

СТРУКТУРА РАБОЧЕЙ ПАМЯТИ: ЭФФЕКТЫ УВЕЛИЧЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ, УСЛОЖНЕНИЯ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРФЕРЕНЦИИ¹

© 2015 г. Б. Б. Величковский*, Е. Ю. Никонова**, М. А. Румянцев***

* Кандидат психологических наук, доцент,
факультет психологии МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва;
Зав. лабораторией, НБИКС-центр НИЦ “Курчатовский институт”, Москва;
e-mail: velitchk@mail.ru

** Лаборант, факультет психологии МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва;
e-mail: eniconova@mail.com

*** Инженер-исследователь, НБИКС-центр НИЦ “Курчатовский институт”, Москва;
e-mail: rumyantsev_ma@nrcki.ru

Исследовалось влияние количества удерживаемой в рабочей памяти информации, сложности когнитивной обработки и интерференции на объём рабочей памяти. Предполагалось, что в структуре рабочей памяти возможно выделение независимых, функционально различных компонентов, связанных с хранением и обработкой информации. В трёх экспериментах приняли участие 36 человек. Варьировались количество информации, интерференция и сложность обработки. Обнаружен эффект количества информации, проявляющийся в снижении эффективности хранения информации при увеличении её количества. При увеличении количества информации усиливалось негативное влияние интерференции на эффективность хранения информации. Результаты свидетельствуют о возможности выделения в структуре рабочей памяти высоконадежной системы хранения ограниченного объёма (регион прямого доступа), двух компонентов, по-разному чувствительных к действию интерференции (регион прямого доступа и активированная часть долговременной памяти), и независимого компонента, связанного с обработкой активной когнитивной репрезентации (фокус внимания).

Ключевые слова: рабочая память, интерференция, сложность обработки, фокус внимания, долговременная память, хранение информации, обработка информации.

Рабочая память может быть определена как “специализированная система кратковременного хранения информации, лежащая в основе процессов мышления человека” [67, с. 829]. Она обеспечивает механизмы для активации сохраненных ранее когнитивных репрезентаций и хранения промежуточных результатов их трансформаций. Ограничения рабочей памяти сегодня рассматриваются как лежащие в основе ограничений когнитивных возможностей человека [1, 4]. Центральная роль функций рабочей памяти в осуществлении “высокоуровневого познания” проявляется в высоких корреляциях между различными показателями её объема, эффективностью самых разных видов интеллектуально сложной деятельности и общим интеллектом [16].

Одним из открытых вопросов в исследованиях рабочей памяти является вопрос о её структуре, о количественном и качественном составе компонентов, обеспечивающих реализацию функций рабочей памяти. Известная модель рабочей памяти А. Бэддели [7] предполагает иерархическую структуру: контролирующая инстанция (“центральный исполнитель”) управляет модально-специфичными системами кратковременного хранения ограниченного объёма. В этой модели рабочая память и долговременная память четко различаются как разные системы памяти. При другом подходе рабочая память понимается как подмножество элементов долговременной памяти, активация которых превышает пороговый уровень (активированная часть долговременной памяти) [12, 14]. Лишь небольшая часть этих элементов непосредственно осознается, образуя фокус внимания [12]. Различение фокуса внима-

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-06-00343-а.

ния и остальных активированных элементов основано обнаружением ряда эмпирических эффектов. Например, объём фокуса внимания не превышает 3–4 элемента [9, 13], что значительно меньше объёма рабочей памяти в целом. Многочисленные прайминг-эффекты свидетельствуют о возможности автоматической активации репрезентаций без их осознания, т.е. включения в фокус внимания [12].

Также предлагается [19] выделять в фокусе внимания два компонента – собственно фокус внимания и регион прямого доступа. Фокус внимания содержит единственный элемент, являющийся предметом текущей когнитивной обработки. Этот элемент “загружается” в фокус внимания из региона прямого доступа, содержащего 3–4 элемента. Такая дифференциация обосновывается тем, что при смене обрабатываемого элемента время обработки увеличивается – новый элемент должен быть сначала “загружен” в фокус внимания. При этом увеличение времени обработки зависит только от количества элементов в регионе прямого доступа. Предполагается, что в отличие от информации в активированной части долговременной памяти информация в регионе прямого доступа не угасает с течением времени и защищена от действия интерференции.

Подобная структура рабочей памяти – фокус внимания, регион прямого доступа, активированная часть долговременной памяти – еще не получила полного эмпирического обоснования. Например, представленные в [19] результаты не являются достаточно общими, так как они получены с использованием специально разработанных экспериментальных заданий. В настоящей работе структура рабочей памяти исследовалась на материале так называемых сложных заданий на определение объёма рабочей памяти (*complex working memory span tasks* [11]). В таких заданиях кратковременное удержание информации сочетается с одновременным выполнением дополнительной когнитивно сложной задачи. Задания этого типа являются сегодня основным средством изучения индивидуальных особенностей рабочей памяти, а получаемые в них оценки объёма рабочей памяти обнаруживают высокие корреляции с показателями общего интеллекта и с показателями эффективности выполнения различных видов сложной деятельности [1]. Тем не менее, задания этого типа до сих пор не использовались при исследовании структуры рабочей памяти.

Для проверки предположения о существовании различных компонентов рабочей памяти может быть использован метод аддитивных факторов

С. Стернберга [22]. Согласно этому методу, различение компонентов или процессов обработки представляется обоснованным, если факторы, селективно влияющие на их работу, не взаимодействуют друг с другом (т.е. их совместный эффект является аддитивным). Для фокуса внимания таким селективно действующим фактором может являться сложность когнитивной обработки. Для активированной части долговременной памяти селективно действующим фактором может являться интерференция. Количество элементов, которые необходимо удерживать в рабочей памяти (нагрузка на рабочую память), влияет в первую очередь на функционирование региона прямого доступа. Однако если нагрузка превышает ограниченный объём региона прямого доступа, то она может влиять и на работу активированной части долговременной памяти. Это позволяет ожидать взаимодействия факторов интерференции и нагрузки.

