

# **Корнеев А.А.<sup>1,2</sup>, Ломакин Д.И.<sup>1</sup>, Курганский А.В.<sup>1,3</sup> Возрастные особенности запоминания последовательности движений, заданной зрительным образцом**

## **Korneev A.A.<sup>1,2</sup>, Lomakin D.I.<sup>1</sup>, Kurgansky A.V.<sup>1,3</sup> Age-related features of memorizing a sequence of movements specified by a visual template**

<sup>1</sup> Институт возрастной физиологии, Российская академия образования, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup> Российская академия народного хозяйства и государственной службы, Москва, Россия

В статье описаны результаты исследования запоминания и удержания серийной информации в рабочей памяти в разных возрастах – у детей 9–11 лет, подростков и взрослых. Испытуемых просили воспроизводить ломаные линии – последовательности вертикальных и горизонтальных отрезков прямой линий, – предъявляемые (1) как статическое изображение и (2) как динамический объект – курсор, движущийся вдоль ломаной линии. Сложность траекторий задавалась количеством составляющих ее отрезков (от 4 до 6).

Анализировалось число ошибок, а также временные параметры ответов испытуемых – время реакции (RT) и среднее время выполнения одного элемента последовательности (MT). Результаты показали, что с возрастом снижается число ошибок, причем это характерно в основном для режима динамического предъявления. Подростки выполняют это задание заметно точнее, чем дети, но хуже взрослых. Обнаружено, что время реакции заметно увеличивается к подростковому возрасту и остается довольно высоким у взрослых. Среднее время выполнения отдельного элемента у подростков практически не отличается от результатов, полученных в группе детей, в то время как у взрослых оно резко снижается.

Повышение с возрастом точности воспроизведения шаблонов может отражать улучшение точности репрезентаций последовательности в рабочей памяти. Увеличение латентного времени при подготовке двигательного ответа может быть связано с более подробным планированием предстоящего серийного действия. Согласно нашим данным, подростки занимают промежуточное положение между детьми и взрослыми: для них характерно уже достаточно высокое качество репрезентации последовательности и ее полнота, подробное планирование предстоящего серийного действия, однако еще недостаточно сформирован текущий контроль моторной реализации, в силу чего относительно велика роль текущего программирования при выполнении серии движений. Сравнение воспроизведения последовательностей, заданных различными (статическим и динамическим) способами, показывает, что по мере взросления количество ошибок в двух режимах различается все меньше, в то время как временные параметры выполнения движений, напротив, начинают различаться.

**Ключевые слова:** рабочая память, внутренняя репрезентация, серийный порядок, младшие школьники, подростки

## Введение

В повседневной деятельности человек постоянно сталкивается с необходимостью запоминать и воспроизводить серийную информацию. При этом информация может быть разной модальности, а может различаться и в рамках одной модальности, например зрительный образец может быть статическим изображением или динамическим объектом, воспроизводящим серию элементов. В данном исследовании анализируются особенности кратковременного запоминания и воспроизведения последовательности движений, заданных зрительным образцом у детей, подростков и взрослых.

В рамках когнитивной психологии проблема кратковременного запоминания информации связана с понятием рабочей памяти [Baddeley, Hitch, 1974]. Различные концепции рабочей памяти активно разрабатывались и продолжают разрабатываться, подробное рассмотрение этого вопроса можно найти в обзорах [Baddeley, 2012; Baddeley et al., 2019; Chai et al., 2018]. Что касается представлений о запоминании и удержании серийной информации в рабочей памяти, в настоящее время существует ряд моделей, описывающих возможные механизмы запоминания и удержания информации о последовательности стимулов [Hurlstone et al., 2014; Verwey et al., 2014].

Один из распространенных в современной когнитивной науке подходов к рассмотрению механизмов запоминания серийной информации связан с понятием *competitive queuing* (CQ), что может быть переведено как «соревнование за очередь» [Rhodes et al., 2004; Hurlstone et al., 2014]. В соответствии с этим принципом все элементы последовательности обладают определенным уровнем активации в зависимости от порядка: наибольшая активация свойственна первому элементу, активация последующих элементов тем меньше, чем ближе они расположены к концу последовательности. Элемент с максимальной активацией «выигрывает» и воспроизводится первым. Соревнование продолжается до тех пор, пока не будет воспроизведена вся последовательность. Механизм CQ позволяет объяснить целый ряд явлений, связанных с запоминанием серийного порядка, результаты исследований дают основания предполагать, что CQ может являться основным принципом для всех серийных действий [Hurlstone, Hitch, 2015]. Принцип CQ также находит подтверждение и в исследованиях на человеке при анализе вызванных потенциалов мозга (ERP) [Agam et al., 2007; Agam et al., 2010].

Несмотря на большое количество эмпирических данных и теоретических обобщений, касающихся механизмов обеспечения серийного порядка, нет достаточно четких данных о том, в каком именно виде – перцептивном (модально-специфическом), абстрактном или моторном – представлены элементы последовательности в рабочей памяти, и вопрос о модальности кодирования последовательности в рабочей памяти остается открытым. Различные исследования указывают на возможность хранения серийной информации как в модально-специфических [Ginsburg et al., 2017; Nee, D'Esposito, 2016; Soemer, Saito, 2016], так и в относительно независимых от модальности исходной информации репрезентациях [Vergara et al., 2016].

Рассмотрим более подробно возможные варианты исследования модально-специфических различий организации РП при удержании серийной информации. В этом контексте чаще всего сравнивается запоминание вербальных и невербальных последовательностей, достаточно часто проводится сравнение особенностей сохранения информации разной сенсорной модальности – прежде всего зрительной и слуховой. Возможно также предъявление информации одной модальности разными способами. Так, в случае невербальной зрительной инфор-

мации о последовательности движений в качестве возможных различных способов предъявления можно, в частности, выделить два: статический и динамический. При статическом предъявлении используются неподвижные зрительные сцены, непосредственно задающие последовательность движений (требуется скопировать нарисованную фигуру) или требующие более-менее сложного анализа для построения двигательной последовательности (прохождение лабиринта). При динамическом предъявлении используются движущиеся объекты (воспроизведение траектории движения) и меняющиеся во времени зрительные сцены (разучивание движений при просмотре видео).

Ряд экспериментальных данных указывает на то, что зрительная информация, сохраняемая в рабочей памяти, зависит от характера задачи, в частности, от того, является ли эта информация статической или динамической. При построении внутренней репрезентации на основе статической информации, как это имеет место, например, на письме [Wing, 2000], модально-неспецифическая пространственная информация сохраняется в задней теменной коре PPC [Lehnert, Zimmer, 2008]. Иная ситуация возникает при запечатлении динамической зрительной информации. Чувствительные к движению нейроны областей MT/MST, по-видимому, участвуют в системе рабочей памяти у приматов [Bisley et al., 2004; Pasternak, Zaksas, 2003]. При этом нейроны MST отвечают на движущийся объект вне зависимости от направления движения глаз, и, следовательно, их активность не зависит от положения изображения объекта на сетчатке [Inaba et al., 2007]. В частности, обнаруженная у людей интерференция текущей оценки направления движения и удерживаемого в памяти движения другого направления указывает на то, что мозговая система рабочей памяти включает сенсорные области, чувствительные к направлению движению [Kang et al., 2011].

На концептуальном уровне разведение сохранения статической и динамической зрительной информации присутствует, например, в модели Logie [Logie, 2014], где зрительный компонент рабочей памяти включает в себя два блока: собственно зрительный (в нем хранятся форма, цвет и другие признаки объекта, visual cache) и пространственный (в котором хранится информация о пространственном соотношении объектов, в том числе и информация о движении, inner scribe). Это разделение подтверждается исследованиями, проводимыми на взрослых здоровых испытуемых и испытуемых с локальными повреждениями мозга [Della Salla, 1999], а также на детях младшего школьного возраста [Mammarella et al., 2008].

