

Запоминание и воспроизведение последовательности движений младшими школьниками и подростками: возрастные особенности допускаемых ошибок

А.А. Корнеев

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Д.И. Ломакин

Институт возрастной физиологии РАО Москва, Россия

Поступила 20 января 2018/ Принята к публикации: 12 февраля 2018

Memorizing and reproducing the sequence of movements by younger schoolchildren and adolescents: age-specific mistakes

Alexey A. Korneev*

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Dmitry I. Lomakin

Institute of Developmental Physiology, RAO Moscow, Russia

* Corresponding author E-mail: korneeff@gmail.com

Received January 20, 2018 / Accepted for publication: February 12, 2018

Актуальность (контекст) тематики статьи. Известно, что при переходе от младшего школьного к подростковому возрасту происходит улучшение рабочей памяти, прежде всего, ее объема. Однако недостаточно исследована специфика изменений репрезентации серийной информации в рабочей памяти в этот возрастной период, которая может объяснить механизмы этого улучшения.

Цель. В данной работе предпринимается попытка исследования этого вопроса с помощью анализа особенностей запоминания и отсроченного двигательного воспроизведения серийных последовательностей, заданных зрительным образцом. Исследование проводилось в двух возрастных группах: детей 9–11 лет и подростков 14 лет. Нами проверялись ряд гипотез, направленных на изучение особенностей рабочей памяти детей и подростков.

Описание хода исследования. В исследовании приняли участие младшие школьники – 32 человека в возрасте 10.4 ± 0.75 лет и подростки – 25 человек в возрасте 14.6 ± 0.3 лет. Задачей испытуемых было отсроченное воспроизведение на графическом планшете ломанных кривых разной длины (от 4 до 6 элементов), предъявляемых разными способами (либо статически в виде рисунка, либо динамически – с помощью движущегося, но не оставляющего следа курсора).

Результаты исследования. Анализировались ошибки, допускаемые испытуемыми разных возрастов в различных экспериментальных условиях. Было выделено три типа ошибок: грубые искажения стимулов, добавление или пропуск элементов последовательности и нарушение пропорций стимульной траектории. Статистический анализ показал, что число ошибок у детей 9–11 лет и подростков, в целом, различается незначимо ($p=0.1$), однако есть значимое взаимодействие возраста и режима предъявления ($p=0.017$). Возрастные различия заметны при динамическом предъявлении стимула и практически отсутствуют в статическом режиме. Анализ ошибок разного типа показал значимые различия между возрастными группами только в отношении ошибок усложнения и упрощения траекторий ($p=0.041$).

Выводы. На основании полученных данных можно говорить о том, что у подростков увеличивается объем удерживаемой в рабочей памяти серийной информации и повышение точности ее репрезентации в более сложной ситуации динамического предъявления. При этом в силу ограниченных способностей подростков точность воспроизведения (и репрезентации) у них снижается при усложнении задачи. Меньшее число ошибок добавления или пропуска элементов в старшей группе может быть связано с развитием управляющих функций в подростковом возрасте.

Ключевые слова: рабочая память, серийные движения, графические движения, подростки, младшие школьники, внутренняя репрезентация.

Background. The paper describes the results of the experimental study of working memory in early schoolchildren and adolescents. The capacity of working memory develops through preadolescence to adolescence, while the developmental changes of representations of serial order are not clear enough so far.

Objective. The accuracy of delayed reproduction of movements (the open polygonal chains, trajectories) reveals. The sample included 32 early schoolchildren (mean age 10.4 ± 0.75 years old) and 25 adolescents (mean age 14.6 ± 0.3 years old). The subjects reproduced trajectories of different length (from 4 to 6 elements) using the graphical tablet. Another factor in the experiment carried out was a mode of stimulus presentation: the trajectories in were presented either as a static line-drawing (static mode) or a small moving pointer (dynamic mode).