Таким образом, *теоретическая гипотеза* заключалась в предположении о существовании в структуре рабочей памяти трех независимых компонентов, связанных с хранением и обработкой информации: фокуса внимания, региона прямого доступа и активированной части долговременной памяти, различающихся по объёму хранимой информации и надежности её хранения.

Целью данной работы было исследование влияния количества удерживаемой в рабочей памяти информации, сложности когнитивной обработки и интерференции на эффективность выполнения различных сложных заданий на определение объёма рабочей памяти.

Исследовательские гипотезы: предполагается, что при выполнении заданий на определение объёма рабочей памяти могут быть обнаружены (1) эффект количества информации; (2) взаимодействие количества информации и интерференции; (3) статистически незначимое взаимодействие сложности обработки и количества информации; (4) статистически незначимое взаимодействие сложности обработки и интерференции; (5) статистически незначимое взаимодействие трех экспериментальных факторов. Предположения о значимости эффектов факторов сложности и интерференции не выдвигались.

Обоснование дифференциации в структуре рабочей памяти указанных компонентов позволит по-новому взглянуть на проблему взаимодействия долговременной и рабочей памяти, а также на природу ограничений объёма рабочей памяти. Актуальность этой проблематики обусловлена важной ролью ограничений рабочей памяти в

осуществлении разных видов сложной деятельности [4, 7, 14]. В данной работе исследование структуры рабочей памяти впервые осуществлено с помощью манипуляции факторами, селективно влияющими на её возможные компоненты, на материале заданий на определение сложного объёма рабочей памяти.

МЕТОДИКА

Общая характеристика исследования. В соответствии с целью исследования были проведены три эксперимента с использованием различных сложных заданий на определение объёма рабочей памяти. Выбор заданий указанного типа был обусловлен тем, что в настоящее время они являются своего рода “эталоном” при изучении рабочей памяти у человека (см. обзор в [11]). Последовательное проведение трех экспериментов с использованием сходных по структуре, но разных по содержанию заданий на определение объёма рабочей памяти было направлено на получение результатов высокой степени общности, которые нельзя было бы объяснить особенностями конкретных заданий. В первых двух экспериментах использовались задание на определение “объёма счета” (*counting span task*, [10]) и задание на определение “объёма операций” (*operation span task*, [23]), которые широко используются в современных исследованиях рабочей памяти [1]. В этих заданиях кратковременное удержание информации сочетается с выполнением нетривиальной дополнительной задачи (зрительный поиск и верификация простых арифметических уравнений, соответственно). В третьем эксперименте использовалось задание на определение объёма оценки четности (*parity judgment span task*, [18]). В этом задании используется очень простая дополнительная задача (определение четности/нечетности цифр). Методическим преимуществом этого задания является то, что выполнение дополнительной задачи не требует от участника специальных навыков (например, навыков выполнения арифметических операций “в уме”) [9]. Следовательно, получаемые в этом задании оценки объёма рабочей памяти должны быть в меньшей степени искажены действием побочных факторов.

Каждое задание состояло в последовательном предъявлении набора элементов, которые участник должен был воспроизвести в *правильном порядке* сразу после окончания предъявления набора. Предъявление каждого элемента сочеталось с выполнением участником дополнительной задачи. В каждом эксперименте осуществлялась манипу-

Таблица 1. Количество, пол и возраст участников исследования

Эксперимент	Количество (женщины/мужчины)	Возраст		
		Медиана	Минимум	Максимум
1	12 (8/4)	21	19	25
2	12 (12/0)	22	18	25
3	12 (8/4)	22	19	25

ляция количеством запоминаемой информации, сложностью когнитивной обработки, а также интерференцией между запоминаемыми элементами. Количество информации определялось количеством элементов в наборе, которое изменялось от 2 до 6 с целью охватить диапазон возможных индивидуальных различий в объёме региона прямого доступа. Сложность когнитивной обработки определялась трудностью выполнения дополнительной задачи. Интерференция между элементами определялась их сходством. При подборе материала для запоминания, дополнительных заданий и манипуляции интерференцией мы ориентировались на существующую практику применения заданий на определение сложного объёма рабочей памяти. Зависимой переменной являлась средняя точность воспроизведения элементов набора.

Участники исследования. Эксперименты проведены на трех независимых выборках участников. Всего в исследовании приняли участие 36 студентов факультета психологии МГУ им. М.В. Ломоносова (28 женщин и 8 мужчин в возрасте от 18 до 25 лет, медиана 22 года). Сведения о поле и возрасте участников приведены в Таблице 1.

Аппаратура. Программирование и предъявление экспериментальных заданий осуществлялись с помощью программного обеспечения для создания психологических экспериментов *E-Prime 2.0 Professional*. Экспериментальные задания предъявлялись на ЖК-мониторе (с диагональю 20 дюймов) персонального компьютера.

Процедура. Эксперименты проводились по внутрисубъектной схеме 2×2×5. Количество элементов в наборе изменялось от 2 до 6 по схеме 2-3-4-5-6-6-5-4-3-2. Процедура каждого эксперимента включала в себя выполнение тренировочных заданий и отдых участников между экспериментальными условиями. Участники фиксировали свои ответы самостоятельно в специально подготовленных бланках. Ответы участников на дополнительные задания фиксировались эксперимен-

татором (в эксперименте 3 регистрация ответов осуществлялась автоматически).