Учитывая экспериментальные данные о различиях мозговой организации РП при удержании статической и динамической зрительной информации, представляет интерес исследование запоминания и воспроизведения двигательных последовательностей, заданных статическим или динамическим зрительным образцом. Такие исследования немногочисленны. Можно выделить работы Y. Agam и коллег, в которых изучался характер серийного научения при отсроченном воспроизведении сложных траекторий, заданных видимым движением небольшого объекта (диска-курсора) в плоскости экрана [Agam et al., 2005, 2007, 2010]. Полученные в этих работах данные свидетельствуют в пользу перцептивного (а не моторного) характера внутренней репрезентации последовательности движений. Однако в них не проводится сопоставление с воспроизведением последовательности движений, заданных статическим зрительным образцом.

В рамках нашей работы мы сопоставляем результаты выполнения серий движений, построенных на основе статической и динамической зрительной информации.

При этом мы рассматриваем запоминание этой информации у испытуемых разных возрастных групп. Онтогенетический анализ, по нашему мнению, может способствовать пониманию особенностей сохранения серийной информации в рабочей памяти. В различных исследованиях многократно показано, что возможности рабочей памяти заметно растут с возрастом

(см., например [Gathercole et al., 2004; Roberts et al., 2018]). Встает вопрос: как меняется при этом репрезентация серийной информации и как развивается способность запоминания последовательности движений, заданной статическим или динамическим зрительными образцом?

Исследования показывают, что с возрастом увеличивается объем рабочей памяти [Diamond, 2006; Hitch et al., 1989]. При этом у детей 7–8 лет при запоминании зрительных стимулов наблюдается сниженная, по сравнению со взрослыми, активация фронтальных отделов головного мозга. По мере взросления и созревания этих отделов развиваются функции произвольной регуляции внимания, что позволяет более эффективно извлекать и удерживать релевантную задачу информацию [Бетелева и др., 2014]. За счет этого при отсроченном воспроизведении серийной информации можно ожидать улучшения качества формирующихся репрезентаций, отражающегося в повышении точности ответов испытуемых.

При выполнении задач на отсроченную двигательную реакцию у детей по сравнению со взрослыми наблюдается более длительное латентное время. Время реакции может рассматриваться как отражение латентных процессов, связанных с подготовкой к движению на основании удерживаемой в рабочей памяти репрезентации стимульной последовательности. В зависимости от точности и полноты этой репрезентации время на подготовку ответа может изменяться. На примере простой двигательной реакции показано, что эти процессы подготовки к ответу с возрастом сокращаются [Безруких и др., 2000; Kiselev et al., 2009 и др.]. При этом время подготовки двигательного ответа в более сложных ситуациях может меняться с возрастом немонотонно. Например, в исследовании с задачами на удержание и обработку зрительно-пространственной информации при выполнении движения к цели показано, что время реакции заметно падает от 7 к 8 годам, а затем до 10 лет меняется намного меньше [Badan et al., 2000].

В исследованиях рабочей памяти у подростков показано, что в целом возможности рабочей памяти (в первую очередь объем) в подростковом возрасте увеличиваются [Gathercole et al., 2004], но не достигают дефинитивного уровня. В работе [Isbell et al., 2015] при сравнении трех групп испытуемых (13, 16 лет и 21 год) выявлено увеличение с возрастом объема РП, которое авторы связывают с созреванием ее мозговых механизмов. Это согласуется с данными другого исследования, в котором обнаружено увеличение объема РП в возрастном диапазоне от 4 к 12 годам, однако двенадцатилетние подростки все еще значительно отстают от взрослых по этому параметру [Luciana, Nelson, 2002]. В еще одном исследовании на материале решения задач на обнаружение изменений показано, что возможности зрительно-пространственной памяти у подростков ниже, чем у взрослых, причем прежде всего это проявляется в ситуации зашумления стимульного материала, введения дистракторов и увеличения количества стимулов [Spronk et al., 2012].

Согласно результатам работы Luciana и коллег [Luciana et al., 2005], посвященной развитию рабочей памяти у подростков, в задаче на воспроизведение положения объекта в пространстве при немедленном ответе точность у детей и подростков равна между собой, что говорит о примерно равных возможностях немедленного копирования, но при задержанном ответе у детей точность падает намного сильнее, чем у подростков, что свидетельствует о худшей способности сохранять зрительно-пространственную информацию.

В настоящей работе представлены результаты цикла экспериментов, направленных на исследование запоминания и воспроизведения двигательных последовательностей, заданных зрительным образцом у детей, подростков и взрослых. В этих экспериментах мы также варьировали способы предъявления зрительной серийной информации, используя статический и динамический режимы. Нас интересовали особенности сохранения в рабочей памяти и воспро-

изведения серий графических движений у детей, подростков и взрослых испытуемых.

В исследовании проверяются следующие гипотезы:

- по мере взросления способность запоминать и воспроизводить серийную информацию растет, но у подростков еще не достигает дефинитивного уровня;
- возрастные изменения точности и временных параметров выполнения движений при статическом и динамическом способах предъявления серийной информации отличаются, что связано с различиями в характере внутренних репрезентаций.

## **Методика**

### ***Испытуемые***

В описываемой серии экспериментов приняли участие в общей сложности 66 испытуемых трех возрастных групп. В первую группу вошли дети 9–11 лет (средний возраст  $10,4 \pm 0,75$  года, 29 человек), во вторую – подростки 14 лет (средний возраст  $14,4 \pm 0,25$  года, 23 человека) и в третью – взрослые 20–25 лет (средний возраст  $21 \pm 2,75$  года, 14 человек). Все испытуемые были правшами, без неврологических диагностированных отклонений, с нормальным или скорректированным зрением. Ведущая рука определялась по критерию письма. Участники исследования подписывали информированное согласие на участие в эксперименте, в группах детей и подростков также согласия подписывали родители детей.

### ***Экспериментальная задача***

Испытуемого просили запоминать последовательно предъявляемые на дисплее плоские траектории разной сложности и по императивному сигналу максимально быстро воспроизводить их на графическом планшете.

### ***Стимульный материал***

Траектории представляли собой незамкнутые ломаные линии, состоящие из горизонтальных и вертикальных отрезков стандартной (2 см), удвоенной или утроенной стандартной длины и допускающие не более одного самопересечения, примеры траекторий приведены на рис. 1А. Использовалось три набора траекторий, различающихся количеством элементов ( $N = 4, 5, 6$ ), по 16 различных траекторий в каждом (всего 48 траекторий).

Траектории предъявлялись в центре компьютерного монитора, белые на черном фоне. Их видимый размер был не больше  $7,5$  угловых градусов. Стимульный материал предъявлялся в двух режимах, которые мы ниже будем называть статическим (S) и динамическим (D). В режиме S вся траектория мгновенно появлялась на экране и оставалась на нем в течение 3000 мс. В режиме D испытуемому предъявлялся курсор (маленький квадрат размером  $3 \times 3$  мм), который двигался вдоль невидимой траектории в течение приблизительно 3000 мс.

### ***Аппаратура***

Стимулы предъявлялись на дисплее с диагональю 40 см и частотой кадровой развертки 60 Гц. Ответы регистрировались с помощью графического планшета Wacom Intuos3 формата A5 (частота – 100 Гц, пространственное разрешение – 200 линий на 1 мм, чувствительность к давлению пера на поверхность планшета 1024 градации) и специально написанной программы, регистрирующей горизонтальную и вертикальную координаты кончика электронного пера, а также величину давления. Управление экспериментом, предъявление стимулов и регистрация ответов испытуемых осуществлялись с помощью специально созданного про-

граммного обеспечения (написанного на языке С и в среде Matlab).

### **Процедура эксперимента**

Испытуемый сидел перед экраном монитора, на расстоянии около 70 см. Перед ним на столе лежал графический планшет, на котором он должен был воспроизводить запомненные траектории.

Каждая проба начиналась с предъявления в центре экрана фиксационной точки на 1000 мс. Затем в течение заданного времени (около 3000 мс) предъявлялась траектория. После задержки, составлявшей 1000 мс, подавался короткий звуковой императивный сигнал, по которому испытуемый начинал выполнение серии движений. Структура пробы показана на рис. 1Б. Запись координат начиналась синхронно с началом предъявления траектории и завершалась экспериментатором по окончании воспроизведения траектории испытуемым. Для дальнейшего анализа использовались горизонтальная  $x(t)$  и вертикальная  $y(t)$  координаты кончика электромагнитного пера, а также давление  $p(t)$ , оказываемое им на рабочую поверхность планшета.

