

# УДЕРЖАНИЕ ВЕРБАЛЬНОЙ И НЕВЕРБАЛЬНОЙ СЕРИЙНОЙ ИНФОРМАЦИИ В РАБОЧЕЙ ПАМЯТИ

А.А. КОРНЕЕВ<sup>a,b</sup>, Д.И. ЛОМАКИН<sup>b</sup>, А.В. КУРГАНСКИЙ<sup>b,c</sup>,  
Р.И. МАЧИНСКАЯ<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1*

<sup>b</sup> *ФГБНУ «Институт возрастной физиологии РАО», 119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 8, корп. 2*

<sup>c</sup> *Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, 119571, Россия, Москва, просп. Вернадского, д. 82, стр. 1*

## Retention of Verbal and Nonverbal Serial Information in Working Memory

A.A. Korneev<sup>a,b</sup>, D.I. Lomakin<sup>b</sup>, A.V. Kyrgansky<sup>b,c</sup>, R.I. Machinskaya<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation*

<sup>b</sup> *FBSSI Institute of Developmental Physiology of the Russian Academy of Education, 8-2 Pogodinskaya Str., Moscow, 119121, Russian Federation*

<sup>c</sup> *Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (The Presidential Academy, RANEPА), 82 build. 1, Prospect Vernadskogo, Moscow, 119571, Russian Federation*

### Резюме

Представлены результаты экспериментального исследования удержания в рабочей памяти (РП) и последующего двигательного воспроизведения серийной информации двух типов — вербальной (последовательности букв) и невербальной (ломаные линии). Серии элементов предъявлялись в двух режимах: статически (единовременно) и динамически (поэлементно). Исследовали влияние режима предъявления последовательностей, их сложности (числа элементов) и времени удержания в РП на точность и латентное время (время реакции) воспроизведения запомненных серий элементов. На 33 взрослых праворуких испытуемых были получены следующие результаты. Оказалось, что точность воспроизведения обоих типов последовательностей качественно сходным образом зависит от режима

### Abstract

This article presents the results of an experimental study of retention in working memory (WM) and subsequent motor reproduction of two types of serial information, verbal (sequence of letters) and non-verbal (broken lines). Series of elements were presented in two modes: statically (all elements are shown simultaneously) and dynamically (the sequence is shown element by element). We investigated the influence of the sequence presentation mode, the sequence complexity (number of its elements) and WM delay period on the accuracy and the latent time (reaction time) of reproduction of the memorized series of elements. The study involved 33 adult right-handed subjects. The following results were obtained. It turned out that the accuracy of reproduction of both types of sequences in a qualitatively

предъявления и количества элементов: она меньше в динамическом режиме и падает с ростом длины последовательности. Использование динамического режима предъявления в большей степени сказывается на точности воспроизведения ломаных линий, чем буквенных последовательностей. Увеличение количества элементов, напротив, больше снижает точность воспроизведения последовательностей букв по сравнению с невербальными последовательностями. Выявлено, что время удержания информации в РП существенно влияет на латентное время двигательного ответа только при воспроизведении ломаных линий, но не буквенных последовательностей. При этом латентное время ответа возрастает при увеличении длины последовательности букв, но не изменяется при увеличении числа сегментов ломаной линии. Полученные результаты указывают на различия в механизмах сохранения и преобразования вербальной и невербальной серийной информации в рабочей памяти. Опираясь на них, можно утверждать, что вербальная информация сохраняется в большей степени как последовательность и при этом претерпевает меньше изменений в процессе ее удержания в рабочей памяти в задачах, связанных с воспроизведением порядка элементов.

*Ключевые слова:* рабочая память, отсроченное воспроизведение, вербальные и невербальные последовательности, время реакции, внутренняя репрезентация.

**Корнеев Алексей Андреевич** — старший научный сотрудник, лаборатория нейропсихологии, факультет психологии, МГУ имени М.В. Ломоносова; старший научный сотрудник, лаборатория нейрофизиологии когнитивной деятельности, ФГБНУ «Институт возрастной физиологии РАО», кандидат психологических наук.

Сфера научных интересов: когнитивная психология, экспериментальная психология, статистические методы обработки данных в психологии.

Контакты: korneeff@gmail.com

similar way depends on the presentation mode and the number of elements: the reproduction is less accurate in the dynamic mode as compared to the static mode, and the accuracy decreases with increasing sequence length in both modes. The use of the dynamic presentation mode has a greater effect on the accuracy of reproduction of broken lines than letter sequences. In contrast, increasing the number of elements reduces the accuracy of letter sequences reproduction more than the accuracy of broken lines reproduction. It was revealed that WM delay period significantly affected the latent time of the motor response only when broken lines but not letter sequences were reproduced. The latent response time increases with an increase in the length of the sequence of letters but does not change with an increase in the number of segments of the broken line. These results points to some differences in the mechanisms of encoding and storage of the verbal and non-verbal serial information in working memory. It seems that verbal information, when compared to non-verbal information, is represented internally to a greater extent as a sequence of elements and, at the same time, undergoes less changes during retention in working memory in the tasks where reproduction of the order of elements is required.

*Keywords:* working memory, delayed reproduction, verbal and nonverbal sequences, reaction time, internal representation

**Aleksei A. Korneev** — Senior Research Fellow, Laboratory of Neuropsychology, Faculty of Psychology, Lomonosov Moscow State University; Senior Research Fellow, Laboratory of Neurophysiology of Cognitive Processes, Institute of Developmental Physiology, PhD in Psychology.

Research Area: cognitive psychology, experimental psychology, neuropsychology, statistical methods in psychology.

E-mail: korneeff@gmail.com

**Ломакин Дмитрий Игоревич** — научный сотрудник, лаборатория нейрофизиологии когнитивной деятельности, ФГБНУ «Институт возрастной физиологии РАО».

Сфера научных интересов: когнитивная нейронаука, психофизиология подросткового возраста, электрофизиология, управляющие функции.  
Контакты: lomakindima4@gmail.com

**Курганский Андрей Васильевич** — ведущий научный сотрудник, лаборатория нейрофизиологии когнитивной деятельности, ФГБНУ «Институт возрастной физиологии РАО»; старший научный сотрудник, лаборатория когнитивных исследований, факультет психологии, ИОН РАНХиГС, доктор биологических наук.

Сфера научных интересов: когнитивная нейронаука, электрофизиология, управление движениями, управляющие функции.  
Контакты: akurg@yandex.ru

**Мачинская Регина Ильинична** — заведующая лабораторией, лаборатория нейрофизиологии когнитивной деятельности, ФГБНУ «Институт возрастной физиологии РАО», доктор биологических наук.

Сфера научных интересов: когнитивная нейронаука, психофизиология, формирование мозговых механизмов когнитивной деятельности в онтогенезе, нейрофизиологические факторы когнитивных дефицитов и отклонений поведения у детей и подростков, электроэнцефалография.

Контакты: reginamachinskaya@gmail.com

**Dmitry I. Lomakin** — Research Fellow, Laboratory of Neurophysiology of Cognitive Processes, Institute of Developmental Physiology.

Research Area: cognitive neuroscience, psychophysiology of adolescents, electrophysiology, executive functions.  
E-mail: lomakindima4@gmail.com

**Andrei V. Kurgansky** — Lead Research Fellow, Laboratory of Neurophysiology of Cognitive Processes, Institute of Developmental Physiology; Senior Research Fellow, Cognitive research lab, Faculty of Psychology, ISS RANEPА (Institute for Social Sciences, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration), DSc in Biology.

Research Area: cognitive neuroscience, electrophysiology, motor control, executive functions.

E-mail: akurg@yandex.ru

**Regina I. Machinskaya** — Head of Laboratory, Laboratory of Neurophysiology of Cognitive Processes, Institute of Developmental Physiology, DSc in Biology.