Design. The errors of reproduction in two age groups and in different conditions were analyzed. We distinguished three types of errors: (1) severe distortions which are caused by inability to keep the sequence in working memory; (2) insertions or omissions of elements of the trajectory which are related to the problems of encoding the visual spatial information in the motor representation; (3) distortions of proportions of the trajectories, which are related with visual-motor coordination during motor reproduction of the sequences.

Research results showed that in adolescence the accuracy of delayed reproduction is better than in early ages. The most obvious difference in accuracy between the groups of early schoolchildren and adolescents were observed in dynamic mode. The analysis of different types of errors revealed that adolescents less often make insertions and omissions of elements. It may be caused by development of executive functions in adolescents.

Conclusion. The study showed that the capacity of working memory increases in adolescents. In addition, the precision of the representation of serial information are higher in adolescents in the more complicated dynamic mode.

Keywords: working memory, serial movements, graphic movements, adolescents, early schoolchildren, internal representation.

Способность сохранять и воспроизводить серийную информацию является основой многих повседневных действий человека. Это обусловлено тем, что значительная часть получаемой и запоминаемой нами информации имеет серийную структуру. Примерами серийных последовательностей могут служить речь, письмо, многие спортивные движения и т.п. Последовательности могут быть знакомыми, храниться и извлекаться при необходимости. Отдельный интерес представляет собой запоминание, удержание и воспроизведение незнакомой, новой для человека серийной информации. Например, как человек запоминает и воспроизводит новый графический символ или новую последовательность движений при обучении танцам, боевым искусствам и пр.?

является предметом исследований и обсуждений (Hurlstone, Hitch, Baddeley, 2014; Hurlstone, Hitch, 2015). В рамках данной работы мы предприняли попытку проанализировать особенности сохранения и воспроизведения двигательных последовательностей, заданных зрительным образцом, детьми младшего школьного возраста и подростками, и таким образом оценить особенности репрезентаций, сохраняющихся в рабочей памяти на различных этапах ее развития.

Репрезентация последовательности движений строится на основе сенсорной информации, которая может быть представлена в разной форме. Свойства исходной информации могут по-разному сказываться на точности и полноте репрезентации, что, в свою очередь, может проявиться как в качественных, так и во временных ха-

2016; Constantinidis, 2016; Hurlstone, Hitch, Baddeley, 2014). Высказываются предположения о наличии специфических видов репрезентации, построенных на основании различных типов сенсорной информации. При этом исследователи получают данные как в пользу (Gruber & von Cramon, 2001; Alloway, Gathercole, Pickering, 2006; Nee & D'Esposito, 2016), так и против (Vergara et al., 2016) наличия специфических форм репрезентаций, зависящих от типа сохраняемой информации (Camos, 2017).

Помимо модальности, важным является различие формы предъявления информации: статической или динамической. Например, последовательность движений может быть представлена в виде статического рисунка (схема движения) или в виде динамического образа. Экспериментальные исследования показывают, что удерживаемая в рабочей памяти зрительная информация может храниться в разной форме в зависимости от того, является ли она статической или динамической. Так, на основании анализа запоминания и воспроизведения зрительно-пространственной информации детьми разных возрастов делается вывод о хранении динамической и статической информации в разных подсистемах зрительно-пространственной рабочей памяти. Например, при исследовании запоминания зрительно-пространственной памяти у детей 7–10 лет показано, что они запоминают статическую информацию лучше динамической, причем, это происходит в задачах разного типа (кубики Корси и запоминание лабиринтов, Pickering et al., 2001). В работе делается вывод, что за удержание статической и динамической информации в рабочей зрительно-пространственной памяти отвечают разные субкомпоненты. В пользу различия двух типов информации, с точки зрения механизмов ее запоминания и удержания в рабочей памяти, говорят также данные нейрофизиологических исследований. При построении внутренней репрезентации на основе статической информации, как это имеет место, например, при письме (Wing, 2000), модально-неспецифическая пространственная информация сохраняется в задней теменной коре PPC (Lehnert & Zimmer, 2008). Согласно данным, полу-

