



РАБОЧАЯ ПАМЯТЬ ЧЕЛОВЕКА: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Величковский Б.Б., к.псих.н., начальник лаборатории когнитивных тестов и моделей НБИКС-центра НИЦ «Курчатовский институт» (г. Москва),

Козловский С.А., к.псих.н., научный сотрудник факультета психологии МГУ им. М.В.Ломоносова (г. Москва).

Аннотация. Описаны теории рабочей памяти человека, ее функциональные ограничения, мозговые механизмы, методы количественной оценки ее характеристик. Показана центральная роль рабочей памяти в выполнении человеком различных видов сложной деятельности. Намечены направления использования результатов фундаментальных исследований рабочей памяти в разработке пользовательских интерфейсов, эргономике, образовании и медицине.

Abstract: Theories of human working memory, its functional limitations, brain mechanisms, and quantitative assessment methods are described. The central role of working memory in human performance of complex activities is shown. Directions for the application of working memory research results in user interface design, ergonomics, education, and medicine are outlined.

Ключевые слова: рабочая память, мозговые механизмы, ограничения обработки информации, когнитивные технологии.

Keywords: working memory, brain mechanisms, information processing limitations, cognitive technologies.

Под рабочей памятью в когнитивной науке понимается система оперативного хранения и манипуляции информацией для обеспечения целенаправленного поведения. Впервые появившись в работе [1], понятие рабочей памяти в дальнейшем получило широкое распространение благодаря серии исследований британского психолога Алана Бэддели [2]. В течение последних десятилетий понятие рабочей памяти практически полностью вытеснило использовавшееся в ранних моделях памяти человека понятие кратковременной памяти. Ежегодно в мире проводятся тысячи исследований, посвященных проблеме изучения рабочей памяти, а многие специалисты отводят этому понятию одно из центральных мест в современных когнитивных теориях общего назначения. Это связано с пониманием рабочей памяти как основного «рабочего пространства», в котором осуществляется сознательная когнитивная деятельность человека [3], а также с растущим пониманием того, что именно функциональные ограничения рабочей памяти определяют характерные для человека ограничения скорости и объема обработки информации [4].

Теории рабочей памяти. Сегодня в когнитивной науке активно используется ряд взаимодополняющих концепций рабочей памяти [5]. Основной теоретической моделью является разработанная А. Бэддели компонентная модель рабочей памяти. Она

включает в себя несколько ограниченных по объему систем оперативного хранения модально-специфичной и амодальной информации, а также контролирующую инстанцию – «центральный исполнитель». Функциями центрального исполнителя является манипуляция информацией в системах оперативного хранения, поиск и

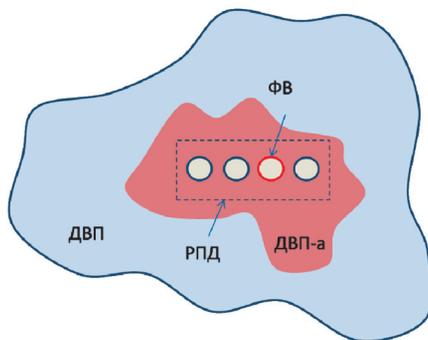


Рис. 1. Схематическое изображение областей хранения в гибридных моделях рабочей памяти. ФВ – фокус внимания, РПД – регион прямого доступа, ДВП-а – активированная долговременная память, ДВП – долговременная память.

загрузка информации из долговременной памяти в системы оперативного хранения, а также управление процессами внимания. В большом классе альтернативных теоретических моделей не делается жесткого различия между рабочей и долговременной памятью. Рабочая память в них рассматривается как множество элементов долговременной памяти, активация которых превы-

шает пороговый уровень. Гибридные модели выделяют в структуре рабочей памяти функционально различные области: *фокус внимания, регион прямого доступа и активированную часть долговременной памяти.* В фокусе внимания удерживается непосредственно обрабатываемая информация. Регион прямого доступа резко ограничен по объему хранения, однако хранящаяся там информация может быть практически мгновенно загружена в фокус внимания. Активированная часть долговременной памяти не имеет ограничений по объему хранения, однако хранящаяся там информация подвержена распаду и интерференции. Ее загрузка в фокус внимания для последующей обработки требует некоторого «когнитивного усилия» (рис. 1).