Research Area: cognitive neuroscience, psychophysiology, development of brain mechanisms of cognitive processes in ontogeny, neurophysiological factors of cognitive deficits in children and adolescents, electroencephalography.

E-mail: reginamachinskaya@gmail.com

В повседневной жизни человек постоянно сталкивается с необходимостью запоминать информацию, организованную как последовательность элементов, т.е. серийную информацию. Такое кратковременное сохранение небольшого объема информации, необходимой для выполнения текущей деятельности, согласно представлениям когнитивной психологии, обеспечивается рабочей памятью (далее — РП) (Baddeley, Hitch, 1974).

Специфика репрезентации вербальной и невербальной информации — одна из важнейших проблем при обсуждении механизмов РП, в том числе в контексте запоминания серийной информации (Ginsburg et al., 2017; Marshuetz, 2005). Следует отметить, что наиболее распространенная модель РП А. Бэддели и Г. Хитча (Baddeley, Hitch, 1974) предусматривает отдельные хранилища для вербальной и невербальной информации: фонологическую петлю (phonological loop), отвечающую за кодирование и хранение вербальной

информации, и зрительно-пространственный «блокнот» (visuospatial sketchpad), в котором удерживается и обрабатывается зрительная невербальная информация. Это разделение остается актуальным по сей день, при этом, если речь идет о серийной информации, то важными составляющими ее репрезентации является не только содержание (сами запоминаемые элементы), но и порядок.

Существуют разнообразные теории, предлагающие различные механизмы хранения порядка серийной информации. Исторически первой является теория ассоциативных цепочек (associative chaining; Ebbinghaus, 1885/1964). Эта теория оказалась неспособной объяснить ряд эмпирических фактов (например, типичные ошибки перестановки местами элементов последовательности) и подвергалась серьезной критике (см. обзор: Marshuetz, 2005).

Более поздние модели предполагают наличие специальных кодов порядка, которые приписываются элементам последовательности. К ним относятся модель иерархического кодирования (hierarchical codes; Burgess, Hitch, 1999) и теория «кодов свойств» (feature codes; Nairne, 1990). Предложена также модель кодирования магнитуды (Magnitude Codes), в рамках которой порядок определяется не дискретными кодами, а скорее «аналоговыми», обозначающими градуальное «предпочтение» порядка выполнения элементов. В разных версиях этой модели предполагается существование градиентного кодирования элементов, определяющего их порядок в последовательности (Farrell, Lewandowsky, 2002; Rhodes et al., 2004; Hurlstone et al., 2014).

Ряд исследований указывают на то, что серийный порядок может храниться отдельно от самих элементов (Marshuetz, 2005; Majerus, 2019). При этом допущении возможно наличие как модально-специфических, так и универсальных способов кодирования и хранения информации о порядке. С одной стороны, получены данные, указывающие на относительную универсальность механизмов сохранения информации о порядке элементов вербальных и невербальных последовательностей (Jones et al., 1995; Ginsburg et al., 2017; см. обзор: Hurlstone et al., 2014). В частности, использование транскраниальной магнитной стимуляции позволило выявить ключевую роль левой надкраевой извилины (supramarginal gyrus) в сохранении порядка элементов последовательностей разного типа — вербальных, двигательных и пространственных (Guidali et al., 2019). С другой стороны, показано, что серийный порядок легче запоминается и воспроизводится при удержании вербального материала, по сравнению с невербальным, что может быть связано с модально-специфическими формами и механизмами репрезентации порядка в рабочей памяти (Gmeindl et al., 2011). Таким образом, вопрос об универсальности механизмов РП при хранении серийно организованной информации вне зависимости от ее модальности, в том числе хранения вербальной и зрительно-пространственной информации, остается открытым.

Исследования показывают, что при запоминании серийной информации важной оказывается не только ее модальность, но и форма предъявления. В частности, возможно предъявление стимула в виде статического объекта или динамической последовательности. Ряд экспериментальных данных указывает

на то, что мозговая организация зрительной РП зависит от того, является ли эта информация статической или динамической. Так, при построении внутренней репрезентации на основе статической пространственной информации, как это имеет место, например, при копировании текста, изменения активности мозга обнаружены преимущественно в задней теменной коре (PPC) (Lehnert, Zimmer, 2008), в то время как при запечатлении динамической зрительной информации наблюдается иная картина. Чувствительные к движению нейроны областей МТ/МСТ, по-видимому, участвуют в системе рабочей памяти у приматов (Kriegeskorte et al., 2003; D'Esposito, Postle, 2015; Donato et al., 2020; Curtis, Sprague, 2021). Интерференция текущей оценки направления движения и внутренней репрезентации движения другого направления, обнаруженная при исследовании на людях, указывает на то, что мозговая система рабочей памяти включает сенсорные области, чувствительные к направлению движения (Kang et al., 2011). Также специфика хранения статической и динамической информации обсуждается, например, в модели Р. Ложи (Logie, 1995), в которой в зрительной рабочей памяти выделяется два блока: зрительный (visual cache), хранящий признаки объекта (форма, цвет и др.), и пространственный (inner cache), сохраняющий информацию о пространственном положении и соотношении объектов, в том числе и информацию о движении (inner scribe). Это разделение подтверждается исследованиями, проведенными на взрослых здоровых испытуемых и испытуемых с локальными повреждениями мозга (Della Sala et al., 1999), а также на детях младшего школьного возраста (Mammarella et al., 2008). Отдельно можно отметить, что вопрос запоминания и воспроизведения статической и динамической информации становится актуальным в свете все более распространенного использования компьютерных технологий. Эта проблематика обсуждается как в контексте тестирования когнитивных функций (Carpenter, Alloway, 2019), так и в контексте электронных форм обучения (Burin et al., 2021).

В наших предыдущих исследованиях (Корнеев, Курганский, 2013, 2014а), анализируя особенности отсроченного воспроизведения (копирования) невербальной серийной информации (ломаных линий), предъявляемых статически и динамически, мы обнаружили: 1) существенное уменьшение времени реакции на звуковой императивный сигнал в обоих режимах при увеличении времени задержки и 2) преимущество статического режима перед динамическим в запоминании зрительно-пространственной серийной информации (испытуемые совершали меньше ошибок и отвечали быстрее). При этом оказалось, что значительное преимущество статического режима при немедленном воспроизведении или минимальном времени удержания в РП исчезает при увеличении времени удержания до трех секунд (Корнеев, Курганский, 2013). По нашему мнению, эти данные указывают на преобразование репрезентаций зрительно-пространственных последовательностей в РП — по всей видимости, происходит переход от специфической к абстрактной, независимой от специфики исходной информации, форме. Такие результаты согласуются с обсуждаемой в литературе моделью динамической переработки информации в РП (dynamic-processing model of WM), согласно которой

репрезентация в ней может преобразовываться, причем изменения могут зависеть от задачи (Rose, 2020).

Еще один фактор, который влияет на воспроизведение серийной информации, хранящейся в РП, — это длина последовательности. В исследованиях обнаружен эффект длины, который выражается в увеличении времени реакции с ростом числа элементов последовательности (см. обзор: Rhodes et al., 2004). Также эффект длины обнаружен в отношении точности ответов: при увеличении длины последовательности растет число ошибок, что характерно как для вербальной информации — слов (см. обзор: Barton et al., 2014) и псевдослов (Brown et al., 2013), так и для невербальной информации (Agam et al., 2005). В настоящем исследовании для оценки особенностей запоминания и воспроизведения вербальных и невербальных последовательностей мы также варьируем длину последовательностей.

Как мы видели, накоплено достаточно много данных о влиянии факторов модальности информации, статического и динамического режима ее предъявления, времени удержания информации в рабочей памяти, а также длины последовательности на особенности сохранения и воспроизведения серийной информации. Однако, как правило, влияние этих факторов исследуется по отдельности.