Обработка и анализ данных. Для оценки точности воспроизведения для каждого предъявленного набора рассчитывалась относительная частота полностью верных воспроизведений его элементов. Под полностью верным воспроизведением понималось воспроизведение элемента в правильной позиции. Таким образом, зависимая переменная представляла собой долю от целого и могла изменяться от 0 до 1. В соответствии с рекомендациями по анализу частотных данных [6, 25], зависимая переменная была подвергнута арксинус-трансформации, $y' = \arcsin(\sqrt{y})$. Анализ соответствия распределений нормальному закону осуществлялся с помощью критерия Колмогорова–Смирнова. Статистическая значимость эффектов экспериментальных факторов и их взаимодействий определялась с помощью дисперсионного анализа с повторными измерениями. Анализ попарных различий осуществлялся с помощью непараметрического критерия Вилкоксона. Обработка и анализ данных осуществлялись в статистическом пакете SPSS 17. Нулевые гипотезы отклонялись при $p < .05$.

Эксперимент 1

Процедура исследования. В эксперименте использовалось задание на определение объема счета (*counting span* [10]). Участнику предъявлялась последовательность экранов, на которых в случайном порядке были расположены простые геометрические фигуры. Задача участника состояла в подсчете количества определенных (целевых) фигур и игнорировании дистракторов. При предъявлении каждого нового экрана участник должен был “в уме” сосчитать количество целей и произнести результат вслух. После предъявления всех экранов в наборе, участник должен был воспроизвести количество целей на каждом из предъявленных экранов в порядке их предъявления. Таким образом, в этом задании задача подсчета целей сочеталась с задачей сохранения результатов подсчета. Если экран был последним в наборе, то участнику в центре экрана предъявлялся знак вопроса, что служило сигналом к заполнению бланка ответов. Выполнению эксперимента предшествовала тренировка с наборами величиной 2 и 3 элемента.

Независимые переменные. Манипуляция сложностью обработки задавалась особенностями различия целевых стимулов и дистракторов. В условиях с низкой сложностью использова-

лись только два вида стимулов – круги (цели) и квадраты (дистракторы) со штриховкой одинаковой ориентации. В условиях с высокой сложностью использовалось три вида стимулов: целевые стимулы – круги, дистракторы-квадраты и дистракторы-круги, отличавшиеся от целевых стимулов ориентацией штриховки. При низкой сложности обработки обнаружение целей могло опираться на автоматизмы внимания, в то время как при высокой сложности обнаружение целей осуществлялось с помощью последовательного поиска, в ходе которого затрачивались дополнительные время и усилия.

Манипуляция интерференцией между запоминаемыми элементами информации (результаты подсчета целей) основывалась на эффекте расстояния [24]. Эффект заключается в лучшей субъективной различимости чисел, расположенных дальше друг от друга на субъективной числовой оси. Например, числа 4 и 9 различаются лучше, чем числа 4 и 6. В условиях с низкой интерференцией количество целей на каждом экране принадлежало множеству {1, 2, 5, 8, 9}. В условиях с высокой интерференцией количество целей на каждом экране принадлежало множеству {1, 2, 3, 4, 5}.

Порядок предъявления экспериментальных условий, заданных комбинацией уровней сложности обработки и интерференции, варьировался кросс-индивидуально по схеме несбалансированного латинского квадрата. Каждая из 4 последовательностей экспериментальных условий предъявлялась 3 участникам (2 женщины, 1 мужчина) с целью контроля возможных взаимодействий эффектов последовательности с полом участников. Количество элементов в наборе варьировалось внутрисубъектно по схеме позиционного уравнения (2-3-4-5-6-6-5-4-3-2). Таким образом, в ходе эксперимента для каждого участника было осуществлено 160 измерений. Всего в эксперименте было проведено 1920 измерений.

Эксперимент 2

Процедура исследования. В эксперименте использовалось задание на определение объема операций (*operation span* [23]). В нём задача удержания в рабочей памяти набора согласных сочеталась с задачей верификации простых уравнений. Участнику предъявлялась последовательность экранов. В центре каждого экрана располагалась согласная буква, которую необходимо было запомнить. Под буквой располагалось простое арифметическое уравнение вида $A \otimes B \oplus C = D$.

Первая операция (\otimes) была мультипликативной (умножение или деление), а вторая операция (\oplus) была аддитивной (сложение или вычитание). Верификация уравнения заключалась в определении значения левой части уравнения (“истинный ответ”) и его сравнении с правой частью уравнения (“предлагаемый ответ”, D). Например, истинным является уравнение $4 \times 2 - 3 = 5$ (левая часть уравнения равна его правой части), а уравнение $2 \times 3 + 1 = 5$ является ложным. В качестве операндов использовались только положительные числа от 1 до 9. Истинный и предлагаемый ответ также всегда находились в пределах от 1 до 9. Не предъявлялись уравнения, содержащие операции с 1, а также операции с одинаковыми операндами в силу вероятного использования альтернативных правил поиска решения в этих случаях [17].

При предъявлении каждого нового экрана участник должен был назвать вслух согласную, а затем верифицировать уравнение и произнести результат верификации вслух (сказав “верно”, если уравнение было истинным, и “неверно”, если оно было ложным). Если экран был последним в наборе, то в центре экрана предъявлялся знак вопроса, что служило сигналом к заполнению бланка ответов. Выполнению эксперимента предшествовала тренировка (с наборами величиной 2 и 3 элемента).

Независимые переменные. Манипуляция сложностью обработки задавалась трудностью верификации уравнения. Использовались два эмпирически хорошо обоснованных эффекта сложности [17]: “эффект величины” (использование операндов, равных 5 и более) и “эффект четности” (для ложных уравнений несовпадение четности истинного и предлагаемого ответов облегчает принятие правильного решения).