Отличительными свойствами рабочей памяти являются ограниченность объема максимально удерживаемой информации и ненадежность хранения информации. Анализ накопленных за последние десятилетия данных показывает, что в среднем человек способен удерживать не более 3 – 5 единиц информации [6]. Эта величина ниже «магического числа» (7 ± 2), обычно используемого для грубой оценки объема оперативного хранения. Ненадежность хранения информации проявляется в ее крайне быстром распаде в отсутствие реактивации. Например, максимальный период сохранения вербальной информации составляет около 2 секунд, а типичным способом ее



реактивации является субвокальное «проговаривание». В общем случае предполагается, что реактивация информации требует ее кратковременного помещения в «фокус внимания».

Мозговые механизмы рабочей памяти сегодня интенсивно изучаются на человеке и высших приматах. Неоднократно показывалась ведущая роль префронтальных отделов коры головного мозга в обеспечении функций рабочей памяти. Новым интересным предметом исследований является изучение связей между функциями рабочей памяти и структурами мозга, которые до сих пор ассоциировались скорее с функциями долговременной памяти. Например, прове-

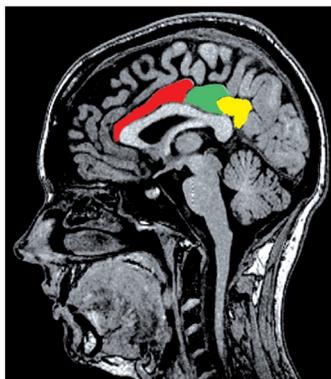


Рис. 2. Области цингулярной коры больших полушарий, размеры которых коррелируют с эффективностью выполнения заданий на рабочую память. Красный – передняя, зеленый – задняя, желтый – ретроспленальная цингулярная кора.

денное нами методом магнитно-резонансной морфометрии исследование [7] показало наличие многочисленных связей между площадью разных отделов цингулярной коры, гиппокампа, некоторых подкорковых структур и эффективностью оперативного хранения информации (рис. 2). Эти результаты подкрепляют развиваемые сторонниками гибридных моделей представления о существовании в структуре рабочей памяти функционально и анатомически различных подсистем хранения.

Методы измерения и диагностики. Диагностика характеристик рабочей памяти может быть осуществлена с помощью специализированных когнитивных заданий. Например, в заданиях на определение «простого объема» рабочей памяти устанавливается максимальное количество элементов (цифр, букв, и т.д.), которое испытуемый может безошибочно воспроизвести сразу после предъявления. Широко используются методы определения «сложного объема», в которых задача запоминания информации сочетается с достаточно сложной дополнительной задачей. Например, задача запоминания нескольких (обычно от 2 до 7) букв

может сочетаться с задачей определения истинности простого уравнения. Показатели сложного объема обычно ниже показателей простого объема и гораздо лучше последних коррелируют с показателями успешности выполнения интеллектуально сложной деятельности.

Другим часто используемым заданием на оценку функций рабочей памяти является задание N-Back, в котором испытуемому последовательно предъявляются случайно отобранные стимулы, а испытуемый должен обнаруживать случаи, когда предъявляемый стимул совпадает с N-ым предшествовавшим стимулом. Например, в задаче 1-back испытуемый должен реагировать на совпадение предъявляемого стимула с предпоследним стимулом, в задаче 2-back – на совпадение с пред-предпоследним стимулом и т.д. Несмотря на кажущуюся простоту, уже в варианте 4-back это задание оказывается практически невыполнимым для большинства испытуемых, что является яркой демонстрацией ограничений рабочей памяти человека.

Альтернативой когнитивным тестам является регистрация характеристик, реализующих функции рабочей памяти психофизиологических процессов. Многолетние исследования показывают возможность определения уровня нагрузки на рабочую память на основе анализа частотного спектра электроэнцефалограмм (ЭЭГ). Перспективным представляется использование недавно обнаруженного специфического усиления мощности фронто-медиального тета-ритма (5-7 Гц) в ответ на увеличение нагрузки на рабочую память [8]. Источник этого сигнала предполагается в передне-дорсальном отделе цингулярной коры, что хорошо согласуется с

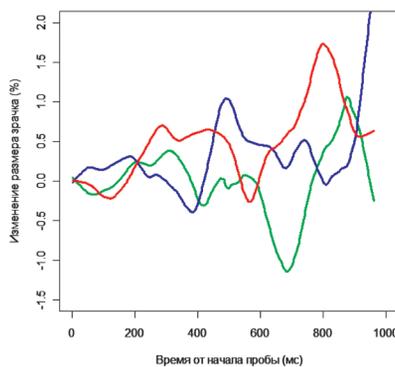


Рис. 3. Зависимость динамики размера зрачка от количества удерживаемых в рабочей памяти элементов при поиске в рабочей памяти (зеленая линия – 4 элемента, синяя – 5 элементов, красная – 6 элементов).