В эксперименте использовался  $2 \times 3$  внутрииндивидуальный дизайн, в котором варьируемыми факторами служили режим предъявления (S и D) траектории и число сегментов N (4, 5 и 6). Сессия эксперимента состояла из двух блоков по 48 проб, в каждом из которых использовался только один режим предъявления. В каждом блоке предъявлялось по 16 различных траекторий каждого уровня сложности. Все испытуемые выполняли два блока в одном и том же фиксированном порядке: сначала блок, где использовался режим S, а затем блок с режимом D.

В качестве стартового положения использовалась фиксированная точка в центре планшета. Испытуемых просили начинать воспроизведение запомненной траектории как можно быстрее после императивного сигнала и как можно быстрее выполнять движение, не исправляя ошибок, если они допущены.

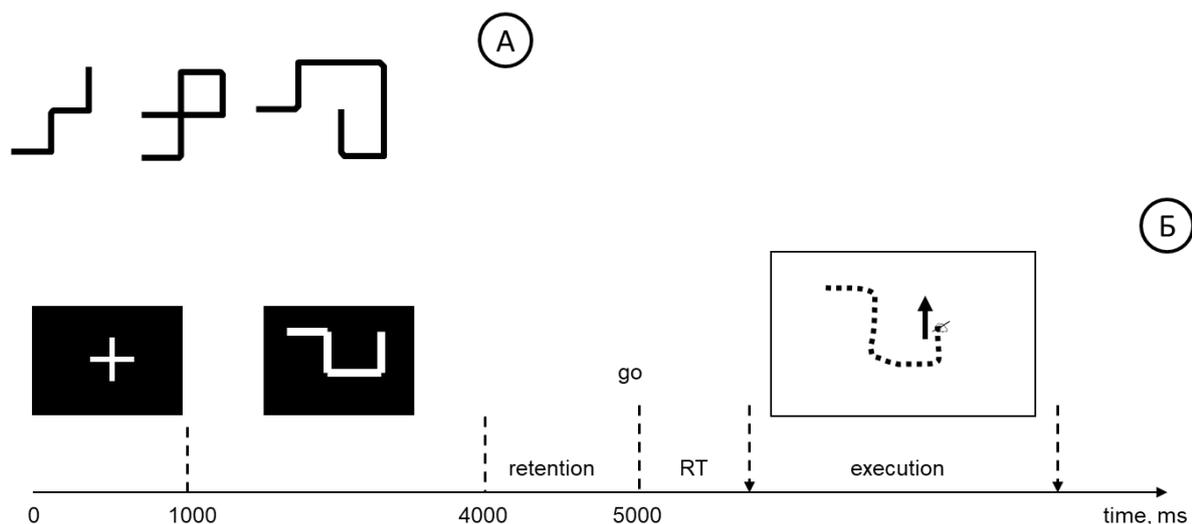


Рис. 1. Примеры стимульного материала. А. Примеры траекторий разной сложности. Б. Схема экспериментальной пробы.

### **Оцениваемые параметры**

Для оценки точности воспроизведения траекторий мы использовали следующую классификацию ошибок.

1. Искажение траектории – значительное отклонение воспроизведенной траектории от образца как в отношении метрики (существенное искажение пропорций фигуры), так и в отношении топологических характеристик траектории.
2. Упрощение траектории – пропуск элементов траектории.
3. Усложнение траектории – добавление лишних элементов при воспроизведении траектории при общем правильном ее воспроизведении.
4. Зеркальность при воспроизведении траектории – зеркальное отражение траектории целиком или ее отдельных элементов относительно горизонтальной или вертикальной оси.

Число ошибок подсчитывалось с помощью визуального анализа записей движений испытуемого, который проводил один из исследователей. В рамках данной работы мы анализируем суммарное число ошибок, не останавливаясь на отдельных типах.

Примеры ошибок различных типов показаны на рис. 2.

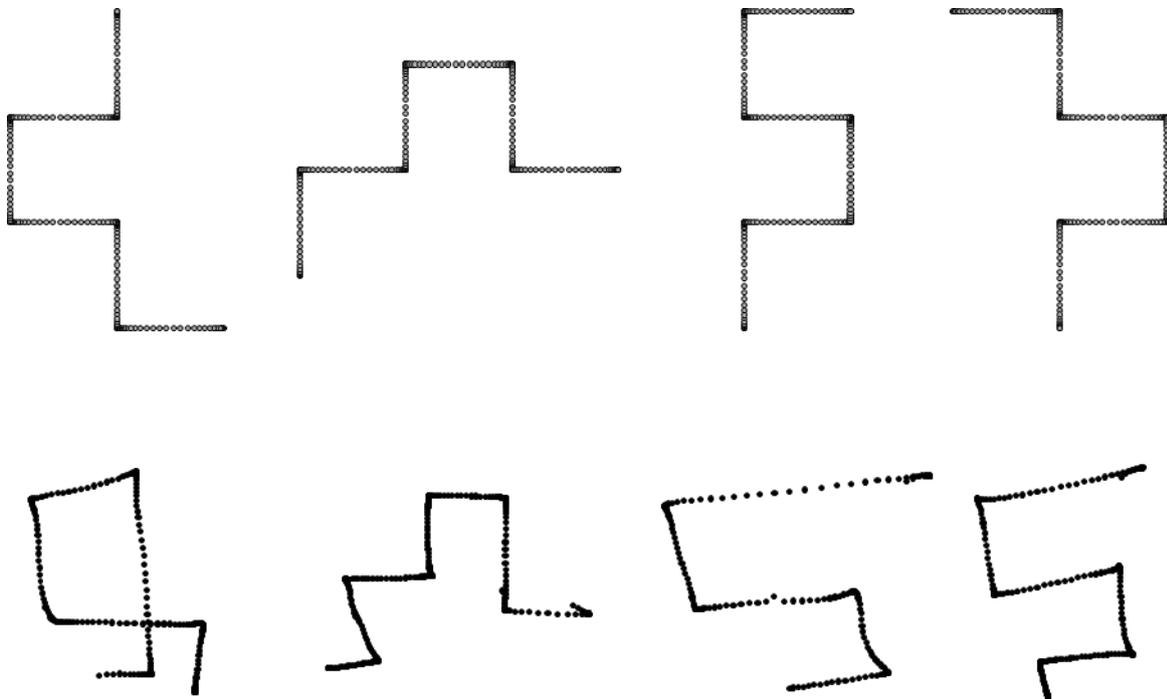


Рис. 2. Типичные ошибки воспроизведения траекторий. Пояснения даны в тексте.

В качестве анализируемых параметров временной структуры траектории использовались: латентное время (время от подачи go-сигнала до начала движения испытуемого, reaction time, далее RT) и средняя длительность движения вдоль одного сегмента траектории (movement time, далее MT). Детали алгоритма сегментации и определения временных параметров приведены в работе [Корнеев, Курганский, 2013].

## Результаты

Примеры воспроизведения одной и той же траектории испытуемыми разных возрастов приведены на рис. 3.