Манипуляция интерференцией основывалась на эффекте фонологического сходства [7] – снижении эффективности кратковременного хранения фонетически близких звуков. Этот эффект во многом обусловлен совпадением акустических признаков удерживаемого материала [21]. В условиях с высокой интерференцией согласные для запоминания отбирались случайно из множества {Б, П, К, Г, Д, Т, В, Ф}. В условиях с низкой интерференцией это множество согласных было дополнено множеством {М, Н, Л, Р, Ж, Ш, Х, Ц}. Таким образом, в условиях с низкой интерференцией разнообразие элементов было выше. Кроме того, множество согласных в условиях с высокой интерференцией содержало только шумные согласные (взрывные и щелевые). Множество согласных в условиях с низкой интерференцией содержало и

согласные-сонанты (М, Н, Л, Р), выраженно отличающихся акустически от шумных согласных [3].

Интерференция варьировалась по схеме позиционного уравнивания (низкая-высокая-высокая-низкая), которая была одинаковой для всех 12 участников. Сложность обработки варьировалась случайным образом (предъявляемое уравнение случайно выбиралось из всего множества уравнений, половина уравнений были сложными, половина – простыми для обработки). Количество информации варьировалось по схеме позиционного уравнивания (2-3-4-5-6-6-5-4-3-2). Таким образом, для каждого участника было осуществлено 160 измерений. Всего в эксперименте было проведено 1920 измерений.

Эксперимент 3

Процедура исследования. Экспериментальное задание представляло собой незначительно модифицированное задание на определение объема четности (*continuous parity judgment span* [18]). В этом задании задача удержания набора согласных сочеталась с задачей определения четности цифр, предъявляемых с достаточно высокой скоростью.

В центре экрана в течение 1200 мс предъявлялась согласная. Участник должен был назвать её вслух. Затем последовательно предъявлялись от 3 до 5 цифр. Участник должен был определять четность каждой цифры, нажимая клавишу на клавиатуре (“z” – для нечетных цифр, “?” – для четных). Если элемент был последним в наборе, то после предъявления последней цифры в центре экрана предъявлялся знак вопроса, служащий сигналом к заполнению бланка ответов. Выполнению эксперимента предшествовала тренировка определения четности и тренировка выполнения экспериментального задания в целом (с наборами величиной 2 и 3 элемента). Важным отличием Эксперимента 3 от Экспериментов 1 и 2 было то, что стимуляция предъявлялась в нём с фиксированной скоростью, которая не зависела от скорости выполнения дополнительной задачи участником.

Независимые переменные. Манипуляция сложностью дополнительного задания задавалась скоростью предъявления цифр. В условиях с низкой сложностью каждая цифра предъявлялась на 1000 мс. В условиях с высокой сложностью время предъявления составляло 800 мс. Манипуляция интерференцией осуществлялась как в Эксперименте 2.

Схема предъявления независимых переменных полностью соответствовала схеме, использованной в Эксперименте 1. Как и в Экспериментах 1 и 2, с каждым участником было осуществлено 160 измерений. Всего в Эксперименте 3 было проведено 1920 измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперимент 1. Показатели описательной статистики для зависимых переменных приведены в таблице 2. Средняя точность выполнения нагрузочного задания была достаточно высокой и составила 94%. Распределение этой переменной значимо отличалось от нормального (тест Колмогорова–Смирнова, $Z = 6.38$, $p < .001$). Манипуляция сложностью приводила к снижению точности (с 98% до 90% в среднем). Различия в точности выполнения дополнительной задачи были значимы (критерий Вилкоксона, $Z = 2.81$, $p = .005$), что позволило рассматривать манипуляцию сложностью дополнительной задачи как эффективную.

Для каждого экспериментального условия с помощью критерия Колмогорова–Смирнова была проведена проверка соответствия распределения оригинальных и трансформированных значений точности воспроизведения нормальному закону. Она показала приближение к нормальному распределению для большинства распределений (12 из 20 для нетрансформированных значений, диапазон значений Z от 0.58 до 1.73, диапазон значений p от .01 до .89; 13 из 20 для трансформированных значений; диапазон значений Z от 0.64 до 1.73, диапазон значений p от .01 до .81). С учётом высокой устойчивости дисперсионного анализа к отклонениям от нормального распределения [2], результаты проверки соответствия нормальному закону делают применение этого метода допустимым.

В результате дисперсионного анализа трансформированных значений точности воспроизведения были обнаружены значимые главные эффекты факторов количества информации, $F(4, 44) = 34.9$, $p < .001$, и сложности, $F(1, 11) = 28.0$, $p < .001$. Главный эффект фактора интерференции был незначимым, $F(1, 11) = 0.7$, $p = .434$. Все двухфакторные взаимодействия были незначимыми: взаимодействие количества информации и интерференции, $F(4, 44) = 1.5$, $p = .224$, взаимодействие количества информации и сложности, $F(4, 44) = 1.1$, $p = .378$, взаимодействие сложности и интерференции, $F(1, 11) = 0.8$, $p = .402$. Незначимым было и взаимодействие всех трех факторов, $F(4, 44) = 1.0$, $p = .433$.