Мы предприняли попытку проанализировать особенности сохранения и воспроизведения двигательных последовательностей, заданных зрительным образцом, детьми младшего школьного возраста и подростками, и таким образом оценить особенности репрезентаций, сохраняющихся в рабочей памяти на различных этапах ее развития

В ситуации восприятия информации о новой последовательности формируется ее репрезентация, которая затем удерживается в рабочей памяти. Такая репрезентация при необходимости является основой воспроизведения последовательности, причем, ее строе-

рактеристиках воспроизведения запомненной серии. В частности, в современных работах обсуждаются особенности строения репрезентации в зависимости от модальности исходной информации: вербальной, зрительной или пространственной (Ginsburg et al., 2017; Soemer, Saito,



Алексей Андреевич Корнеев –

кандидат психологических наук, старший научный сотрудник лаборатории нейропсихологии факультета психологии МГУ имени М.В. Ломоносова
E-mail: korneeff@gmail.com
<https://istina.msu.ru/profile/korneev/>



Дмитрий Игоревич Ломакин –

младший научный сотрудник лаборатории нейрофизиологии когнитивной деятельности Института возрастной физиологии РАО
E-mail: lomakindima4@gmail.com
<https://istina.msu.ru/profile/LomakinDI/>

ченным на приматах (Bisley & Pasternak, 2000; Pasternak & Zaksas, 2003) при рассмотрении динамической зрительной информации в системе рабочей памяти участвуют чувствительные к движению нейроны экстростриарных зрительных областей MT/MST. При этом ответы нейронов зоны MST не зависят от направления движения глаз и, следовательно, от положения изображения объекта на сетчатке (Inaba et al., 2007). Обнаруженная в других исследованиях интерференция текущей оценки направления движения и следа памяти движения другого направления говорит в пользу наличия в мозговой системе рабочей памяти сенсорных областей, чувствительных к направлению движения (Kang et al., 2011).

Пониманию того, как формируются репрезентации такого рода информации в рабочей памяти, может способствовать исследование возрастных особенностей запоминания и воспроизведения последовательностей. В частности, можно проследить, насколько улучшается качество репрезентации при переходе от детского к подростковому возрасту. Исследования показывают, что, в целом, возможности рабочей памяти (в первую очередь, объем) в подростковом возрасте увеличиваются (Gathercole et al., 2004). В то же время, рабочая память подростков еще не достигает уровня развития, наблюдающегося у взрослых. В недавней работе (Isbell et al., 2015) показано, что объем зрительной рабочей памяти у представителей трех возрастных групп (13, 16 лет и 21 год) различается. В этом возрастном диапазоне функции рабочей памяти продолжают развиваться, что связывается с созреванием обеспечивающих их мозговых структур. К подростковому возрасту происходит созревание принимающих важное участие в функционировании рабочей памяти мозговых структур, прежде всего, лобных (Conklin et al., 2007). Это может приводить к улучшению качества репрезентации и снижению числа допускаемых ошибок. Существуют различные данные о сопоставимости результатов выполнения тестов на рабочую память у подростков и взрослых. Так, показано, что в 12 лет у испытуемых наблюдается менее успешное, по сравнению со взрослыми, выполнение заданий, направленных на оценку состояния управляющих

функций (executive functions), которые являются важным компонентом рабочей памяти (Welsh, Pennington, Groisser, 1991). Это согласуется с данными другого исследования, в котором показано отставание детей 12 лет от взрослых по объему зри-

Объем рабочей памяти в подростковом возрасте приближается к показателям, характерным для взрослых испытуемых, в то время как точность сохраняемой информации, особенно при большой нагрузке, еще не достигает сопоставимого со взрослыми уровня

тельной памяти (Luciana & Nelson, 2002). В другом исследовании (Spronk, Vogel, Jonkman, 2012) показано, что эффективность решения задач, оценивающих возможности зрительно-пространственной памяти (задачи на обнаружение изменений), у подростков ниже, чем у взрослых, причем, прежде всего, это проявляется в ситуации зашумления стимульного материала, введения дистракторов и увеличения количества стимулов.