В рамках нашей работы мы анализируем совместное влияние режима предъявления, длительности удержания и длины последовательности на сохранение в РП вербальной и невербальной серийной информации. Мы предполагаем, что такой анализ позволит получить дополнительные данные об универсальности или, наоборот, специфичности организации РП при удержании вербальной и зрительно-пространственной серийной информации.

## Методика

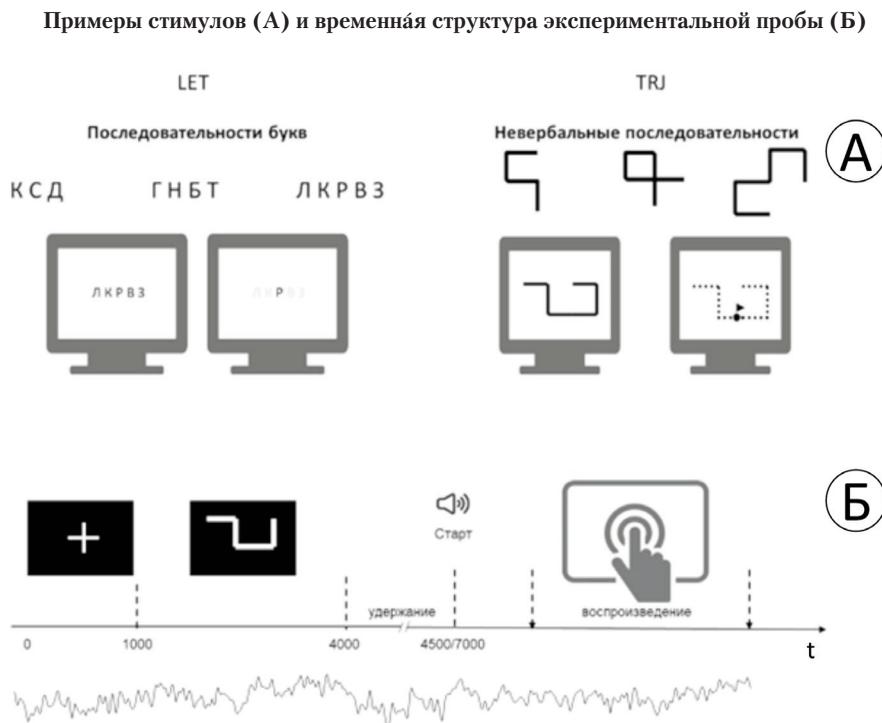
*Испытуемые.* В эксперименте приняли участие 33 взрослых праворуких по самоотчету испытуемых (20 женщин и 13 мужчин) в возрасте от 21 года до 55 лет ( $32.2 \pm 7.9$  года). Все испытуемые давали информированное согласие на участие в исследовании. Протокол эксперимента был одобрен Этическим комитетом ИВФ РАО.

*Стимулы.* В данном исследовании использовалось два вида стимулов<sup>1</sup>: 1) вербальные — наборы согласных букв длиной от 3 до 5 символов, без повторов, далее LET (от «letters»), примеры последовательностей см. рисунок 1А слева; 2) невербальные — незамкнутые ломаные линии, составленные из отрезков, число которых менялось от 4 до 6, далее TRJ (от «trajectory»), примеры см. на рисунке 1А справа.

---

<sup>1</sup> В эксперименте использовался еще один, третий тип стимулов — последовательности цифр, но в рамках данной работы мы решили представить результаты только по двум типам стимулов как наиболее контрастных по степени вербальности/невербальности. Так как стимулы различных типов предъявлялись в отдельных блоках эксперимента, такой вариант кажется нам правомочным.

Рисунок 1



Стимулы предъявлялись в двух режимах — статическом (далее STAT) и динамическом (далее DYN). В статическом режиме вся последовательность предъявлялась целиком на фиксированное время ( $T = 2000$  мс). В случае LET это были строки букв, а в случае TRJ — ломаная линия. В динамическом режиме в задаче LET символы предъявлялись один за другим, слева направо (время экспозиции каждого элемента 500 мс), а в задаче TRJ по невидимому контуру ломаной линии двигалась точка, имитирующая графические движения человека, рисующего такую линию (время движения по каждому отрезку ломаной 500 мс). В качестве императивного сигнала к воспроизведению последовательности использовался короткий тональный звуковой сигнал.

*Задача испытуемого и структура эксперимента.* Испытуемый должен был запоминать и отсроченно (в ответ на задержанный императивный сигнал) воспроизводить два типа последовательностей: набора букв и линий, состоящих из набора отрезков.

Проба была организована следующим образом. Вначале на экране появлялся фиксационный крест, после чего предъявлялась последовательность стимулов для запоминания. Затем с псевдослучайно варьируемой задержкой в 500 или 3000 мс (после окончания последовательности) раздавался звуковой императивный сигнал, в ответ на который испытуемый должен был как можно быстрее и точнее воспроизвести предъявленную последовательность (см. рисунок 1Б).

В случае LET одновременно с императивным сигналом появлялась строка ранее показанных для запоминания символов, перемешанных в случайном порядке. Задача испытуемого состояла в том, чтобы коснуться пальцем изображений букв на сенсорном экране в том порядке, в котором они были предъявлены. В случае TRJ испытуемый в ответ на императивный сигнал должен был нарисовать запомненную траекторию пальцем на сенсорном экране.

Эксперимент состоял из четырех блоков, соответствующих каждому из четырех сочетаний модальности (LET и TRJ) и режима предъявления (статический и динамический). Каждый блок включал в себя 48 проб. Пробы внутри каждого блока содержали последовательности разной длины (по 16 проб для каждой длины): для букв — из трех, четырех и пяти элементов, для траекторий — из четырех, пяти или шести элементов. В половине проб задержка императивного сигнала составляла 500 мс, в половине — 3000 мс, что соблюдалось для последовательностей каждой длины. Порядок последовательностей внутри каждого блока был псевдослучайным, индивидуальным для каждого испытуемого. Порядок выполнения блоков был также псевдослучайным: часть испытуемых сначала выполняли задание по запоминанию вербальных последовательностей, затем невербальных, а часть — наоборот. Каждый из четырех блоков предварялся короткой тренировочной сессией (четыре пробы), содержащей последовательности, не используемые в эксперименте.

Экспериментальная процедура была реализована с использованием пакета Psychtoolbox 3.0 в виде скрипта в вычислительной среде Octave 5.2.0 под управлением операционной системы Linux (дистрибутив Kubuntu). Управляющий скрипт выполнялся на компьютере Lenovo Yoga с сенсорным экраном (диагональ 14 дюймов, разрешение  $1920 \times 1080$ ). Этот скрипт управлял предъявлением стимулов, регистрировал прикосновения и перемещения пальца испытуемого по экрану.

Во время проведения эксперимента испытуемый сидел в кресле в затемненной камере. Сенсорный экран был расположен на таком расстоянии от него, чтобы было удобно рисовать пальцем (50–60 см).

Отметим, что во время эксперимента записывалась электроэнцефалограмма испытуемого, анализ которой не входит в задачи настоящей работы.

*Анализ данных.* Вычислялись и анализировались два показателя: доля правильных ответов (точность) и латентное время двигательного ответа. Для вербального материала правильность ответа определялась автоматически по совпадению воспроизведенной и показанной последовательностей. Правильность воспроизведения траекторий определялась визуально одним из экспериментаторов. Правильными считались последовательности, в которых число элементов и их конфигурация совпадали со стимулом. Латентное время (время реакции, далее RT) измерялось как время, прошедшее от начала императивного сигнала до момента, когда испытуемый покидал стартовую позицию, т.е. начинал движение.

Времена реакции и правильность ответа (для задачи LET) испытуемых в каждой из проб вычислялись с помощью скрипта, созданного в среде Octave. Затем данные усреднялись отдельно для каждой ячейки экспериментального дизайна.