Таблица 2. Показатели описательной статистики для точности выполнения дополнительного задания (ТД), абсолютной частоты верных воспроизведений (АЧВ), относительной (ОЧВ) и трансформированной (ТОЧВ) частоты верных воспроизведений в Эксперименте 1

Статистика	ТД	АЧВ	ОЧВ	ТОЧВ
Медиана	1	3	0.83	1.15
Минимум	0.33	1	0.17	0.42
Максимум	1	6	1	1.57
Q_1	0.9	2	0.67	0.96
Q_3	1	3	0.83	1.15

Учитывая обнаруженные для части экспериментальных условий отклонения распределений от нормального закона, попарные сравнения экспериментальных условий проводились с применением непараметрического теста Вилкоксона. Попарное сравнение уровней фактора количества информации показало наличие значимых различий между наборами размером 2 и 3 элемента ($Z = -1.99$, $p = .047$), размером 4 и 5 элемента ($Z = -3.95$, $p < .001$), а также размером 5 и 6 элементов ($Z = -3.11$, $p = .002$).

Полученные результаты соответствуют гипотезе о значимом эффекте количества информации. Отсутствие взаимодействия фактора сложности с другими факторами также соответствует выдвинутым гипотезам. Наличие выраженного эффекта фактора сложности не противоречит выдвинутым гипотезам. Отсутствие взаимодействия количества информации и интерференции противоречит гипотезе.

Эксперимент 2. Показатели описательной статистики для зависимых переменных приведены в таблице 3. Средняя точность выполнения дополнительного задания составила 93 %. Распределение значений значимо отличалось от нормального (тест Колмогорова–Смирнова, $Z = 5.43$, $p < .001$). Величина операндов не влияла на точность верификации уравнений. Манипуляция фактором четности оказала значимое влияние на точность ве-

Таблица 3. Показатели описательной статистики для ТД, АЧВ, ОЧВ и ТОЧВ в Эксперименте 2

Статистика	ТД	АЧВ	ОЧВ	ТОЧВ
Медиана	1	2.76	0.8	1.11
Минимум	0.5	0	0	0
Максимум	1	6	1	1.57
Q_1	0.88	2	0.55	0.84
Q_3	1	2.78	0.8	1.11

Таблица 4. Показатели описательной статистики для ТД, АЧВ, ОЧВ и ТОЧВ в Эксперименте 3

Статистика	ТД	АЧВ	ОЧВ	ТОЧВ
Медиана	0.84	3	0.88	1.21
Минимум	0.35	0.5	0.1	0.32
Максимум	1	6	1	1.57
Q_1	0.73	2	0.67	0.96
Q_3	0.92	4	1	1.57

рификации уравнений: несоответствие четности истинного ответа четности предлагаемого ответа приводило к увеличению точности верификации с 92 % до 97 %. Это различие было значимым (тест Вилкоксона, $Z = 2.41$, $p = .009$). В дальнейшем фактор четности рассматривался как фактор сложности дополнительного задания.

Для каждого экспериментального условия с помощью критерия Колмогорова–Смирнова была проведена проверка соответствия распределения оригинальных и трансформированных значений точности воспроизведения нормальному закону. Как и в предыдущем эксперименте, эта проверка показала отсутствие отклонения от нормального закона в большинстве (14 из 20) экспериментальных условий (для оригинальных значений диапазон значений статистики Z составил от 0.69 до 1.45, диапазон значений p – от .03 до .73; для трансформированных значений диапазон значений статистики Z составил от 0.67 до 1.45, диапазон значений p – от .03 до .76). В результате дисперсионного анализа трансформированных значений точности воспроизведения был обнаружен значимый главный эффект количества информации, $F(4, 44) = 33.4$, $p < .001$, проявляющийся в снижении доли верных ответов при увеличении количества информации. Главные эффекты факторов интерференции и сложности были незначимыми, $F(1, 11) = 1.8$, $p = .179$, и $F(1, 11) = 1.2$, $p = .566$, соответственно. Было обнаружено значимое взаимодействие факторов количества информации и интерференции, $F(4, 44) = 3.2$, $p = .043$. Другие двухфакторные взаимодействия (количества информации и сложности, сложности и интерференции) были незначимыми, $F(4, 44) = 1.0$, $p = .704$, и $F(1, 11) = 0.4$, $p = .619$ соответственно. Незначимым было и взаимодействие всех трех факторов, $F(4, 44) = 2.0$, $p = .222$.

Для обнаруженных значимых эффектов был проведен попарный анализ значимости различий уровней факторов. Значимые различия были обнаружены между наборами размером 2 и 3 элемента ($Z = -3.20$, $p = .001$), 3 и 4 элемента ($Z = -3.49$,

$p = .001$), а также 4 и 5 элементов ($Z = -2.08$, $p = .037$). Попарное сравнение экспериментальных условий показало, что взаимодействие факторов размера и интерференции было связано со значимым различием в точности воспроизведения для наборов размером 3 элемента ($Z = -2.20$, $p = .028$) и размером 6 элементов ($Z = -2.31$, $p = .021$). При этом условие с высокой интерференцией сопровождалось сниженной точностью воспроизведения.

Обнаружение значимого эффекта фактора количества информации согласуется с гипотезами. Отсутствие взаимодействия фактора сложности с другими факторами подтверждает выдвинутую гипотезу о независимости фокуса внимания от других компонентов рабочей памяти. Взаимодействие факторов количества информации и интерференции соответствует выдвинутой гипотезе об использовании механизмов долговременного хранения, когда нагрузка на рабочую память превышает объем региона прямого доступа (6 элементов).

Эксперимент 3. Показатели описательной статистики для зависимых переменных приведены в таблице 4. Средняя точность выполнения дополнительного задания составила 81 %. Распределение значений значимо отличалось от нормального (тест Колмогорова–Смирнова, $Z = 1.68$, $p < .01$). Увеличение сложности дополнительного привело к значимому снижению точности её выполнения (с 87% до 75%; тест Вилкоксона, $Z = 2.80$, $p = .005$).