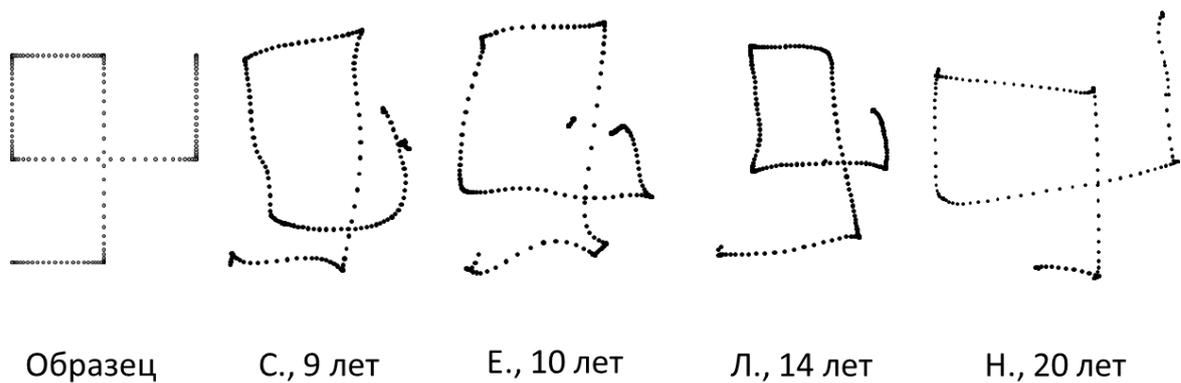


Рис. 3. Примеры воспроизведения одной и той же траектории испытуемыми разных возрастов.

### Анализ ошибок

Среднее число ошибок, допущенных испытуемыми разных возрастов в режимах S и D, приведено на рис. 4.

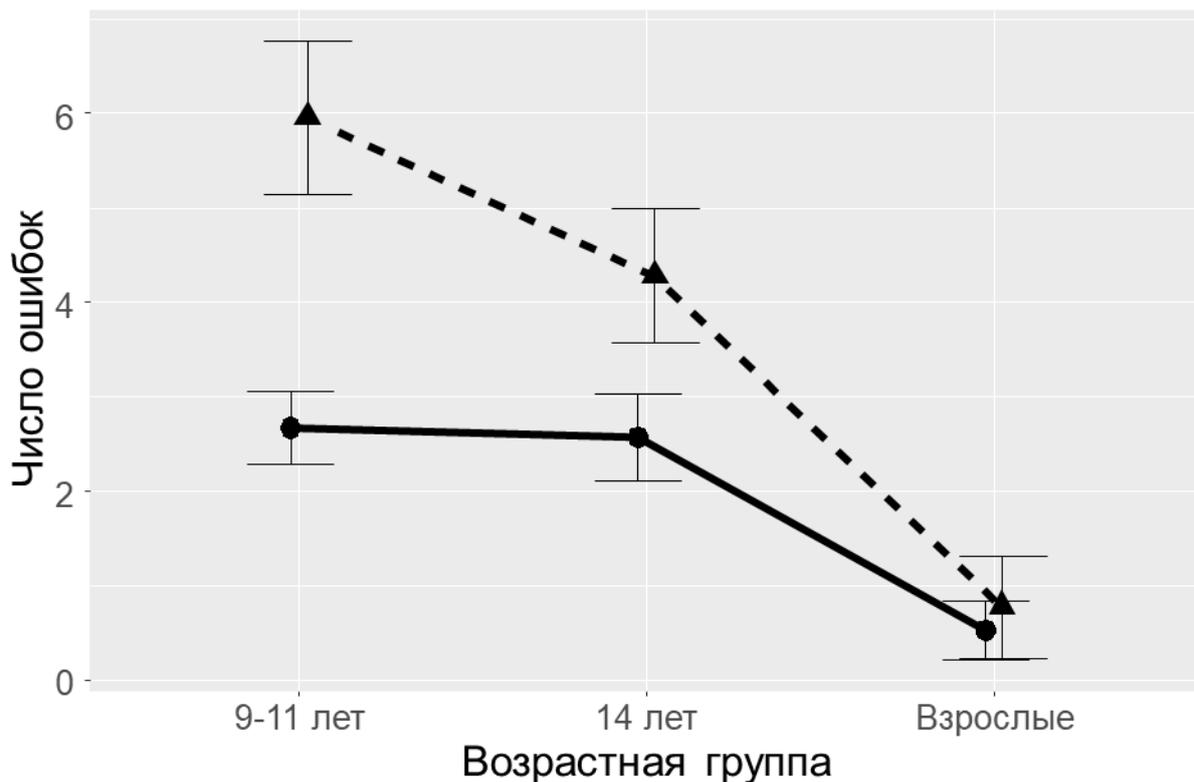


Рис. 4. Зависимость числа допущенных ошибок от возраста испытуемых при использовании двух режимов предъявления – статического (кружки и сплошная линия) и динамического (треугольники и пунктирная линия), столбики ошибок – две стандартные ошибки среднего.

Дисперсионный анализ с двумя внутригрупповыми факторами РЕЖИМ (два уровня – статический и динамический) и СЛОЖНОСТЬ (три уровня – 4, 5 и 6 элементов) и одним межгрупповым фактором ВОЗРАСТ (три уровня – 9–11, 14 и 20 лет) показал значимое влияние:

– фактора РЕЖИМ ( $F(1, 63) = 36,468, p < 0,001, \eta^2 = 0,367$ ), в режиме S испытуемые допускают больше ошибок, чем в режиме D;

– фактора СЛОЖНОСТЬ ( $F(2, 62) = 13,081, p < 0,001, \eta^2 = 0,297$ ), по мере усложнения траекторий количество ошибок растет;

– фактора ВОЗРАСТ ( $F(2, 63) = 17,963, p < 0,001, \eta^2 = 0,363$ ). Парные сравнения с поправкой Тьюки для множественных сравнений показали что число ошибок значительно больше у детей и подростков по сравнению со взрослыми ( $p < 0,001$  в обоих случаях), при этом подростки и дети отличаются незначимо ( $p = 0,326$ ).

Были также обнаружены ряд значимых влияний взаимодействий анализируемых факторов:

– влияние взаимодействие факторов РЕЖИМ  $\times$  ВОЗРАСТ ( $F(2, 63) = 8,150, p = 0,001, \eta^2 = 0,213$ ), с возрастом различия в количестве ошибок в двух режимах уменьшаются. Дополнительный анализ показал, что отличия между двумя режимами предъявления значимы в группах детей и подростков (на уровне  $p < 0,01$  с поправкой) и незначимо у взрослых ( $p = 1,000$ );

– влияние взаимодействие факторов СЛОЖНОСТЬ  $\times$  РЕЖИМ ( $F(2, 62) = 16,483, p < 0,001, \eta^2 = 0,347$ ): в режиме S количество ошибок по мере усложнения траектории меняется незначительно, в то время как в режиме D отчетливо увеличивается (рис. 5).

Также получено субзначимое влияние взаимодействия факторов ДЛИНА  $\times$  ВОЗРАСТ ( $F(4, 126) = 2,073, p = 0,088, \eta^2 = 0,062$ ): в группе взрослых число ошибок незначительно растет только при воспроизведении самых сложных последовательностей из 6 элементов, а в группах детей и подростков – уже при увеличении длины последовательности до 5 элементов.

