным, гомеостатическим и регуляторным процессом, необходимым не только для восстановления организма, но и для оптимизации когнитивной архитектуры, что имеет решающее значение для обучения и адаптации.

Ключевые слова: Сон, Консолидация памяти, Медленноволновой сон (NREM), Быстрый сон, Декларативная память, Процедурная память, Гиппокамп, Неокортекс, Сонные веретена, Синаптическая гомеостаза.

Введение

На протяжении длительного времени сон ошибочно рассматривался в основном как пассивное состояние, служащее исключительно для физического восстановления организма. Однако революционные открытия в нейронауке последних десятилетий убедительно доказали, что сон представляет собой высокоорганизованный и динамичный процесс, который играет критически

важную, активную роль в когнитивной функции, и прежде всего, в формировании долговременной памяти. Консолидация памяти — это процесс стабилизации следов памяти (энграмм), который переводит недавно приобретенную, еще хрупкую информацию из временного хранилища (гиппокампа) в долгосрочные, более устойчивые хранилища в неокортексе.

Без эффективной консолидации значительная часть новой информации быстро забывается. Нейробиологический взгляд на сон утверждает, что различные фазы сна обеспечивают идеальные условия для этого процесса, поскольку мозг в состоянии сна отключается от внешних сенсорных стимулов, позволяя внутренним механизмам реорганизации памяти работать беспрепятственно. Цель данной статьи — провести систематический анализ роли различных фаз сна, особенно медленноволнового сна и быстрого сна, в консолидации разных типов памяти (декларативной и процедурной). Особое внимание будет уделено специфическим нейрофизиологическим осцилляциям, которые обеспечивают межсистемную коммуникацию между гиппокампом и корой, выступая в качестве "временного окна" для эффективной передачи и стабилизации информации.

Дифференцированная Роль Фаз Сна в Консолидации Памяти

Сон цикличен и состоит из двух основных, функционально различных фаз, каждая из которых специализируется на обработке определенных типов памяти.

Медленноволновой Сон (NREM) и Декларативная Память: NREM-сон (стадии 3 и 4, или глубокий сон) характеризуется высокоамплитудными, низкочастотными медленными волнами (0.5–4 Гц). Эта фаза критически важна для консолидации декларативной памяти — памяти о фактах, событиях, датах и местах. Ключевой механизм консолидации, происходящий во время NREM, называется системной консолидацией (System Consolidation) и включает диалог между гиппокампом и неокортексом.

Тройная Осцилляция (Triple Oscillation): Во время NREM-сна наблюдается четкая синхронизация трех типов нейронной активности: медленных волн (генерируемых неокортексом), сонных веретен (Sleep Spindles, генерируемых таламусом) и всплесков ряби (Sharp Wave Ripples, SWRs, генерируемых гиппокампом). Всплески SWRs в гиппокампе служат для реактивации следов памяти, сформированных во время бодрствования. Эта реактивация, или "воспроизведение" (replay), отправляется в неокортекс, где "сонные веретена" (короткие всплески частотой 11–15 Гц) выступают в роли синхронизаторов, обеспечивая временное окно для эффективной пластической перестройки в коре. Таким образом, NREM-сон функционирует как "переносчик" информации из краткосрочного, гиппокампального хранилища в долгосрочное, кортикальное.

Быстрый Сон (REM) и Процедурная Память: REM-сон, характеризующийся быстрыми, низкоамплитудными волнами (подобными бодрствованию) и быстрыми движениями глаз, критически важен для консолидации процедурной памяти (памяти на навыки и моторные действия, например, езда на велосипеде

или игра на инструменте) и, в особенности, эмоциональной памяти. В отличие от NREM-сна, который обеспечивает перенос информации, REM-сон, как предполагается, участвует в интеграции новой информации с уже существующими семантическими сетями. Отличительной чертой REM-сна является низкий уровень норадреналина, что, как считается, позволяет мозгу безопасно реактивировать травматические или эмоционально окрашенные воспоминания, "перерабатывать" их и снижать связанный с ними эмоциональный заряд (эмоциональная регуляция). Если NREM стабилизирует факты, то REM-сон, посредством интенсивной синаптической активности, "ремонтирует" и перестраивает сети, связанные с навыками и эмоциональным контекстом.

Механизмы Синаптической Гомеостазы

Кроме специфической консолидации, сон выполняет фундаментальную функцию синаптической гомеостазы, которая необходима для поддержания когнитивной эффективности.