Проверка вновь показала отсутствие отклонения от нормального закона в большинстве (14 из 20) экспериментальных условий (для оригинальных значений диапазон значений статистики Z составил от 0.83 до 1.73, диапазон значений p – от .01 до .50; для трансформированных значений диапазон значений статистики Z составил от 0.82 до 1.73; диапазон значений p – от .01 до .52). В результате дисперсионного анализа трансформированных значений точности воспроизведения были обнаружены значимые главные эффекты факторов количества информации, $F(4, 44) = 54.5$, $p < .001$, и интерференции, $F(1, 11) = 10.2$, $p = .009$. Главный эффект фактора сложности был незначимым, $F(1, 11) = 0.7$, $p = .423$. Было обнаружено значимое взаимодействие факторов количества информации и интерференции, $F(4, 44) = 2.9$, $p = .031$. Другие двухфакторные взаимодействия (количества информации и сложности, сложности и интерференции) были незначимыми, $F(4, 44) = 0.6$, $p > .671$, и $F(1, 11) < 0.1$, $p = .973$, соответственно. Незначимым было и взаимодействие всех трех факторов, $F(4, 44) = 0.7$, $p = .598$.

Попарное сравнение уровней фактора количества информации показало наличие значимых различий между наборами размером 2 и 3 элемента ($Z = -2.22, p = .026$), размером 3 и 4 элемента ($Z = -2.98, p = .003$), а также 5 и 6 элементов ($Z = -3.25, p = .001$). Попарное сравнение экспериментальных условий показало, что взаимодействие факторов размера и интерференции было связано со значимым различием между условием с низкой и высокой интерференцией для наборов размером 3 элемента ($Z = -2.42, p < .016$) и размером 5 элементов ($Z = 2.78, p = .005$). При этом высокий уровень интерференции сопровождался сниженной точностью воспроизведения.

Значимый эффект фактора количества информации и локализация первого выраженного ухудшения точности воспроизведения между 3 и 4 элементом хорошо согласуются с выдвинутой гипотезой о существовании “региона прямого доступа”. Взаимодействие факторов количества информации и интерференции соответствует выдвинутой гипотезе об использовании механизмов долговременного хранения, когда нагрузка на рабочую память превышает объем региона прямого доступа. Характер этого взаимодействия полностью соответствует теоретическим ожиданиям – при увеличении количества элементов в наборе усиление интерференции характеризуется более выраженным снижением точности. Отсутствие взаимодействия фактора сложности с другими факторами подтверждает выдвинутую гипотезу о независимости фокуса внимания от других компонентов рабочей памяти.

С целью облегчить сопоставление результатов, полученных в каждом из проведенных экспериментов, в таблице 5 приведены размеры эффекта и уровень значимости всех экспериментальных эффектов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В проведенных экспериментах получены три основных результата. Во-первых, во всех экспериментах был обнаружен значимый эффект количества удерживаемой в рабочей памяти информации. Как показывают данные описательной статистики, участники успешно справлялись с задачей удерживать небольшое количество элементов (в среднем около 3 элементов). Однако при большем количестве подлежащих хранению элементов точность воспроизведения снижается. Этот результат хорошо согласуется с результатами многочисленных работ, показывающих, что в среднем объем кратковременного хранения не

Таблица 5. Размер эффекта (η^2) и уровень значимости для всех экспериментальных эффектов в Экспериментах 1, 2 и 3 (К – количество информации, С – сложность, И – интерференция, *** – $p < .001$, ** – $p < .01$, * – $p < .05$)

Эффект	η^2		
	Эксперимент 1	Эксперимент 2	Эксперимент 3
К	0.77***	0.78***	0.81***
И	0.06	0.18	0.52**
С	0.73***	0.16	0.07
К×И	0.12	0.25*	0.22*
К×С	0.12	0.09	0.09
И×С	0.06	0.02	0.01
К×И×С	0.08	0.12	0.06

превышает 3–5 элементов [13]. Такие показатели объема кратковременного хранения заметно ниже “магического числа” 7 ± 2 . Они наблюдаются в том случае, когда использование специализированных приемов повышения эффективности кратковременного запоминания (например, вербального проговаривания) невозможно (например, в силу блокирования артикуляции или использования достаточно сложной дополнительной задачи). Таким образом, результаты проведенных нами экспериментов хорошо согласуются с предположением о существовании специализированной системы памяти, обеспечивающей надежное оперативное хранение небольшого количества информации – региона прямого доступа.

Во-вторых, в Экспериментах 2 и 3 было обнаружено значимое взаимодействие между количеством информации и интерференцией. Эти результаты соответствуют предположению о существовании в структуре рабочей памяти двух качественно различных компонентов. Нами предполагалось, что интерференция является фактором, снижающим эффективность воспроизведения из долговременной памяти, но не влияющим на эффективность воспроизведения информации из региона прямого доступа. Поэтому негативное влияние интерференции на точность воспроизведения должно проявляться тогда, когда количество информации превышает объем региона прямого доступа. Именно это и было обнаружено в Экспериментах 2 и 3, а невозможность обнаружить такое взаимодействие в Эксперименте 1 может быть связана с недостаточно эффективной манипуляцией интерференцией или сложностью дополнительной задачи. Эти результаты являются

новыми, так как систематические исследования эффектов интерференции при кратковременном удержании списков элементов разного размера ранее не проводились.

В-третьих, все три эксперимента показали отсутствие значимых взаимодействий между сложностью дополнительной задачи и двумя другими экспериментальными факторами. Результат был получен при использовании различного запоминаемого материала и различных дополнительных задач. Данный результат соответствует представлениям об особом статусе фокуса внимания в структуре рабочей памяти. В фокусе внимания удерживается информация, являющаяся объектом текущей когнитивной обработки. Предполагается, что информация “загружается” в фокус внимания только из региона прямого доступа. Отсутствие значимых взаимодействий сложности обработки (фактора, селективно влияющего на фокус внимания) и остальных экспериментальных факторов свидетельствует об изолированности фокуса внимания от других компонентов рабочей памяти.