*Статистическая обработка.* Статический анализ проводился в среде R (ver. 4.1.1). Для оценки влияния экспериментальных факторов на точность ответов и время реакции испытуемых использовался дисперсионный анализ для повторных измерений. Для снижения вероятности ошибки проводилась коррекция полученных оценок значимости эффектов для множественного тестирования гипотез по методу Бонферрони-Холма.

### Результаты

Схема дисперсионного анализа включала четыре внутригрупповых фактора: тип стимула (2 уровня — буквы и траектории, далее СТИМУЛ), режим предъявления (2 уровня — статический и динамический, далее РЕЖИМ), время задержки (2 уровня — 500 и 3000 мс, далее ЗАДЕРЖКА) и длина последовательности (3 уровня — 3, 4 или 5 элементов для букв, 4, 5 и 6 — для траекторий, далее ДЛИНА). В качестве зависимых переменных использовались доля правильных ответов и время реакции испытуемых. Результаты дисперсионного анализа представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, в отношении доли правильно воспроизведенных последовательностей значимыми оказались следующие основные эффекты:  
 — РЕЖИМ: точность ответов испытуемых ниже в режиме DYN (рисунок 2Б);

Рисунок 2

Средние значения точности ответов в зависимости от влияния четырех анализируемых факторов. Столбики ошибок — 95%-й доверительный интервал среднего

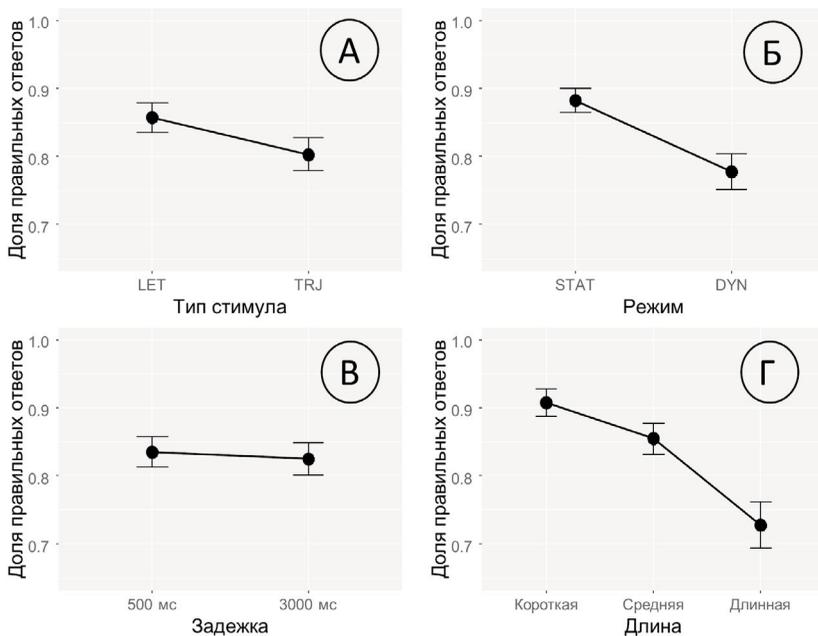


Таблица 1

## Результаты дисперсионного анализа

Эффект	Доля правильных ответов	Время реакции
СТИМУЛ	$F(1, 23) = 4.945, p = 0.363$ ( $p = 0.036$ )*, $\eta_p^2 = 0.177^{**}$	<b><math>F(1, 23) = 16.227, p = 0.006</math></b> ( <b><math>p = 0.001</math></b> ), $\eta_p^2 = 0.414$
РЕЖИМ	<b><math>F(1, 23) = 45.218, p &lt; 0.001</math></b> ( <b><math>p &lt; 0.001</math></b> ), $\eta_p^2 = 0.663$	$F(1, 23) = 2.351, p = 1.000$ ( $p = 0.139$ ), $\eta_p^2 = 0.093$
ЗАДЕРЖКА	$F(1, 23) = 1.100, p = 1.000$ ( $p = 0.305$ ), $\eta_p^2 = 0.046$	<b><math>F(1, 23) = 84.33, p &lt; 0.001</math></b> ( <b><math>p &lt; 0.001</math></b> ), $\eta_p^2 = 0.786$
ДЛИНА	<b><math>F(2, 46) = 53.326, p &lt; 0.001</math></b> ( <b><math>p &lt; 0.001</math></b> ), $\eta_p^2 = 0.699$	<b><math>F(2, 46) = 9.07, p = 0.006</math></b> ( <b><math>p &lt; 0.001</math></b> ), $\eta_p^2 = 0.283$
СТИМУЛ × РЕЖИМ	<b><math>F(1, 23) = 15.368, p = 0.008</math></b> ( <b><math>p = 0.001</math></b> ), $\eta_p^2 = 0.401$	$F(1, 23) = 0.06, p = 1.000$ ( $p = 0.808$ ), $\eta_p^2 = 0.003$
СТИМУЛ × ЗАДЕРЖКА	$F(1, 23) = 0.338, p = 1.000$ ( $p = 0.567$ )**, $\eta_p^2 = 0.014$	<b><math>F(1, 23) = 59.514, p &lt; 0.001</math></b> ( <b><math>p &lt; 0.001</math></b> ), $\eta_p^2 = 0.721$
РЕЖИМ × ЗАДЕРЖКА	$F(1, 23) = 0.265, p = 1.000$ ( $p = 0.612$ ), $\eta_p^2 = 0.011$	$F(1, 23) = 1.791, p = 1.000$ ( $p = 0.194$ ), $\eta_p^2 = 0.072$
СТИМУЛ × ДЛИНА	<b><math>F(2, 46) = 7.237, p = 0.021</math></b> ( <b><math>p = 0.002</math></b> ), $\eta_p^2 = 0.239$	$F(2, 46) = 4.785, p = 0.142$ ( $p = 0.013$ ), $\eta_p^2 = 0.172$
РЕЖИМ × ДЛИНА	<b><math>F(2, 46) = 7.298, p = 0.021</math></b> ( <b><math>p = 0.002</math></b> ), $\eta_p^2 = 0.241$	$F(2, 46) = 2.832, p = 0.692$ ( $p = 0.069$ ), $\eta_p^2 = 0.11$
ЗАДЕРЖКА × ДЛИНА	$F(2, 46) = 0.347, p = 1.000$ ( $p = 0.708$ ), $\eta_p^2 = 0.015$	$F(2, 46) = 0.668, p = 1.000$ ( $p = 0.518$ ), $\eta_p^2 = 0.028$
СТИМУЛ × РЕЖИМ × ЗАДЕРЖКА	$F(1, 23) = 0.262, p = 1.000$ ( $p = 0.613$ ), $\eta_p^2 = 0.011$	$F(1, 23) = 0.21, p = 1.000$ ( $p = 0.651$ ), $\eta_p^2 = 0.009$
СТИМУЛ × РЕЖИМ × ДЛИНА	$F(2, 46) = 0.382, p = 1.000$ ( $p = 0.685$ ), $\eta_p^2 = 0.016$	$F(2, 46) = 2.595, p = 0.767$ ( $p = 0.086$ ), $\eta_p^2 = 0.101$
СТИМУЛ × ЗАДЕРЖКА × ДЛИНА	$F(2, 46) = 0.638, p = 1.000$ ( $p = 0.533$ ), $\eta_p^2 = 0.027$	$F(2, 46) = 0.26, p = 1.000$ ( $p = 0.773$ ), $\eta_p^2 = 0.011$
РЕЖИМ × ЗАДЕРЖКА × ДЛИНА	$F(2, 46) = 2.024, p = 1.000$ ( $p = 0.144$ ), $\eta_p^2 = 0.081$	$F(2, 46) = 0.241, p = 1.000$ ( $p = 0.787$ ), $\eta_p^2 = 0.01$
СТИМУЛ × РЕЖИМ × ЗАДЕРЖКА × ДЛИНА	$F(2, 46) = 0.013, p = 1.000$ ( $p = 0.987$ ), $\eta_p^2 = 0.001$	$F(2, 46) = 0.621, p = 1.000$ ( $p = 0.542$ ), $\eta_p^2 = 0.026$

*Примечание.* Приведена значимость с поправкой Бонферрони-Холма, в скобках — без поправки);  $\eta_p^2$  — частная эта-квадрат (величина статистического эффекта). Полу жирным шрифтом выделены значимые эффекты.