полученными нами результатами об участии различных отделов цингулярной коры в осуществлении функций рабочей памяти.

Методы регистрации ЭЭГ относительно инвазивны, так как требуют наложения электродов. Они также подвержены возникновению артефактов даже при незначительных движениях человека. Перспективной альтернативой для мониторинга активности рабочей памяти, в контексте реальной деятельности, является регистрация размера зрачка, имеющего богатую историю использования, как показателя интенсивности когнитивной обработки [9]. Сегодня регистрация и анализ размера зрачка существенно облегчены наличием доступных технологий бесконтактной видео-регистрации движений глаз. В одном из наших исследований было обнаружено характерное увеличение амплитуды и латентного времени пикового изменения размера зрачка при увеличении нагрузки на рабочую память (рис. 3). В целом, задача регистрации характеристик рабочей памяти человека в ходе осуществления им реальной деятельности еще далека от решения и требует разработки новых технологических решений в области малоинвазивной регистрации психофизиологических показателей.

Рабочая память и выполнение сложной деятельности. Рабочая память как система оперативного хранения и изменения когнитивных репрезентаций обеспечивает выполнение интеллектуальных ответственных операций. Она необходима для синтеза поступающей через сенсорные системы информации, мониторинга ситуации, планирования действий, принятия решений, отслеживания прогресса в достижении целей, обеспечения работы в условиях многозадачности. Многочисленные исследования показывают наличие выраженных корреляций объема рабочей памяти человека с успешностью выполнения им различных видов сложной деятельности – понимания сложных текстов и инструкций, овладения иностранными языками и языками программирования, управления сложными техническими системами и т.д. [4].

Индивидуальные характеристики рабочей памяти также выражено коррелируют с текущим интеллектом (до 50% разделенной дисперсии). Под текущим интеллектом понимается способность человека находить решения новых, сложных и нестандартных задач, что отличает его от кристаллизованного интеллекта – наличия формальных знаний и навыков, позволяющих быстро применять типовые решения к стандартным задачам. Например, на выборке студентов ВУЗов г. Москвы нами была обнаружена корреляция более +0,7 ($p < 0,01$) между объемом рабочей памяти и текущим интеллектом. Таким образом, возникшее в результате фундаментальных исследований



понятие рабочей памяти, сегодня, позволяет изучать различные формы практически значимой деятельности человека, опираясь на единую терминологию и знания о когнитивных и мозговых механизмах хранения и обработки информации. Это открывает дорогу широкому применению современных теорий рабочей памяти для решения прикладных задач.

Практические приложения. Важной прикладной проблемой сегодня является организация эффективного взаимодействия между человеком и компьютером. Одной из важнейших детерминант эффективности человеко-компьютерного взаимодействия является уровень нагрузки на рабочую память пользователя. Особенно остро проблема снижения нагрузки на рабочую память пользователей встает при проектировании интерфейсов мобильных вычислительных устройств. Это связано как с особенностями самих мобильных устройств (небольшие размеры экрана увеличивают количество информации, которую пользователь должен «держать в уме»), так и с особенностями контекста их использования (ресурсы рабочей памяти разделяются между задачей взаимодействия с интерфейсом и задачей мониторинга среды). Например, проведенное нами исследование эффективности навигации пользователей в меню симулированного мобильного телефона показало, что дополнительная нагрузка на рабочую память приводит к замедлению навигации. Она также приводит к повышению вероятности совершения пользователем ошибок («лишних переходов») в случаях, когда достижение целевой команды требует нескольких переходов между уровнями меню. В рамках итеративного процесса разработки пользовательского интерфейса представляется перспективным использовать снижение уровня нагрузки на рабочую память пользователя как один из критериев оптимизации интерфейса. Такое снижение может быть эмпирически установлено в ходе тестирования пользователей, например, с помощью регистрации психофизиологических показателей активности рабочей памяти.