Согласно результатам работы Luciana и коллег (2005), посвященной развитию рабочей памяти у подростков, в задаче на воспроизведение положения объекта в пространстве (Spatial delay response) при немедленном ответе точность у детей и подростков равна, что говорит о примерно равных возможностях немедленного копирования. При задержанном ответе у детей точность падает намного больше, чем у подростков, что свидетель-

Возрастные изменения объема и возможностей рабочей памяти могут отражаться на общей способности запоминать более или менее сложную серию элементов. При превышении возможностей рабочей памяти будут появляться ошибки, при которых испытуемый не способен воспроизвести серию и искажает последовательность вплоть до полной невозможности ее воспроизведения

ствует об их худшей способности сохранять и удерживать зрительно-пространственную информацию. В той же работе показано, что количество упрощений последовательности при воспроизведении серии из 6 элементов у детей в три раза выше, чем у подростков, при этом результаты взрослых незначительно отличаются от результатов подростков, что может говорить о большем объеме рабочей памяти у подростков, по сравнению с детьми.

Таким образом, состояние функций рабочей памяти в подростковом возрасте отличается как от рабочей памяти

детей младшего возраста, так и от возможностей взрослого человека. Объем рабочей памяти в подростковом возрасте приближается к показателям, характерным для взрослых испытуемых, в то время как точность сохраняемой информации, особенно при большой нагрузке, еще не достигает сопоставимого со взрослыми уровня.

мации, особенно при большой нагрузке, еще не достигает сопоставимого со взрослыми уровня.

Исследование отсроченного моторного воспроизведения более или менее сложных последовательностей по зрительно заданному образцу позволяет оценить объем рабочей памяти и точность репрезентаций. Одним из инструментов такой оценки может служить анализ характера ошибок, допускаемых испытуемыми при воспроизведении. В работах, использующих задачи на запоминание и воспроизведение зрительно-пространственных конфигураций (серий элементов), как правило, рассматривается общее число правильно и неправильно выполненных проб, но практически не обсуждаются типы допускаемых ошибок, их соотношение и возможные причины.

По нашему мнению, можно предположить, что возрастные изменения объема

и возможностей рабочей памяти могут отражаться на общей способности запоминать более или менее сложную серию элементов. При превышении возможностей рабочей памяти будут появляться ошибки, при которых испытуемый не способен воспроизвести серию и искажает последовательность вплоть до полной невозможности ее воспроизведения.

С другой стороны, сниженная четкость репрезентации может проявляться в менее грубых нарушениях, таких как упрощение (пропуск элементов) или усложнение (добавление лишних элементов)

серийной последовательности. Такие ошибки могут быть связаны с трудностями перекодирования недостаточно четкой репрезентации в моторную форму. Этому соответствует ряд работ, в которых указывается, что ошибки по типу добавления лишних элементов связаны с ошибками в манипуляции доступной репрезентацией и вызваны слабостью центрального управляющего компонента рабочей памяти (Passolunghi & Siegel, 2001).

При двигательном воспроизведении последовательности может проявляться еще один вид ошибок – это нарушение пропорций фигуры при сохранении общей конфигурации последовательности. Такого типа ошибки выделяются при оценке нейропсихологических проб (Ахутина и др., 2016) и называются дизметриями. Они в большей степени могут быть вызваны не слабостью или неточностью репрезентации фигуры в рабочей памяти, а особенностями зрительно-моторных координаций при реализации последовательности.