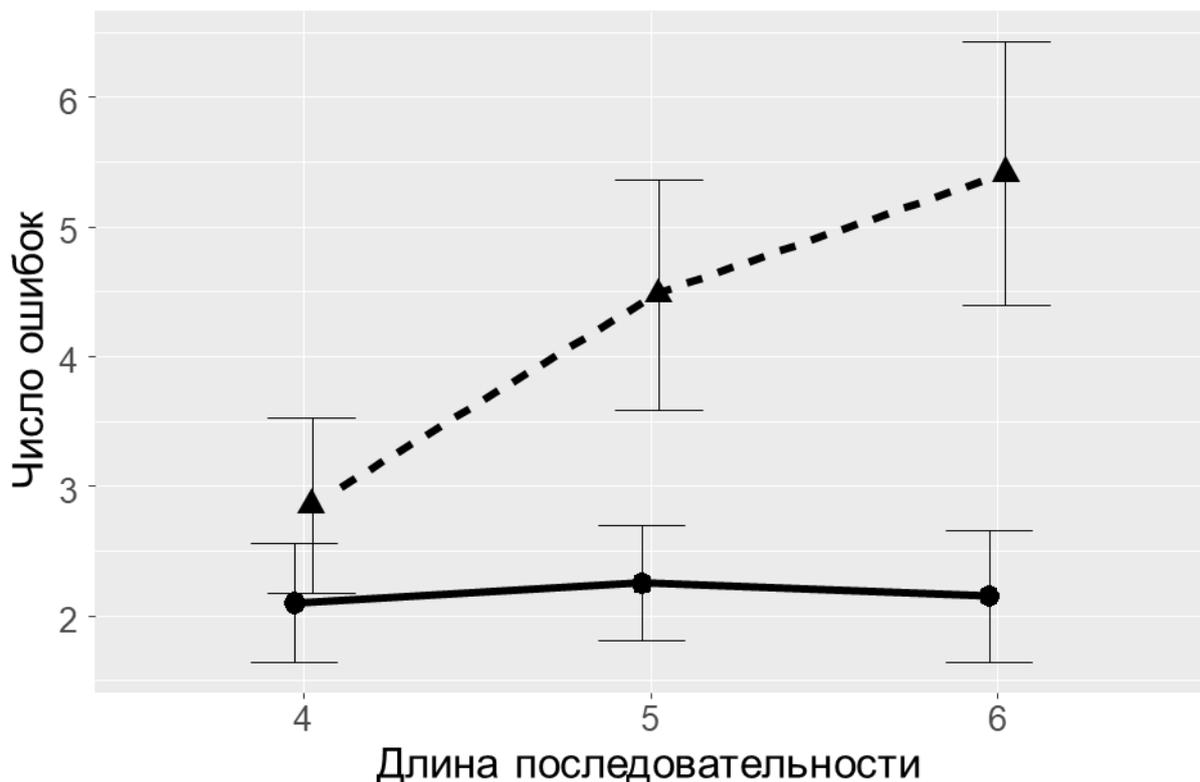


Рис. 5. Зависимость числа допущенных ошибок от сложности последовательности при использовании двух режимов предъявления – статического (кружки и сплошная линия) и динамического (треугольники и пунктирная линия), столбики ошибок – две стандартные ошибки среднего.

## Анализ времени реакции

Среднее время реакции испытуемых разных возрастов в режимах S и D приведено на рис. 6.

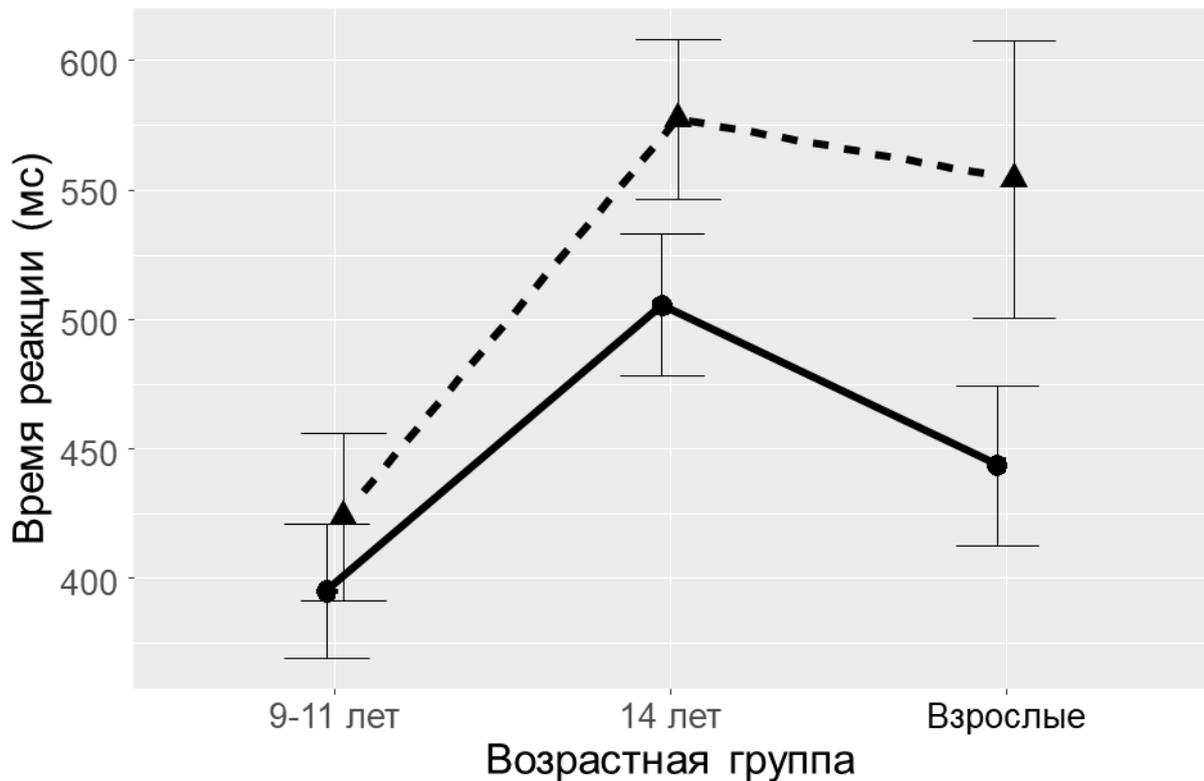


Рис. 6. Зависимость времени реакции (RT) от возраста испытуемых при использовании двух режимов предъявления – статического (кружки и сплошная линия) и динамического (треугольники и пунктирная линия), столбики ошибок – две стандартные ошибки среднего.

Дисперсионный анализ, проведенный по аналогичной описанной выше схеме, позволил обнаружить следующие значимые влияния факторов:

- фактора РЕЖИМ ( $F(1, 63) = 28,926, p < 0,001, \eta^2 = 0,315$ ), в режиме S RT ниже, чем в режиме D;
- фактора ВОЗРАСТ ( $F(2, 63) = 10,710, p < 0,001, \eta^2 = 0,254$ ), время реакции с возрастом увеличивается, значимые различия наблюдаются при сравнении младшей группы с подростками и взрослыми ( $p < 0,001$  и  $p = 0,029$  соответственно, с поправкой Тьюки), взрослые и подростки отличаются незначимо.

Было также обнаружено влияние взаимодействия факторов РЕЖИМ  $\times$  ВОЗРАСТ ( $F(2, 63) = 3,265, p = 0,045, \eta^2 = 0,094$ ), различия между RT при двух режимах предъявления с возрастом увеличиваются. По результатам попарного сравнения достоверные различия в двух режимах наблюдаются в группах подростков и взрослых ( $p = 0,019$  и  $p = 0,008$  с поправкой Тьюки соответственно).

Влияние на RT остальных факторов и их взаимодействий оказалось незначимым ( $p > 0,1$  во всех случаях).

### ***Анализ времени выполнения движений при воспроизведении траекторий***

Среднее время выполнения одного элемента у испытуемых разных возрастов в режимах S и D приведено на рис. 7.