Понятие рабочей памяти может быть плодотворно использовано и в прикладных работах в области эргономики и инженерии человеческого фактора. Это связано с тем, что индивидуальные характеристики рабочей памяти во многом определяют потенциально достижимый оператором сложных технических систем уровень осознания ситуации (situation awareness) – способности оператора понимать текущее состояние системы, а также прогнозировать развитие событий на временных интервалах,

достаточных для предупреждения развития опасных ситуаций [10]. Объем рабочей памяти оператора напрямую связан с вероятностью достижения им полного осознания ситуации, особенно, у операторов с небольшим опытом работы [11]. В силу этого, оценка индивидуальных особенностей рабочей памяти является эффективным и малозатратным способом отбора будущих операторов, а определение нагрузки на рабочую память оператора, в ходе выполнения симулированных сценариев, позволяет повышать качество прогнозов надежности работы операторов в штатных и нештатных ситуациях. Регистрация психофизиологических показателей активности рабочей памяти является перспективным элементом разрабатываемых сегодня нейроэргономических когнитивных технологий, позволяющих повышать надежность работы систем человек-техника на основе учета функционального состояния оператора.

Ограничения рабочей памяти также определяют эффективность овладения знаниями при различных формах обучения. Например, исследования показывают низкую эффективность овладения знаниями людьми с невысоким объемом рабочей памяти, при использовании гипертекстовых мультимедийных обучающих систем [12]. Снижение эффективности обучения на основе таких систем связано с перегрузкой рабочей памяти учащегося, который не только вынужден осмысливать большое количество разнородной информации, но и решать дополнительную задачу по ориентации в сложной структуре организации материала. Таким образом, без учета возможных особенностей рабочей памяти учащихся создание гипертекстовых мультимедийных обучающих систем может быть контрпродуктивным.

Большое практическое значение также имеет диагностика и компенсация нарушений рабочей памяти, сопровождающих различные заболевания. Выраженные дефициты рабочей памяти характерны для шизофрении, депрессии, аутизма, синдрома дефицита внимания и гиперактивности. Нарушения этой центральной когнитивной функции приводят к невозможности самостоятельной организации большим своей жизни и резкому снижению ее качества. Постепенное ослабление рабочей памяти также является характерным признаком «нормального когнитивного снижения» – постепенного ослабления когнитивных функций у здоровых людей, проявляющегося, начиная примерно с 40-летнего возраста. Сегодня имеются свидетельства тому, что специализированные программы тренировки функций рабочей памяти могут быть

эффективным средством компенсации когнитивных дефицитов при непатологическом старении, а также некоторых когнитивных нарушений при патологиях [13]. Создание психологических, физических и фармакологических методов компенсации нарушений функций рабочей памяти представляется сегодня многообещающим направлением прикладных разработок в области повышения качества жизни людей с когнитивными нарушениями. Разработка подобных воздействий может также помочь преодолеть имеющиеся у людей «в норме» когнитивные ограничения и повысить эффективность и надежность выполнения ими сложных видов деятельности.

Подготовка статьи осуществлена при поддержке РФФИ, грант № 11-06-00343-а.

Литература:

1. Миллер Дж., Галантер Ю., Прибрам. К. Планы и структуры поведения. М.: Прогресс, 1985.
2. Baddeley A.D. Working memory. New York: Oxford University Press, 1986.
3. Величковский Б.М. Когнитивная наука. Основы психологии познания. В 2 т. М.: Издательский центр «Академия», 2006.
4. Клингберг Т. Перегруженный мозг. Информационный поток и пределы рабочей памяти. М.: Ломоносовъ, 2010.
5. Баддли А., Айзенк М., Андерсон М. Память. СПб.: Питер, 2011
6. Cowen N. The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. Behavioral and Brain Sciences, 2001, 24, 87-114.
7. Козловский С.А., Величковский Б.Б., Вартанов А.В., Никонова Е.Ю., Величковский Б.М. Роль областей цингулярной коры в функционировании памяти человека. // Экспериментальная психология. - 2012. - Т.5. - №1. - С. 12-22.
8. Onton J., Delorme A., Makeig S. Frontal midline EEG dynamics during working memory. NeuroImage, 2005, 27, 341-356.
9. Канеманн Д. Внимание и усилие. М.: Смысл, 2006.
10. Endsley, M. R. (1995). Measurement of situation awareness in dynamic systems. Human Factors, 37, 65-84.
11. Gonzalez C., Wimisberg J. (2007). Situation awareness in dynamic decision-making: Effects of practice and working memory. Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, 1, 56-74.
12. DeStefano D., LeFevre J.-A. Cognitive load in hypertext reading: A review. Computers in Human Behavior, 2007, 23, 1616-1641.
13. Величковский Б.Б. Возможности когнитивной тренировки как средства коррекции возрастных изменений когнитивного контроля // Экспериментальная психология. – 2009. – Т. 2. – № 4. – С. 67-91.

velichkovsky_bb@rrcki.ru