Как следует из таблицы 1, половой состав участников Экспериментов 1 и 3, с одной стороны, и Эксперимента 2, с другой стороны, различается, что является фактором, ограничивающим внешнюю валидность проведенного исследования и возможность обобщения полученных результатов. Преимущественное использование в проведенных нами экспериментах участников женского пола требует дополнительных исследований на участниках мужского пола для выявления возможных половых различий. Тем не менее, внутрисубъектная схема проведения всех экспериментов дает основания считать достоверными сами обнаруженные экспериментальные эффекты. Также следует отметить, что, хотя возможности рабочей памяти (например, её объёма) у мужчин и женщин могут различаться, существование значительных различий в механизмах и структуре рабочей памяти у мужчин и женщин представляется маловероятным. Это подтверждается и тем, что нами были получены сопоставимые результаты в Экспериментах 2 и 3, в которых участвовала однородная выборка женщин и смешанная выборка мужчин и женщин, соответственно.

Результаты проведенных экспериментов имеют отношение к решению вопроса о роли интерференции и угасания следа как основных факторов забывания в рабочей памяти [20]. Угасание следа первоначально считалось основным механизмом забывания в рабочей памяти [7]. Исследования в рамках модели временного распределения ресурсов (*time-based resource-sharing model*) также

показывают ведущую роль фактора времени при кратковременном хранении информации [8, 9]. В свою очередь, роль интерференции как фактора забывания в рабочей памяти также обнаружена в эмпирических исследованиях. Например, многолетние исследования Р. Энгле и коллег [14] показали наличие высоких корреляций между способностью к подавлению интерференции и объемом рабочей памяти. Выделение в структуре рабочей памяти функционально различных компонентов позволяет объяснить это противоречие тем, что для них могут быть характерны разные механизмы забывания.

Полученные результаты связаны и с решением проблемы соотношения кратковременной и долговременной памяти. Анатомические структуры, обычно связываемые с реализацией функций долговременной памяти (гиппокамп, поясная извилина), могут вовлекаться в выполнение заданий на кратковременную память [1, 5]. В частности, выполнение задания на оценку объема операций сопровождается специфическим усилением активности участков гиппокампа [15]. Следовательно, оперативное хранение информации на фоне нетривиальной когнитивной обработки опирается на работу структур, связанных с долговременной памятью. Результаты настоящей работы также указывают на то, что ресурсы долговременной памяти активно используются для оперативного хранения информации, не “помещающейся” в систему кратковременного хранения.

Выделение в структуре рабочей памяти компонентов со специфическими функциями и характеристиками позволяет в перспективе выдвигать конкретные гипотезы относительно когнитивных механизмов выполнения различных классов заданий на рабочую память [1]. Например, при выполнении заданий на оценку сложного объема рабочей памяти фокус внимания должен использоваться для выполнения дополнительной задачи, а регион прямого доступа – для хранения возникающих при этом промежуточных результатов и части элементов подлежащего воспроизведению набора. Остальные элементы набора должны храниться в активированной части долговременной памяти. Если задание выполняется в определяемом участником темпе, то возникает возможность использовать приемы, повышающие вероятность воспроизведения из долговременной памяти. Это должно приводить к завышению оценок объема рабочей памяти и, как следствие, снижать корреляцию между объемом рабочей памяти и уровнем интеллекта [11]. В целом, изучение структуры рабочей памяти позволит лучше понять природу

связи между характеристиками рабочей памяти и интеллектуальными способностями человека.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование было направлено на проверку предположения о возможности выделения в структуре рабочей памяти трех независимых компонентов, различающихся по объёму и надежности хранения информации: фокуса внимания, региона прямого доступа и активированной части долговременной памяти. Впервые подобное исследование было проведено на материале выполнения заданий на определение сложного объёма рабочей памяти, широко используемых для оценки индивидуальных особенностей рабочей памяти. Правомерность выделения компонентов рабочей памяти определялась на основе анализа взаимодействий между факторами, предположительно селективно влияющими на отдельные компоненты.

В соответствии с выдвинутыми гипотезами во всех экспериментах был обнаружен значимый эффект количества оперативно удерживаемой информации – при достаточно большом количестве информации эффективность ее оперативного хранения резко снижалась. Это свидетельствует о существовании специализированной системы кратковременного хранения информации небольшого объёма (предположительно, 3–5 элементов), обеспечивающей надежный доступ к актуально используемой информации (“регион прямого доступа”). Во всех проведенных экспериментах было обнаружено, что сложность выполняемых на фоне оперативного хранения информации когнитивных операций не взаимодействует с её количеством и с интерференцией между удерживаемыми элементами. Это говорит об изолированности процессов обработки и хранения информации в рабочей памяти, подтверждая необходимость различения “фокуса внимания” и системы оперативного хранения информации в структуре рабочей памяти. В двух из трех экспериментов было обнаружено взаимодействие количества оперативно хранимой информации и интерференцией. При этом негативный эффект интерференции возникал только при достаточно большом количестве оперативно хранимой информации. Это соответствует представлениям о существовании в структуре рабочей памяти как собственно системы кратковременного хранения (“регион прямого доступа”), слабо чувствительной к действию интерференции, так и системы хранения, использующей механизмы долговременной памяти, чув-

ствительной к действию интерференции (“активированная часть долговременной памяти”).