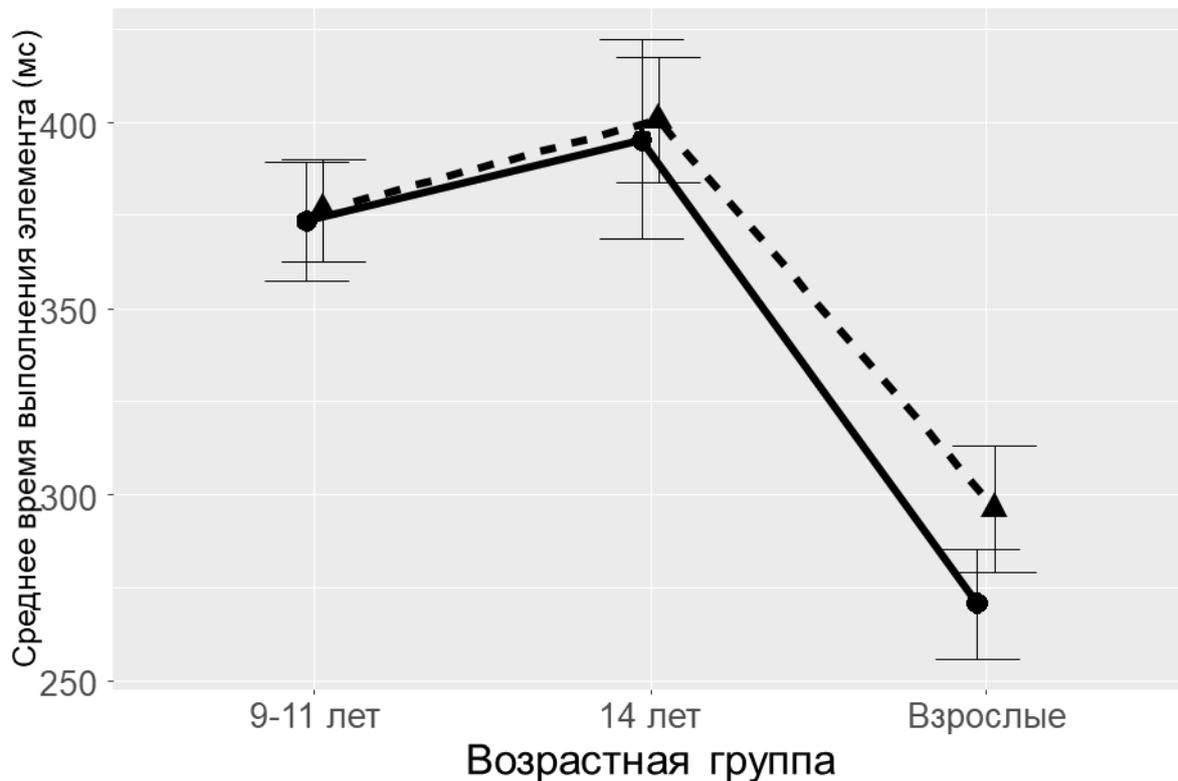


Рис. 7. Зависимость времени выполнения элемента (МТ) от возраста испытуемых при использовании двух режимов предъявления – статического (кружки и сплошная линия) и динамического (треугольники и пунктирная линия), столбики ошибок – две стандартные ошибки среднего.

Дисперсионный анализ, проведенный по аналогичной описанной выше схеме, позволил обнаружить следующие значимые влияния факторов:

- фактора СЛОЖНОСТЬ ( $F(2, 62) = 5,919, p = 0,004, \eta^2 = 0,160$ ), время выполнения одного элемента уменьшается по мере роста сложности траектории;
- фактора ВОЗРАСТ ( $F(2, 63) = 17,960, p < 0,001, \eta^2 = 0,363$ ), время выполнения элемента последовательности резко уменьшается у взрослых испытуемых.

Было выявлено также два значимых влияния взаимодействия:

- влияние взаимодействия факторов ВОЗРАСТ X СЛОЖНОСТЬ ( $F(4, 126) = 5,787, p < 0,001, \eta^2 = 0,160$ ). У детей и подростков МТ уменьшается по мере усложнения последовательности, а у взрослых – напротив, МТ максимально при выполнении самой сложной последовательности (см. рис. 8);
- влияние взаимодействия факторов РЕЖИМ X СЛОЖНОСТЬ ( $F(2, 62) = 3,920, p = 0,025, \eta^2 = 0,112$ ). Время выполнения элементов в простых (состоящих из четырех элементов) последовательностях значительно меньше в режиме S по сравнению с режимом D, а в более сложных последовательностях – напротив, статический стимул воспроизводится дольше, чем ди-

намический.

Влияние остальных факторов и их взаимодействий оказалось незначимым ( $p > 0,1$  во всех случаях).

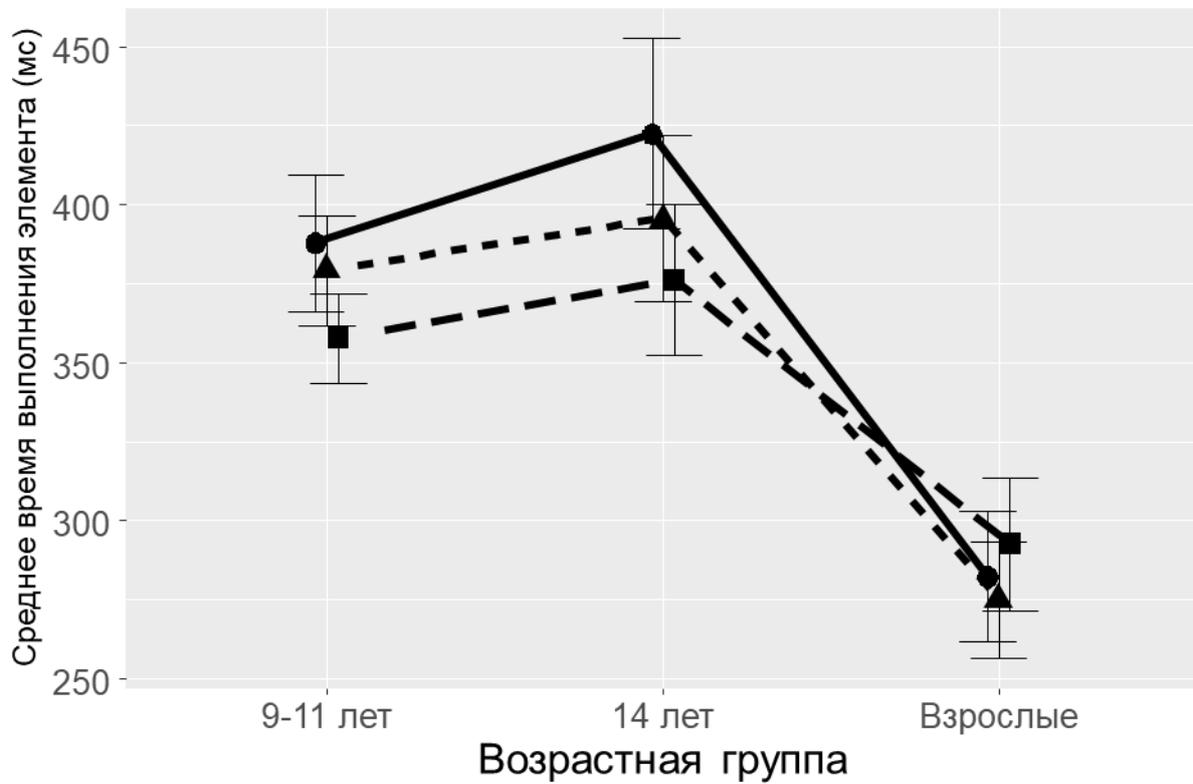


Рис. 8. Зависимость времени выполнения элемента (МТ) от возраста испытуемых при восприятии последовательностей разной сложности – 4 (кружки), 5 (треугольники) и 6 (квадраты) элементов, столбики ошибок – две стандартные ошибки среднего.

## Обсуждение результатов

Результаты исследования показали, что характеристики ответов испытуемых заметно различаются как в зависимости от возрастной группы, так и от способа предъявления последовательности, а также ее длины. Рассмотрим более подробно особенности выполнения экспериментального задания в зависимости от основных факторов в нашем исследовании.

Число ошибок с возрастом уменьшается – оно максимально в группе детей 9–11 лет, подростки делают несколько меньше ошибок, но это различие незначимо. У взрослых же наблюдается значимое снижение числа ошибок как по сравнению с детьми, так и по сравнению с подростками. Если связывать число ошибок с объемом рабочей памяти, то наши данные показывают, что у подростков он оказывается выше, чем у детей 9–11 лет, но меньше, чем у взрослых. Сходные данные об улучшении точности запоминания серийной информации получены и в других исследованиях (например, от 9 к 13 годам – в работе [Burnett Heyes et al., 2012]; от раннего подросткового к взрослому возрасту – в работе [Burggraaf et al., 2018]).

На рис. 5 видно, что число ошибок, допускаемых при предъявлении траектории в режиме S, заметно ниже, чем в режиме D. Эта разница больше в младшем возрасте, а затем она уменьшается. Это характеризует задачу запоминания динамической траектории как более слож-

ную, что совпадает с данными о запоминании статических и динамических зрительно-пространственных паттернов у детей и взрослых [Pickering et al., 2001]. Можно предположить, что статический образец позволяет создать более полную и устойчивую репрезентацию, которая лучше удерживается в рабочей памяти. Уменьшение с возрастом расхождения в точности выполнения заданий, совершаемых в режимах S и D, может свидетельствовать о том, что в младшем возрасте в двух режимах формируются разные по характеру репрезентации, у подростков этот эффект слабеет, а у взрослых различия в характере репрезентаций практически сходят на нет.