В наших предыдущих исследованиях проводился сравнительный анализ воспроизведения последовательностей разной длины, предъявляемых в виде статического рисунка и динамического объекта, детьми 9–11 лет и взрослыми (Антонова и др., 2015). Анализ показал, что точность воспроизведения последовательности падает с увеличением ее длины,

и что большее число ошибок наблюдается при предъявлении траектории в виде динамического объекта. Важно подчеркнуть, что эффекты длины последовательности и способа ее предъявления достаточно отчетливы в детском возрасте и практически отсутствуют у взрослых. Это отчасти обусловлено тем, что взрослые испытуемые делают очень мало ошибок.

В рамках данной работы мы предпринимаем попытку проследить особенности изменения качества запоминания и воспроизведения у подростков (14 лет), по сравнению с детьми младшего школьного возраста (9–11 лет). На основании анализа литературы и предшествующих исследований можно сформулировать следующие гипотезы:

- 1) У ребят подросткового возраста точность репрезентации последовательности в рабочей памяти будет выше, чем у детей 9–11 лет, что выразится в меньшем количестве ошибок.
- 2) Точность репрезентации будет различаться в зависимости от сложности последовательности и способа ее предъявления в обеих возрастных группах, однако в группе подростков эти эффекты будут выражены слабее.
- 3) Число ошибок разного типа будет по-разному изменяться в зависимости от возраста испытуемых. В группе подростков меньшее число ошибок может быть связано с общим улучшением

качества репрезентации, а также с созреванием управляющих функций, что может приводить к улучшению моторного воспроизведения последовательности.

Описание исследования

Испытуемые

В эксперименте приняли участие две группы испытуемых: младшие школьники предподросткового возраста – 32 человека, средний возраст 10.4 ± 0.75 лет и подростки – 25 человек, средний возраст 14.6 ± 0.3 лет. Все испытуемые правши, без диагностированных неврологических отклонений, с нормальным или скорректированным зрением. Ведущая рука определялась по критерию письма.

Экспериментальная задача

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

Сtimульный 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. Использовались три набора траекторий, различающихся количеством элементов ($N = 4, 5, 6$), по 16 различных траекторий в каждом (всего 48 траекторий). Траектории предъявлялись на экране монитора компьютера, белые на черном фоне в центре экрана. Их видимый размер был не больше 7.5 угловых градусов. Стимулы предъявлялись в двух режимах: статическом (режим S – на экране появлялась вся траектория целиком в виде статического изображения) и динамическом (режим D – с помощью небольшого движущегося курсора, который следовал по невидимой траектории). Примеры – на рис. 1Б. Общее время предъявления одного стимула в обоих режимах составляло 3 секунды.

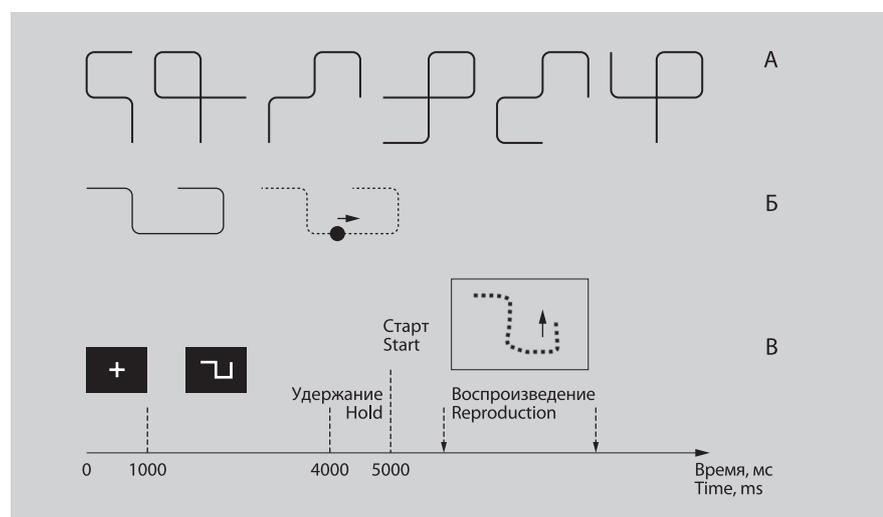


Рис. 1. Стимульный материал и схема экспериментальной пробы. А – примеры траекторий разной длины. Б – два режим предъявления: статический слева и динамический справа. В – временное расписание экспериментальной пробы.