— ДЛИНА: точность ответов снижается по мере увеличения длины последовательности (рисунок 2Г).

Для факторов СТИМУЛ и ЗАДЕРЖКА значимого основного эффекта не обнаружено (рисунок 2В).

Были обнаружены следующие значимые взаимодействия факторов:

— СТИМУЛ × РЕЖИМ: точность ответов практически не отличается при воспроизведении буквенных последовательностей и траекторий в статическом режиме ( $p = 0.980$ , здесь и далее — по критерию Тьюки для множественных

сравнений), в динамическом режиме при воспроизведении букв точность заметно выше, чем при воспроизведении траекторий ( $p = 0.024$ , рисунок 3А);

– РЕЖИМ  $\times$  ДЛИНА: в режиме STAT снижение точности ответов при увеличении длины заметно слабее (точность от коротких к длинным последовательностям снижается на уровне значимости  $p = 0.00008$ ), чем в режиме DYN ( $p < 0.00001$ , рисунок 3Б).

– СТИМУЛ  $\times$  ДЛИНА: при воспроизведении букв влияние длины последовательности больше, чем при воспроизведении траекторий (рисунок 3Б). Изменения в обоих случаях высокозначимы, но качественное различие видно из графика средних.

В отношении времени реакции (RT) значимыми оказались следующие основные эффекты:

– СТИМУЛ: при воспроизведении вербальных стимулов RT заметно ниже, чем при воспроизведении траекторий (рисунок 4А);

– ЗАДЕРЖКА: при увеличении времени задержки RT сокращается (рисунок 4В);

– ДЛИНА: по мере роста длины последовательности RT увеличивается (рисунок 4Г).

Фактор РЕЖИМ в данном случае оказался незначимым (рисунок 4Б).

Также было обнаружено значимое влияние взаимодействия факторов СТИМУЛ  $\times$  ЗАДЕРЖКА: различия между RT при разном времени задержки практически отсутствуют в случае LET ( $p = 0.999$ ), а в TRJ при увеличении времени задержки ответа RT резко снижается ( $p < 0.001$ , рисунок 5А).

Следует отметить тенденцию, которая после поправки на множественное тестирование стала незначимой, но тем не менее была зафиксирована, – это влияние взаимодействия факторов СТИМУЛ  $\times$  ДЛИНА последовательности: RT заметно меняется в зависимости от длины в случае LET (различия между короткими и длинными последовательностями букв на уровне  $p = 0.003$ ) и мало зависит от длины в случае TRJ ( $p = 0.978$ , рисунок 5Б).

Рисунок 3

Средние значения доли правильных ответов для значимых эффектов взаимодействия факторов. Столбики ошибок – 95%-й доверительный интервал среднего

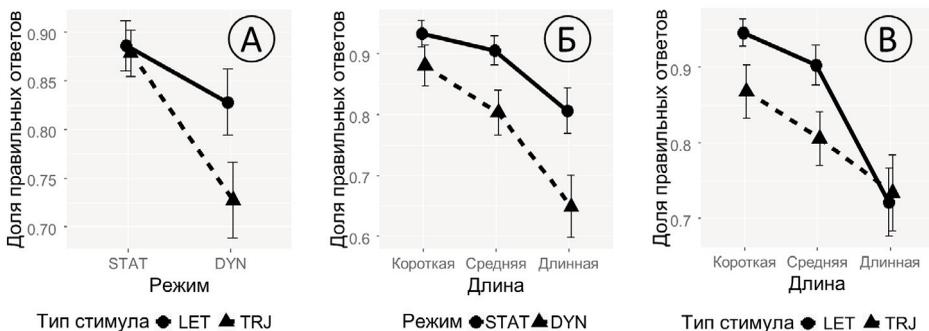


Рисунок 4

Средние значения RT (в мс) в зависимости от влияния факторов по отдельности.  
 Столбики ошибок – 95%-й доверительный интервал среднего

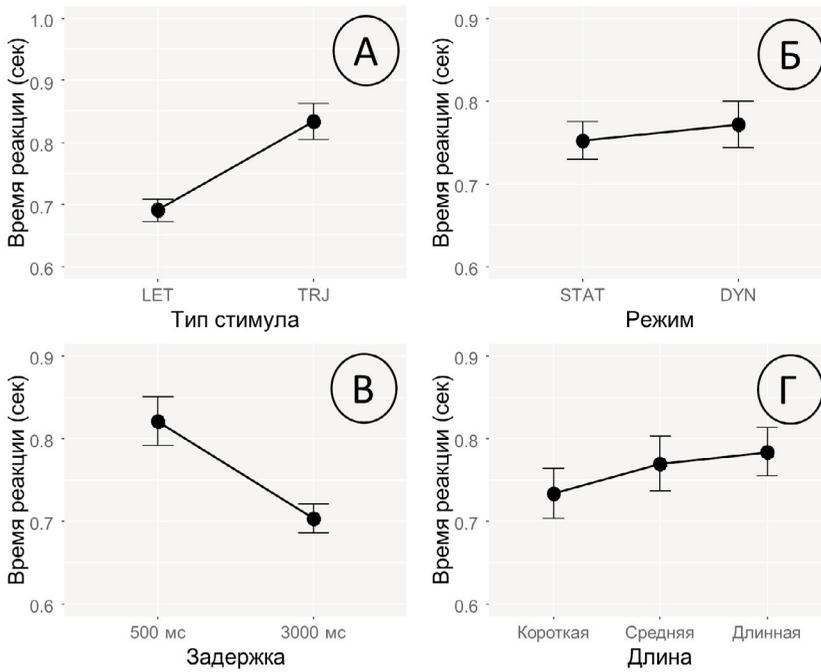
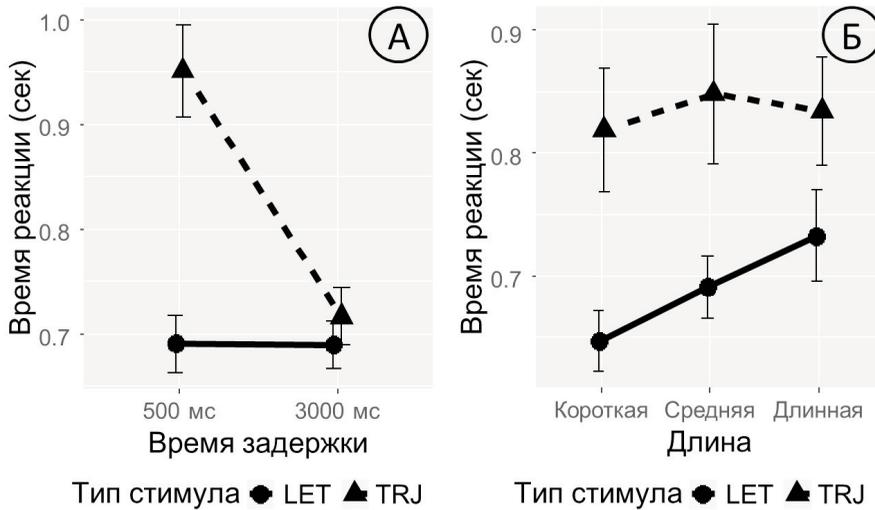


Рисунок 5

Средние значения RT для значимых эффектов взаимодействия факторов.  
 Столбики ошибок – 95%-й доверительный интервал среднего



### Обсуждение результатов

При обсуждении полученных результатов нужно учесть существенную разницу в характере воспроизведения двух типов последовательностей. В процессе воспроизведения последовательности букв нет необходимости извлекать из РП список самих элементов — он присутствует на экране в виде перетасованной строки. Испытуемый не может ошибиться в том, какие элементы были показаны и каково их число; необходимо помнить только правильную их последовательность. Это облегчает задачу воспроизведения. С другой стороны, испытуемый не знает, где в предъявленной строке будет расположена очередная буква, и это подразумевает необходимость ее зрительного поиска.