Результаты проведенных экспериментов подтверждают возможность выделения в структуре рабочей памяти трех компонентов: фокуса внимания, региона прямого доступа и активированной части долговременной памяти. Таким образом, рабочая память имеет неоднородную структуру и состоит из функционально различных компонентов, обеспечивающих оперативное хранение необходимого количества информации и ее использование на фоне выполнения когнитивной обработки разного уровня сложности. Полученные результаты позволяют по-новому взглянуть на проблему структуры рабочей памяти и природу характерных для неё ограничений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Величковский Б.Б., Козловский С.А.* Рабочая память человека: Фундаментальные исследования и практические приложения // *Интеграл*. 2012. Т. 68. № 6. С. 14–16.
2. *Гусев А.Н.* Дисперсионный анализ. М.: УМК “Психология”, 2000.
3. *Касаткин Л.Л.* Современный русский язык: Фонетика. М.: Изд. центр Академия, 2008.
4. *Клингберг Т.* Перегруженный мозг. Информационный поток и пределы рабочей памяти. М.: Ломоносовъ, 2010.
5. *Козловский С.А., Величковский Б.Б., Вартапов 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.
6. *Сидоренко Е.В.* Методы математической обработки в психологии. СПб.: ООО “Речь”, 2000.
7. *Baddeley A.* Working memory: Looking back and looking forward // *Nature Reviews: Neuroscience*. 2003. V. 4. P. 829–839.
8. *Barrouillet P., Bernardin S., Camos V.* Time constraints and resource sharing in adults’ working memory spans // *Journal of Experimental Psychology: General*. 2004. V. 133. P. 83–100.
9. *Barrouillet P., Camos V.* The time-based resource-sharing model of working memory // *The cognitive neuroscience of working memory / Osaka N., Logie R., D’Esposito M. (Eds.)*. Oxford: Oxford University Press, 2007. P. 59–80.
10. *Case R., Kurland M., Goldberg J.* Operational efficiency and the growth of short-term memory span // *Journal of Experimental Child Psychology*. 1982. V. 33. P. 386–404.

11. Conway A., Kane M., Bunting M., Hambrick D., Wilhelm O., Engle R. Working memory span tasks: A methodological review and user's guide // *Psychonomic Bulletin & Review*. 2005. V. 12. № 5. P. 769–786.
12. Cowen N. An embedded-processes model of working memory // *Models of Working Memory. Mechanisms of active maintenance and executive control* / A. Miyake, P. Shah (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 1999. P. 62–101.
13. Cowen N. The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity // *Behavioral and Brain Sciences*. 2001. V. 24. P. 87–114.
14. Engle R. Working Memory Capacity as Executive Attention // *Current Directions in Psychological Science*. 2002. V. 11. P. 19–23.
15. Faraco C., Unsworth N., Langley J., Terry D., Li K., Zhang D., Liu T., Miller L. Complex span tasks and hippocampal recruitment during working memory // *Neuroimage*. 2011. V. 55. № 2. P. 773–787.
16. Kane M., Bleckley M., Conway A., Engle R. A controlled-attention view of WM capacity // *Journal of Experimental Psychology: General*. 2001. V. 130. P. 169–183.
17. Lemaire P., Fayol M. When plausibility judgments supersede fact retrievals: The example of odd-even effect on product verification // *Memory & Cognition*. 1995. V. 23. № 1. P. 34–48.
18. Lepine R., Bernardin S., Barroillet P. Attention switching and working memory spans // *European Journal of Cognitive Psychology*. 2005. V. 17. № 3. P. 329–345.
19. Oberauer K. Access to Information in Working Memory: Exploring the Focus of Attention // *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. 2002. V. 28. № 3. P. 411–421.
20. Portrat S., Barrouillet P., Camos V. Time-Related Decay or Interference-Based Forgetting in Working Memory? // *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. 2008. V. 34. № 6. P. 1561–1564.
21. Schweppe J., Grice M., Rummer R. What models of verbal working memory can learn from phonological theory: Decomposing the phonological similarity effect // *Journal of Memory and Language*. 2011. V. 64. P. 256–269.
22. Sternberg S. The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method // *Acta Psychologica*. 1969. V. 30. P. 276–315.
23. Turner M., Engle R. Is working memory capacity task dependent? // *Journal of Memory & Language*. 1989. V. 28. P. 127–154.
24. Warma S., Schwartz D. The mental representation of integers: An abstract-to-concrete shift in the understanding of mathematical concepts // *Cognition*. 2011. V. 121. P. 363–385.

THE STRUCTURE OF WORKING MEMORY: EFFECTS OF INCREASED INFORMATION LOAD, PROCESSING COMPLEXITY, AND INTERFERENCE

B. B. Velichkovsky*, E. Yu. Nikonova, M. A. Rumyantsev*****

*PhD, assistant professor, psychological department, MSU named after M.V. Lomonosov, Moscow;
head of laboratory, National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow;

** laboratory assistant, psychological department, MSU named after M.V. Lomonosov, Moscow;

*** research engineer, National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow

The effects of working memory load, cognitive processing complexity and interference on working memory span were studied. It was hypothesized that working memory consists of independent functionally distinct components related to information storage and processing. Three experiments with 36 subjects were conducted. Working memory load, interference level and processing complexity were varied. An effect of working memory load was found in that storage effectiveness was reduced with higher load. The negative effect of interference on storage effectiveness increased under increased working memory load. The results indicate that working memory consists of a highly reliable storage system with limited capacity (region of direct access), two components differently sensitive to interference (region of direct access and activated part of long-term memory), and an independent component related to the processing of the active cognitive representation (focus of attention).

Key words: working memory, interference, processing complexity, focus of attention, long-term memory, information storage, information processing.