Интересно, что число ошибок в режиме S практически не зависит от сложности траектории, в то время как в режиме D наблюдается явное увеличение числа ошибок по мере усложнения последовательности, причем это наблюдается во всех возрастных группах (известный по литературе эффект длины последовательности [Agam et al., 2005, 2007]). Отсутствие такого эффекта в режиме S может говорить о том, что способ его сохранения (репрезентация) не обязательно носит собственно серийный характер, возможно, что в этом случае траектория запоминается как целостный образ, зрительно-пространственная конфигурация, а серийность возникает только в контексте необходимости ее воспроизведения. В динамическом же режиме траектория движения изначально задается как последовательность с определенным порядком элементов. Если выстраивание последовательности при запоминании статического образца происходит не изначально (что могло бы привести к появлению эффекта длины), то оно осуществляется во время удержания последовательности в рабочей памяти и/или непосредственно при подготовке двигательного ответа. В таком случае можно ожидать, что в двух режимах будет различаться время, затрачиваемое на подготовку движений. Рассмотрим время реакции подробнее.

При сравнении продолжительности подготовки к выполнению последовательности после императивного сигнала (RT) нами получены до некоторой степени контринтуитивные результаты. При росте возможностей рабочей памяти и управляющих функций с возрастом можно было ожидать снижения времени реакции (см., например, [Leon-Carrion et al., 2004]), однако в нашем случае это оказалось не так. RT значительно увеличивается в старших возрастных группах. Если дети 9–11 лет тратят на подготовку относительно мало времени, то к 14 годам это время увеличивается и немного снижается во взрослой выборке (оставаясь бóльшим по сравнению с детьми). Возможное объяснение таково: увеличение RT можно связать с более тщательным и подробным планированием выполнения серийного движения. За счет этого повышается точность двигательного ответа (что подтверждается описанным выше снижением числа ошибок с возрастом), а также может уменьшаться время выполнения движений. И действительно, можно заметить снижение времени выполнения элемента последовательности (MT) у взрослых по сравнению с детьми 9–11 лет и подростками. У подростков на фоне увеличения времени реакции такого снижения времени выполнения последовательности не наблюдается. Можно предположить, что у взрослых в латентном периоде формируется более детальный план выполнения всей последовательности, за счет чего время, затрачиваемое на его реализацию, сокращается. С другой стороны, у подростков, как и у детей, в большей степени выражен компонент текущего (on-line) программирования, что приводит к относительно большому MT за счет замедления движений и появления остановок.

При сопоставлении времени реакции в двух режимах можно заметить, что различия усиливаются с возрастом. Время подготовки движения у детей 9–11 лет в режимах S и D различается несущественно, в группах подростков – заметно сильнее (и различия становятся значимыми), а в группе взрослых различие еще более усиливается. Та же, но менее выраженная тенденция наблюдается и в отношении MT.

Таким образом, с возрастом увеличение латентного времени сопровождается снижением

числа ошибок, при этом различия между режимами S и D в точности ответов уменьшаются, а в отношении временных параметров (в первую очередь – RT), напротив, увеличиваются. В целом это может говорить о том, что репрезентации, возникающие при разных способах предъявления, отличаются, в режиме D они оказываются менее четкими, особенно у детей и подростков, однако за счет увеличения времени подготовки моторного ответа (то есть перевода репрезентаций в моторную форму) эти различия в четкости в меньшей степени сказываются на точности воспроизведения.

При этом у подростков наблюдается, с одной стороны, увеличение латентного времени при динамическом предъявлении траектории (как у взрослых испытуемых), а с другой – относительно медленное выполнение самих движений (как у детей младшего возраста). Это может быть связано с тем, что дети 14 лет уже переходят на стадию подробного планирования всей последовательности движений в латентном периоде, что характерно для взрослых, однако им требуется дополнительное уточнение и корректировка движений уже непосредственно в процессе выполнения серийного движения.

## Заключение

Проведенное эмпирическое исследование позволяет подтвердить сформулированные гипотезы: с возрастом возможности рабочей памяти увеличиваются, причем у подростков они выше, чем у детей, но ниже, чем у взрослых. Эта возрастная группа занимает промежуточное положение между детьми и взрослыми: у них уже достаточно высокое качество и точность репрезентации, однако еще недостаточно сформирован текущий контроль моторной реализации.

Сравнение воспроизведения последовательностей, заданных различными способами, показывает различия между ними как в точности, так и во временных параметрах ответов, а также различную возрастную динамику – по мере взросления количество ошибок в двух режимах различается все меньше, в то время как временные параметры выполнения движений, напротив, начинают различаться.

## Литература

Безруких М.М., Киселев М.Ф., Комаров Г.Д., Козлов А.П., Курнешова Л.Е., Ланд С.Б., Носкин Л.А., Носкин В.А., Пивоваров В.В. Возрастные особенности организации двигательной активности у детей 6–16 лет. Физиология человека, 2000, 26(3), 100–107.

Бетелева Т.Г., Мачинская Р.И., Курганский А.В., Фарбер Д.А. Мозговая организация рабочей памяти в младшем школьном возрасте. Мозговые механизмы формирования познавательной деятельности в дошкольном и младшем школьном возрасте. МГПСУ, Москва-Воронеж, 2014, 237–262.

Корнеев А.А., Курганский А.В. Внутренняя репрезентация серии движений при воспроизведении статического рисунка и траектории движущегося объекта. Журнал высшей нервной деятельности им. И.П.Павлова, 2013, 4, 437–450. doi: 10.7868/S0044467713040060

Agam Y., Bullock D., Sekuler R. Imitating unfamiliar sequences of connected linear motions. Journal of Neurophysiology, 2005, 94(4), 2832–2843. doi: 10.1152/jn.00366.2005

- Agam Y., Galperin H., Gold B.J., Sekuler R. Learning to imitate novel motion sequences. *Journal of Vision*, 2007, 7(5), 1–17. doi: 10.1167/7.5.1
- Agam Y., Huang J., Sekuler R. Neural correlates of sequence encoding in visuomotor learning. *Journal of neurophysiology*, 2010, 103(3), 1418–1424. doi: 10.1152/jn.00662.2009
- Badan M., Hauert A., Mounoud P. Sequential pointing in children and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 2000, 75(1), 43–69. doi: 10.1006/jecp.1999.2522
- Baddeley A. Working memory: Theories, models, and controversies. *Annual review of psychology*, 2012, 63(3), 1–29. doi: 10.1146/annurev-psych-120710-100422
- Baddeley A.D., Hitch G.J., Allen R.J. From short-term store to multicomponent working memory: The role of the modal model. *Memory & cognition*, 2019, 47(4), 575–588. doi: 10.3758/s13421-018-0878-5
- Baddeley A.D., Hitch G.J. Working memory. G.H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation*, 1974, 8, 47–89. doi: 10.1016/S0079-7421(08)60452-1
- Bisley J.W., Zaksas D., Droll J.A., Pasternak T. Activity of neurons in cortical area MT during a memory for motion task. *Journal of neurophysiology*, 2004, 91(1), 286–300. doi: 10.1152/jn.00870.2003
- Burggraaf R., Frens M.A., Hooge I.T.C., van der Geest J.N. Performance on tasks of visuospatial memory and ability: A cross-sectional study in 330 adolescents aged 11 to 20. *Applied Neuropsychology: Child*, 2018, 7(2), 129–142. doi:10.1080/21622965.2016.126
- Burnett Heyes S., Zokaei N., van der Staaij I., Bays P.M., Husain M. Development of visual working memory precision in childhood. *Developmental science*, 2012, 15(4), 528–539. doi: 10.1111/j.1467-7687.2012.01148.x
- Chai W.J., Abd Hamid A.I., Abdullah J.M. Working memory from the psychological and neurosciences perspectives: A review. *Frontiers in psychology*, 2018, 9, 401. doi: 10.3389/fpsyg.2018.00401
- Diamond A. *The early development of executive functions. Lifespan cognition: Mechanisms of change*, New York, NY, US: Oxford University Press, 2006, 70–95.
- Gathercole S.E., Pickering S.J., Ambridge B., Wearing H. The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental psychology*, 2004, 40(2), 177–190. doi: 10.1037/0012-1649.40.2.177
- Ginsburg V., Archambeau K., van Dijck J.-P., Chetail F., Gevers W. Coding of serial order in verbal, visual and spatial working memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 2017, 146(5), 632–650. doi: 10.1037/xge0000278
- Hitch G.J., Woodin M.E., Baker S. Visual and phonological components of working memory in children. *Memory & Cognition*, 1989, 17(2), 175–185. doi: 10.3758/BF03197067
- Hurlstone M.J., Hitch G.J. How is the serial order of a spatial sequence represented? Insights from transposition latencies. *Journal of experimental psychology: learning, memory, and cognition*, 2015, 41(2), 295–324. doi: 10.1037/a0038223