При воспроизведении ломаной испытуемый должен помнить также и точный список элементов (сегментов ломаной) и может допустить ошибку в их идентичности и числе.

Кроме того, при воспроизведении последовательности букв более простой оказывается двигательная составляющая ответа: испытуемому требуется указать на элементы, расположенные в фиксированной области экрана, причем необходимость двигательно воспроизводить сами элементы отсутствует.

В силу того, что указанные различия по-разному влияют на точность воспроизведения (долю правильных ответов) последовательностей и на латентное время (время реакции — RT), мы рассмотрим влияние экспериментальных факторов на эти две величины по отдельности.

#### *Точность воспроизведения*

Примечательной особенностью полученных результатов является то, что фактор ЗАДЕРЖКА не только не влиял на точность воспроизведения последовательности, но и не обнаружил значимых взаимодействий ни с одним из остальных факторов. Это означает, что как минимум удержание репрезентаций последовательностей в РП не сопровождалось потерей информации, и полученные эффекты факторов РЕЖИМ и ДЛИНА связаны с этапами восприятия, занесения в РП, извлечения из РП и воспроизведения последовательности.

Как показали результаты эксперимента, для обоих типов последовательностей (LET и TRJ) точность воспроизведения (доля правильных ответов) зависела от факторов РЕЖИМ и ДЛИНА (рисунок 2). В отношении фактора СТИМУЛ некоторое снижение точности при воспроизведении траекторий оказалось незначимым после поправки на множественное тестирование гипотез. При этом данный фактор оказал значимое влияние на точность ответов в сочетании с другими, а именно во взаимодействиях СТИМУЛ × РЕЖИМ и СТИМУЛ × ДЛИНА. Из рисунка 3 видно, что точность воспроизведения обоих типов последовательностей качественно сходным образом зависит от уровней факторов РЕЖИМ и ДЛИНА: она значимо меньше в динамическом режиме и падает с ростом длины последовательности.

Вместе с тем влияние фактора РЕЖИМ на точность воспроизведения последовательности оказывается существенно большим в случае ломаных линий, чем в случае букв: если предъявленные в статическом режиме ломаные линии и строки букв воспроизводятся в среднем одинаково точно на уровне 88% правильных ответов (рисунок 3А), то в динамическом режиме в случае букв доля правильных ответов падает до 83%, а в случае ломаных — до 73%.

В случае запоминания вербальных последовательностей преимущество в точности статического режима может быть связано с тем, что при симультанном предъявлении помимо фонологической репрезентации в РП удерживается также и зрительная репрезентация всей строки (Frick, 1985) или ее частей (chunks) (Solopchuk et al., 2016; Thalmann et al., 2019), что облегчает запоминание порядка элементов. В случае ломаных линий преимущество статического режима предъявления над динамическим режимом в точности воспроизведения, показанное в наших предыдущих исследованиях (Корнеев, Курганский, 2014а), может быть объяснено похожим образом: при статическом воспроизведении в РП помимо серии сегментов ломаной удерживается также репрезентация частей ломаной или всей ломаной как единого объекта (Obaidellah, Cheng, 2015). Можно также привести соображения экологического характера: в типичном опыте человека статическое предъявление выбранных нами объектов — ломаных линий и строчек букв — происходит гораздо чаще, чем их динамическое предъявление. Нельзя исключить, что для случая поэлементного предъявления элементов последовательности не выработано достаточно эффективных механизмов РП.

Большинство исследователей склоняются к тому, что порядок элементов последовательности (серийный порядок) сохраняется в РП за счет общего модально-неспецифического механизма (Ginsburg et al., 2017; Hurlstone, Hitch, 2018; Majerus, 2019). Казалось бы, фактор РЕЖИМ должен оказывать сходное влияние на точность воспроизведения как ломаных, так и букв. Почему же тогда разница в точности воспроизведения ломаных оказалась существенно больше? По-видимому, это связано с тем, что в случае предъявления ломаных в динамическом режиме испытуемый воспринимает не серию элементов (сегментов ломаной), а движущуюся точку. Как показывает ряд исследований, мозговые системы, обеспечивающие восприятие и хранение формы на основе статического изображения и движущегося объекта, различны (Kriegeskorte et al., 2003; Donato et al., 2020). Не исключено, что реконструкция формы на основе движения сложнее и поэтому сопряжена с большим числом ошибок.

Приведенные выше соображения по поводу преимущества статического режима предъявления над динамическим в точности воспроизведения последовательности объясняют и характер взаимодействия РЕЖИМ × ДЛИНА (рисунок 3Б): усредненная по двум типам последовательностей точность воспроизведения оказывается выше при статическом предъявлении за счет дополнительной зрительной репрезентации последовательности как целого или ее подгрупп.

Значимое влияние фактора ДЛИНА означает, что мы получили ожидаемый из литературы «эффект длины», состоящий в том, что с увеличением элементов

последовательности растет число ошибок (Barton et al., 2014). Однако наличие и характер взаимодействия  $\text{СТИМУЛ} \times \text{ДЛИНА}$  (рисунок 3В) указывают на то, что при увеличении длины последовательности букв точность ее воспроизведения падает сильнее, чем в случае ломаных. Большая точность воспроизведения последовательности букв малой и средней длины связана, вероятно, с тем, что на этапе воспроизведения испытуемому предъявляются все элементы последовательности, которую он должен был удерживать в РП. Это облегчает задачу припоминания правильного порядка элементов. Несколько меньшая зависимость точности воспроизведения от длины последовательности для ломаных может быть связана с тем, что в этом случае роль репрезентации ломаной в качестве целостного объекта или групп выше, чем это имеет место для вербальных последовательностей, поскольку последние состоят из согласных и не образуют не только слов, но даже частотных морфологических единиц (корней слов, окончаний и т.п.).

### *Время реакции*

Анализ времени реакции (RT) показал, что на эту величину не влияет фактор РЕЖИМ, причем не выявлено ни одного значимого взаимодействия с участием этого фактора. Таким образом, режим предъявления не влияет на скрытые процессы, непосредственно предшествующие моторному воспроизведению запомненных последовательностей. Это наблюдение не согласуется с ранее полученными данными о существенной разнице между динамическим и статическим режимами предъявления при задержке в 500 мс и отсутствии таковой при задержке в 3000 мс для воспроизведения ломаной линии. Возможно, это связано с тем, что в предшествующих экспериментах использовалось условие немедленного воспроизведения, при котором различие RT между двумя режимами было максимальным. С увеличением времени задержки ответа различия между режимами нивелировались. В настоящем исследовании минимальная задержка составляла 500 мс, за счет чего общие различия RT в двух режимах предъявления оказались статистически недостоверными.

Как уже отмечалось, в силу особенностей экспериментальной модели уровни фактора  $\text{СТИМУЛ}$ , LET и TRJ, сопряжены с существенными различиями в способах воспроизведения буквенных последовательностей и ломаных линий. Эти различия и связанные с ними различия в когнитивных операциях делают бессмысленным непосредственное сравнение RT для последовательностей LET и TRJ. Однако взаимодействие  $\text{СТИМУЛ} \times \text{ЗАДЕРЖКА}$  является информативным и заслуживает обсуждения.