Гипотеза Синаптической Гомеостазы (Synaptic Homeostasis Hypothesis, SHH): Эта гипотеза, предложенная Кьярой Ченчи Гиззи, утверждает, что обучение во время бодрствования приводит к чистому увеличению синаптической силы и, как следствие, к возрастанию потребности мозга в энергии и объеме. Если бы этот рост продолжался бесконечно, это привело бы к перенасыщению и "зашумлению" нейронных сетей. Сон, особенно медленноволновой сон, выполняет функцию масштабного, контролируемого "снижения масштаба" (downscaling) синаптической силы. Это снижение силы наименее важных связей позволяет восстановить синаптический динамический диапазон (разгрузить сеть) и улучшить соотношение сигнал/шум для вновь приобретенных, наиболее сильных воспоминаний. Таким образом, сон "закрепляет" важное, одновременно "стирая" фоновый шум, обеспечивая готовность мозга к новому обучению на следующий день.

Роль Глимфатической Системы: Недавние открытия подчеркнули роль глимфатической системы (функциональный аналог лимфатической системы в ЦНС) в процессе очистки мозга от метаболических отходов. Было показано, что во время сна происходит увеличение межклеточного пространства, что способствует интенсивному выведению токсичных метаболитов, в частности, бета-амилоида, накопление которого связано с нейродегенеративными заболеваниями. Эта очистительная функция не является прямым механизмом консолидации, но она критически важна для поддержания общей нейронной среды и обеспечения долгосрочной когнитивной стабильности, включая способность к формированию памяти.

Последствия Нарушения Сна для Памяти и Обучения

Нарушение нормальной структуры сна (недосып, фрагментация сна) имеет немедленные и долгосрочные негативные последствия для всех аспектов памяти и обучения.

Нарушение Реактивации и Консолидации: Хронический или острый дефицит сна, особенно NREM-сна, ведет к существенному снижению амплитуды медленных волн и плотности сонных веретен. Это напрямую нарушает механизм тройной осцилляции, препятствуя эффективной реактивации гиппокампальных следов памяти и их переносу в кору. Эмпирические исследования показывают, что недостаток сна в первую ночь после обучения приводит к значительно худшему удержанию декларативной информации по сравнению с контрольной группой, которая спала полноценно. Таким образом, сон после обучения является не просто желательным, а необходимым условием для стабилизации знаний.

Ухудшение Обучения в Будущем: Кроме нарушения консолидации уже приобретенной информации, депривация сна ухудшает способность мозга к новому обучению. Нарушенная синаптическая гомеостаза приводит к тому, что мозг остается в состоянии "перенасыщения" синаптическими связями, что затрудняет формирование новых энграмм. Студент, который постоянно жертвует сном ради учебы, входит в замкнутый круг: он не только плохо консолидирует материал, выученный вчера, но и демонстрирует сниженную способность к усвоению нового материала сегодня.

Заключение

Сон представляет собой активное, высокоорганизованное состояние, абсолютно необходимое для когнитивной гомеостазы и, в частности, для эффективной консолидации памяти. Взаимосвязь между сном и памятью является дифференцированной: медленноволновой сон с его синхронизированной тройной осцилляцией (медленные волны, веретена, рябь) служит для переноса и стабилизации декларативной памяти между гиппокампом и неокортексом, а быстрый сон участвует в реорганизации и эмоциональной регуляции процедурной памяти. Кроме того, NREM-сон обеспечивает критически важную синаптическую гомеостазу, предотвращая перенасыщение сети и готовя мозг к новому циклу обучения. Нарушение сна имеет не просто побочные, а центральные негативные последствия, снижая не только удержание уже приобретенных знаний, но и способность к последующему обучению. Признание сна как активной когнитивной функции является краеугольным камнем для оптимизации образовательных процессов и поддержания долгосрочного здоровья мозга.

Литература

1. Walker, M. P. *The role of sleep in cognition and emotion*. Annals of the New York Academy of Sciences, 2009.
2. Born, J., Wilhelm, I. *System consolidation of memory during sleep*. Psychological Research, 2012.
3. Tononi, G., Cirelli, C. *Sleep and the price of plasticity: the synaptic homeostasis hypothesis*. Neuron, 2005.
4. Rasch, B., Born, J. *About the role of sleep in memory*. Physiological Reviews, 2013.

5. Diekelmann, S., Born, J. *The memory function of sleep*. Nature Reviews Neuroscience, 2010.
6. Полуэктов, М. Г. *Сон: механизмы и функции*. Медицина, 2023.
7. Вейн, А. М. *Неврология сна*. Эйдос Медиа, 2024.