Hurlstone M.J., Hitch G.J., Baddeley A.D. Memory for serial order across domains: An overview of the literature and directions for future research. *Psychological bulletin*, 2014, 140(2), 339–373. doi: 10.1037/a0034221

Inaba N., Shinomoto S., Yamane S., Takemura A., Kawano K. MST neurons code for visual motion in space independent of pursuit eye movements. *Journal of Neurophysiology*, 2007, 97(5), 3473–3483. doi: 10.1152/jn.01054.2006

Isbell E., Fukuda K., Neville H.J., Vogel E.K. Visual working memory continues to develop through adolescence. *Frontiers in psychology*, 2015, 6, 696. doi: 10.3389/fpsyg.2015.00696

Kang M.S., Hong S.W., Blake R., Woodman G.F. Visual working memory contaminates perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2011, 18(5), 860–869. doi: 10.3758/s13423-011-0126-5

Kiselev S., Espy K.A., Sheffield T. Age-related differences in reaction time task performance in young children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 2009, 102(2), 150–166.

Lehnert G., Zimmer H.D. Modality and domain specific components in auditory and visual working memory tasks. *Cognitive processing*, 2008, 9(1), 53–61. doi: 10.1007/s10339-007-0187-6

Leon-Carrion J., García-Orza J., Pérez-Santamaría F.J. Development of the inhibitory component of the executive functions in children and adolescents. *International Journal of Neuroscience*, 2004, 114(10), 1291–1311. doi: 10.1080/00207450490476066

Logie R.H. *Visuo-spatial working memory*, Psychology Press, 2014.

Luciana M., Nelson A. Assessment of neuropsychological function through use of the Cambridge Neuropsychological Testing Automated Battery: performance in 4-to 12-year-old children. *Developmental neuropsychology*, 2002, 22(3), 595–624. doi: 10.1207/S15326942DN2203\_3

Luciana M., Conklin H.M., Hooper J., Yarger R.S. The development of nonverbal working memory and executive control processes in adolescents. *Child development*, 2005, 76(3), 697–712. doi: 10.1111/j.1467-8624.2005.00872.x

Mammarella I.C., Pazzaglia F., Cornoldi C. Evidence for different components in children's visuospatial working memory. *British Journal of Developmental Psychology*, 2008, 26(3), 337–355. doi: 10.1348/026151007X236061

Nee D.E., D'Esposito M. The representational basis of working memory. *Behavioral Neuroscience of Learning and Memory*, Springer, Cham, 2016, 213–230. doi: 10.1007/7854\_2016\_456

Nelson A., Monk S., Lin J., Carver L.J., Thomas K.M., Truwit L. Functional neuroanatomy of spatial working memory in children. *Developmental psychology*, 2000, 36(1), 109. doi: 10.1037/0012-1649.36.1.109

Pasternak T., Zaksas D. Stimulus specificity and temporal dynamics of working memory for visual motion. *Journal of Neurophysiology*, 2003, 90(4), 2757–2762. doi: 10.1152/jn.00422.2003

Pickering S.J., Gathercole S.E., Hall M., Lloyd S.A. Development of memory for pattern and path: Further evidence for the fractionation of visuo-spatial memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 2001, 54(2), 397–420. doi: 10.1080/713755973

Rhodes B.J., Bullock D., Verwey W.B., Averbeck B.B., Page M.P. Learning and production of movement sequences: Behavioral, neurophysiological, and modeling perspectives. *Human movement science*, 2004, 23(5), 699–746. doi: 10.1016/j.humov.2004.10.008

Roberts K.L., Strait J.A. E., Decker S.L. Developmental Trajectories of Verbal, Static Visual-Spatial, and Dynamic Visual-Spatial Working Memory. *Contemporary School Psychology*, 2018, 22(4), 458–467. doi: 10.1007/s40688-018-0176-z

Soemer A., Saito S. Domain-specific processing in short-term serial order memory. *Journal of Memory and Language*, 2016, 88, 1–17. doi: 10.1016/j.jml.2015.12.003

Spronk M., Vogel E.K., Jonkman L.M. Electrophysiological evidence for immature processing capacity and filtering in visuospatial working memory in adolescents. *PLoS One*, 2012, 7(8), e42262. doi: 10.1371/journal.pone.0042262

Thomas K.M., King S.W., Franzen P.L., Welsh T.F., Berkowitz A.L., Noll D.C., Birmaher V., Casey B.J. A developmental functional MRI study of spatial working memory. *Neuroimage*, 1999, 10(3), 327–338. doi: 10.1006/nimg.1999.0466

Vergara J., Rivera N., Rossi-Pool R., Romo R. A neural parametric code for storing information of more than one sensory modality in working memory. *Neuron*, 2016, 89(1), 54–62. doi: 10.1006/nimg.1999.0466

Verwey W.B., Shea H., Wright D.L. A cognitive framework for explaining serial processing and sequence execution strategies. *Psychonomic bulletin & review*, 2015, 22(1), 54–77. doi: 10.3758/s13423-014-0773-4

Wing A.M. Motor control: Mechanisms of motor equivalence in handwriting. *Current biology*, 2000, 10(6), R245–R248. doi: 10.1016/S0960-9822(00)00375-4

Поступила в редакцию 14 марта 2020 г. Дата публикации: 07 апреля 2020 г.

## Сведения об авторах

*Корнеев Алексей Андреевич.* Кандидат психологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория нейропсихологии, факультет психологии, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, ул. Моховая, д. 11, стр. 9, 125009 Москва, Россия; старший научный сотрудник, лаборатория нейрофизиологии когнитивной деятельности, Институт возрастной физиологии, Российская академия наук, ул. Погодинская, д. 8, корп. 2, 119121 Москва, Россия.

Email: korneeff@gmail.com

*Ломакин Дмитрий Игоревич.* Научный сотрудник, лаборатория нейрофизиологии когнитивной деятельности, Институт возрастной физиологии, Российская академия наук, ул. Погодинская, д. 8, корп. 2, 119121 Москва, Россия

E-mail: lomakindima4@gmail.com

*Курганский Андрей Васильевич.* Доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория нейрофизиологии когнитивной деятельности, Институт возрастной физиологии, Российская академия наук, ул. Погодинская, д. 8, корп. 2, 119121 Москва, Россия; научный сотрудник, лаборатория когнитивных исследований, факультет психологии, Институт общественных наук, Российская академия народного хозяйства и государственной службы, пр. Вернадского, 82, стр. 1, 119571 Москва, Россия

E-mail: [akurg@yandex.ru](mailto:akurg@yandex.ru)

## **Ссылка для цитирования**

Корнеев А.А., Ломакин Д.И., Курганский А.В. Возрастные особенности запоминания последовательности движений, заданной зрительным образцом. // Психологические исследования. 2020. Т. 13, № 69. С. 3. URL: <http://psystudy.ru>

## **Адрес статьи**

<http://psystudy.ru/index.php/num/2020v13n69/1725-korneev69.html>