Как показывает рисунок 5А, при воспроизведении ломаных наблюдается существенное сокращение RT от 950 до 720 мс с ростом времени удержания в РП от 500 мс до 3 сек. В предыдущей работе сокращение RT было проинтерпретировано как свидетельство спонтанного процесса преобразования репрезентации ломаной из перцептивной в более близкую к моторной абстрактную форму (Корнеев, Курганский, 2013), и возможность такого преобразования

подтверждается также в недавних публикациях (Rose, 2020; Chota, Van der Stigchel, 2021). При короткой задержке такое преобразование не успевает завершиться и продолжается в течение латентного периода движения. При достаточно длинной задержке императивного сигнала процесс преобразования репрезентации успевает завершиться до его появления, что приводит к сокращению латентного периода моторного ответа. Следует отметить, что при воспроизведении буквенных последовательностей RT практически не меняется, что может говорить об отсутствии или меньшей выраженности преобразования репрезентации в случае удержания в РП вербальной последовательности. В любом случае, полученные результаты говорят о разной динамике репрезентации при удержании информации разного типа.

Из рисунка 5А видно, что в случае воспроизведения буквенных последовательностей RT практически не изменяется при варьировании времени удержания в РП от половины до трех секунд. Это означает, что поэлементное сличение сохраненной в РП репрезентации исходной вербальной последовательности с представленной зрительно на этапе воспроизведения той же, но рандомизированной последовательностью букв требует одинакового времени и при короткой, и при длинной задержке. Таким образом, полученные данные не дают оснований ожидать каких-либо спонтанных преобразований репрезентации буквенной последовательности в период ее удержания в РП в отличие от репрезентации ломаной линии.

Также, по нашему мнению, можно обсудить взаимодействие  $\text{СТИМУЛ} \times \text{ДЛИНА}$ , хотя этот эффект после поправки на множественное тестирование стал незначимым, что указывает на необходимость его дополнительной проверки. Однако профили RT на рисунке 5Б достаточно интересны и достойны рассмотрения. Из рисунка видно, что RT существенно зависит от длины последовательности в случае воспроизведения порядка букв, но не зависит от числа сегментов при воспроизведении ломаных линий. Последнее не согласуется с результатами нашего предыдущего исследования (Корнеев, Курганский, 2013), в котором для динамического режима предъявления было выявлено линейное возрастание RT с ростом числа сегментов при воспроизведении ломаных линий. Не исключено, что такое расхождение между настоящими результатами и данными предыдущего исследования связано с меньшими требованиями к скорости реагирования на императивный сигнал и, соответственно, с использованием текущего программирования (Alouche et al., 2012) последовательности движений при копировании ломаной вместо предварительного программирования независимо от числа элементов ломаной. В случае букв речь не идет о предварительном программировании: каждый двигательный ответ — это реакция на найденную в ходе зрительного поиска очередную букву, поэтому снижение требований к скорости реагирования не сказывается на латентном времени воспроизведения последовательности букв. В пользу такого объяснения свидетельствует тот факт, что в настоящей работе среднее RT более чем на 200 мс превосходит то, которое сообщалось в другой работе (Корнеев, Курганский, 2013).

Что касается выраженной линейной зависимости RT от длины буквенной последовательности, то она хорошо соответствует данным литературы о зависимости

времени зрительного поиска от количества элементов в случае серийного режима (Moran et al., 2016).

Подводя итог проведенному исследованию, можно заметить, что полученные результаты указывают на ряд различий в характере репрезентаций использованных нами вербальных и невербальных последовательностей в рабочей памяти. Можно предположить, что в случае невербальной последовательности (траектории) определение порядка элементов происходит непосредственно перед воспроизведением (на это указывают и результаты предыдущих исследований: Корнеев, Курганский, 2014б), что приводит к различиям в RT при варьировании времени удержания информации. В случае удержания вербальной последовательности порядок элементов устанавливается раньше, при восприятии последовательности, что может сокращать время реакции и делает его независимым от времени удержания информации. Если обратиться к упомянутому во введении вопросу о специфичности или универсальности механизмов сохранения серийной информации разной модальности, то наши результаты скорее говорят о специфичности кодирования серийного порядка в зависимости от типа удерживаемой информации.

Также следует отметить, что при интерпретации полученных результатов важным оказался не только учет особенностей типа (вербального и невербального) и способа предъявления (статического или динамического) стимулов, но и характер ответа испытуемого — воспроизведение всего стимула-траектории или установление порядка элементов (букв). Данное различие в задачах, предлагаемых испытуемому, может также оказывать влияние на формирование репрезентации последовательности. Это согласуется с экспериментальными исследованиями позиционных эффектов при воспроизведении последовательностей букв и цифр, указывающими на различное влияние способа воспроизведения последовательности (устного или письменного) в зависимости от использования стимулов в слуховой или визуальной модальности (Harvey, Weaman, 2007). Таким образом, обсуждение особенностей репрезентаций серийной информации разной модальности и предъявляемой разными способами должно проводиться с учетом особенностей характера ответа испытуемого. В рамках нашей статьи это подробно не анализируется, однако такой анализ может стать одним из направлений дальнейших исследований.

## **Выводы**

Анализ эффективности зрительной РП при задержанном воспроизведении последовательностей вербальных и невербальных стимулов выявил как общие, так и специфические по отношению к модальности зависимости точности и латентного времени двигательного ответа от анализируемых экспериментальных факторов — режима предъявления, длины последовательностей и времени задержки.

Точность воспроизведения обоих типов последовательностей качественно сходным образом зависит от режима предъявления и количества элементов: она меньше в динамическом режиме и падает с ростом длины последовательности.

При этом использование динамического режима в большей степени сказывается на точности воспроизведения ломаных линий, чем буквенных последовательностей.

Увеличение количества элементов, напротив, больше снижает точность воспроизведения последовательностей букв по сравнению с невербальными последовательностями.

Время удержания информации в РП существенно влияет на латентное время двигательного ответа только при воспроизведении ломаных линий, но не буквенных последовательностей. При этом латентное время ответа возрастает при увеличении длины последовательности букв, но не изменяется при увеличении количества элементов ломаной линии.

В целом, результаты указывают на различия в механизмах сохранения и преобразования вербальной и невербальной серийной информации в рабочей памяти. Судя по полученным данным, вербальная информация по сравнению с невербальной сохраняется в большей степени как последовательность, при этом претерпевает меньше изменений в процессе удержания в рабочей памяти в задачах, связанных с воспроизведением порядка элементов.

## Литература

- Корнеев, А., Курганский, А. (2013). Внутренняя репрезентация серии движений при воспроизведении статического рисунка и траектории движущегося объекта. *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова*, 63(4), 437–450. <https://doi.org/10.7868/S0044467713040060>
- Корнеев, А. А., Курганский, А. В. (2014а). Влияние способа зрительного предъявления сложной траектории на временные параметры ее отсроченного двигательного воспроизведения. *Психологические исследования*, 7(37). <https://doi.org/10.54359/ps.v7i37.594>
- Корнеев, А. А., Курганский, А. В. (2014б). Преобразование порядка движений в серии, заданной зрительным образцом. *Вестник Московского университета. Серия 14. Психология*, 2, 61–74.

Ссылки на зарубежные источники см. в разделе *References*.

## References

- Agam, Y., Bullock, D., Sekuler, R. (2005). Imitating unfamiliar sequences of connected linear motions. *Journal of Neurophysiology*, 94(4), 2832–2843. <https://doi.org/10.1152/jn.00366.2005>
- Alouche, S. R., Sant'Anna, G. N., Biagioni, G., & Ribeiro-do-Valle, L. E. (2012). Influence of cueing on the preparation and execution of untrained and trained complex motor responses. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 45(5), 425–435. <https://doi.org/10.1590/S0100-879X2012007500053>
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. *Psychology of Learning and Motivation*, 8, 47–89. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60452-1](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60452-1)
- Barton, J. J. S., Hanif, H. M., Björnström, L. E., & Hills, C. (2014). The word-length effect in reading: A review. *Cognitive Neuropsychology*, 31(5–6), 378–412. <https://doi.org/10.1080/02643294.2014.895314>
- Brown, G. G., Turner, T. H., Mano, Q. R., Bolden, K., & Thomas, M. L. (2013). Experimental manipulation of working memory model parameters: An exercise in construct validity. *Psychological Assessment*, 25(3), 844–858. <https://doi.org/10.1037/a0032577>

- Burgess, N., & Hitch, G. J. (1999). Memory for serial order: A network model of the phonological loop and its timing. *Psychological Review*, *106*, 551–581.
- Burin, D. I., González, F. M., Martínez, M., & Marrujo, J. G. (2021). Expository multimedia comprehension in E-learning: Presentation format, verbal ability and working memory capacity. *Journal of Computer Assisted Learning*, *37*(3), 797–809. <https://doi.org/10.1111/jcal.12524>
- Carpenter, R., & Alloway, T. (2019). Computer versus paper-based testing: are they equivalent when it comes to working memory? *Journal of Psychoeducational Assessment*, *37*(3), 382–394. <https://doi.org/10.1177/0734282918761496>
- Chota, S., & Van der Stigchel, S. (2021). Dynamic and flexible transformation and reallocation of visual working memory representations. *Visual Cognition*, *29*(7), 409–415. <https://doi.org/10.1080/13506285.2021.1891168>
- Curtis, C. E., & Sprague, T. C. (2021). Persistent activity during working memory from front to back. *BioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2021.04.24.441274>
- D'Esposito, M., & Postle, B. R. (2015). The cognitive neuroscience of working memory. *Annual Review of Psychology*, *66*(1), 115–142. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015031>
- Della Sala, S., Gray, C., Baddeley, A., Allamano, N., & Wilson, L. (1999). Pattern span: A tool for unwinding visuo-spatial memory. *Neuropsychologia*, *37*(10), 1189–1199. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(98\)00159-6](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(98)00159-6)
- Donato, R., Pavan, A., & Campana, G. (2020). Investigating the Interaction between form and motion processing: a review of basic research and clinical evidence. *Frontiers in Psychology*, *11*, 566848. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.566848>
- Ebbinghaus, H. (1964). *Memory: A contribution to experimental psychology*. New York, NY: Dover.
- Farrell, S., & Lewandowsky, S. (2002). An endogenous distributed model of ordering in serial recall. *Psychonomic Bulletin & Review*, *9*(1), 59–79. <https://doi.org/10.3758/BF03196257>
- Frick, R. W. (1985). Testing visual short-term memory: Simultaneous versus sequential presentations. *Memory & Cognition*, *13*(4), 346–356. <https://doi.org/10.3758/BF03202502>
- Ginsburg, V., Archambeau, K., van Dijck, J.-P., Chetail, F., & Gevers, W. (2017). Coding of serial order in verbal, visual and spatial working memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, *146*(5), 632–650. <https://doi.org/10.1037/xge0000278>
- Gmeindl, L., Walsh, M., & Courtney, S. M. (2011). Binding serial order to representations in working memory: A spatial/verbal dissociation. *Memory & Cognition*, *39*(1), 37–46. <https://doi.org/10.3758/s13421-010-0012-9>
- Guidali, G., Pisoni, A., Bolognini, N., & Papagno, C. (2019). Keeping order in the brain: The supramarginal gyrus and serial order in short-term memory. *Cortex*, *119*, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.04.009>
- Harvey, A. J., & Beaman, C. P. (2007). Input and output modality effects in immediate serial recall. *Memory*, *15*(7), 693–700.
- Hurlstone, M. J., & Hitch, G. J. (2018). How is the serial order of a visual sequence represented? Insights from transposition latencies. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *44*(2), 167–192. <https://doi.org/10.1037/xlm0000440>
- Hurlstone, M. J., Hitch, G. J., & Baddeley, A. D. (2014). Memory for serial order across domains: An overview of the literature and directions for future research. *Psychological Bulletin*, *140*(2), 339–373. <https://doi.org/10.1037/a0034221>

- Jones, D., Farrand, P., Stuart, G., & Morris, N. (1995). Functional equivalence of verbal and spatial information in serial short-term memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21(4), 1008–1018. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.21.4.1008>
- Kang, M.-S., Hong, S. W., Blake, R., & Woodman, G. F. (2011). Visual working memory contaminates perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(5), 860–869. <https://doi.org/10.3758/s13423-011-0126-5>
- Korneev, A. A., & Kurganskii, A. V. (2013). Internal representation of movement sequences built upon either static line drawings or trajectories of moving object. *Zhurnal Vysshei Nervnoi Deiatelnosti imeni I.P. Pavlova*, 63(4), 437–450. <https://doi.org/10.7868/S0044467713040060> (in Russian)
- Korneev, A. A., & Kurgansky, A. V. (2014b). Change in order of movements constituting in series set by visual template. *Moscow University Psychology Bulletin*, 2, 61–74. (in Russian)
- Korneev, A., & Kurgansky, A. (2014a). The impact of a mode of visual presentation of a complex trajectory on reaction time scores in delayed response task. *Prikhologicheskie Issledovaniya [Psychological Studies]*, 7(37). <https://doi.org/10.54359/ps.v7i37.594> (in Russian)
- Kriegeskorte, N., Sorger, B., Naumer, M., Schwarzbach, J., Boogert, E. van den, Hussy, W., & Goebel, R. (2003). Human cortical object recognition from a visual motion flowfield. *Journal of Neuroscience*, 23(4), 1451–1463. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-04-01451.2003>
- Lehnert, G., & Zimmer, H. D. (2008). Modality and domain specific components in auditory and visual working memory tasks. *Cognitive Processing*, 9(1), 53–61. <https://doi.org/10.1007/s10339-007-0187-6>
- Logie, R. H. (1995). *Visuo-spatial working memory*. Psychology Press.
- Majerus, S. (2019). Verbal working memory and the phonological buffer: The question of serial order. *Cortex*, 112, 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.04.016>
- Mammarella, I. C., Pazzaglia, F., & Cornoldi, C. (2008). Evidence for different components in children's visuospatial working memory. *British Journal of Developmental Psychology*, 26(3), 337–355. <https://doi.org/10.1348/026151007X236061>
- Marshuetz, C. (2005). Order information in working memory: an integrative review of evidence from brain and behavior. *Psychological Bulletin*, 131(3), 323–339. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.131.3.323>
- Moran, R., Zehetleitner, M., Liesefeld, H. R., Müller, H. J., & Usher, M. (2016). Serial vs. parallel models of attention in visual search: Accounting for benchmark RT-distributions. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23(5), 1300–1315. <https://doi.org/10.3758/s13423-015-0978-1>
- Nairne, J. S. (1990). A feature model of immediate memory. *Memory & Cognition*, 18, 251–269.
- Obaidallah, U. H., & Cheng, P. C.-H. (2015). The role of chunking in drawing rey complex figure. *Perceptual and Motor Skills*, 120(2), 535–555. <https://doi.org/10.2466/24.PMS.120v17x6>
- Rhodes, B. J., Bullock, D., Verwey, W. B., Averbeck, B. B., & Page, M. P. A. (2004). Learning and production of movement sequences: Behavioral, neurophysiological, and modeling perspectives. *Human Movement Science*, 23(5), 699–746. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2004.10.008>
- Rose, N. S. (2020). The dynamic-processing model of working memory. *Current Directions in Psychological Science*, 29(4), 378–387. <https://doi.org/10.1177/0963721420922185>
- Solopchuk, O., Alamia, A., Olivier, E., & Zénon, A. (2016). Chunking improves symbolic sequence processing and relies on working memory gating mechanisms. *Learning & Memory*, 23(3), 108–112. <https://doi.org/10.1101/lm.041277.115>
- Thalmann, M., Souza, A. S., & Oberauer, K. (2019). How does chunking help working memory? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 45(1), 37–55. <https://doi.org/10.1037/xlm0000578>