Fig. 1. Stimulus material and experimental test. A – examples of trajectories of different lengths. B – two modes of presentation: static left and dynamic right. B – time schedule of the experimental test.

Аппаратура

Стимулы предъявлялись на дисплее с диагональю 40 см и частотой кадровой развертки 60 Гц. Двигательные ответы испытуемых регистрировались на графическом планшете Wacom Intuos3 формата A5 (частота – 100 Гц, пространственное разрешение – 200 линий на 1 мм, чувствительность к давлению пера на поверхность планшета 1024 градации) с помощью специально написанной программы, которая позволяла регистрировать горизонтальную и вертикальную координаты кончика электронного пера, а также силу давления. Управление экспериментом, предъявление стимулов и регистрация ответов испытуемых осуществлялась с помощью специально созданного программного обеспечения (на базе пакета 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 (период ожидания). Затем в течение заданного времени (3000 мс) предъявлялась траектория. После задержки (периода удержания в рабочей памяти), составлявшей 1000 мс, подавался короткий звуковой императивный сигнал (go signal), 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.

Стимульный материал предъявлялся в двух различных режимах. В режиме S вся траектория мгновенно появлялась на экране и оставалась на нем в течение всего времени экспозиции $T = 3000$ мс. В режиме D испытуемому предъявлялся курсор (маленький квадрат размером 3×3 мм), который двигался вдоль невиди-

мой траектории в течение приблизительно 3 с. Движение курсора вдоль сегмента траектории имитировало типичное движение руки человека из точки в точку и характеризовалось колоколообразным профилем мгновенной скорости.

В эксперименте использовался внутрииндивидуальный дизайн (2×3), в котором варьируемыми факторами служили режим предъявления (S и D) и число сегментов N (4, 5 и 6) траектории. 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 (соответственно, давление было ненулевым). Испытуемых просили начинать воспроизведение запомненной траектории как можно быстрее после императивного сигнала и выполнять движение, не исправляя ошибок, если они были допущены. Особо подчеркивалось, что, даже если испытуемый не уверен, правильно ли он запомнил траекторию, он, тем не менее, должен воспроизвести ее так, как запомнил.

Анализ полученных результатов может проводиться по двум направлениям. Во-первых, это анализ временных параметров ответов испытуемых (время реакции, время и скорость движений, количество и продолжительность пауз при выполне-

нии последовательности движений). Подобный анализ проводился в ряде работ (Корнеев, Курганский, 2012; Антонова и др., 2015). С другой стороны, не менее важным является исследование ошибок, допускаемых испытуемыми, частота их появления в разных условиях и возрастах, а также возможные разновидности. В рамках данной работы мы провели анализ ошибок нескольких типов:

1. Искажение траектории – ошибки, связанные со значительным отклонением воспроизведенной траектории от образца вплоть до полной неузнаваемости, касающиеся как метрики, так и топологических характеристик траектории.
2. Ошибки, связанные с точностью репрезентации: упрощения (пропуск элементов траектории, одного или, редко, двух) и усложнения траектории (добавления лишних элементов траектории при общем правильном ее воспроизведении).
3. Грубые нарушения пропорции фигуры (дизметрии), связанные в большей степени со зрительно-моторными координатами при реализации последовательности движений.

Примеры ошибок приведены на рис. 2. Мы предполагаем, что первый тип ошибок может быть связан с невозможностью построить или удержать внутреннюю репрезентацию предъявляемого стимула. Ошибки по типу усложнения или упрощения траектории могут быть связаны со слабостью управляющих функций. Наконец, ошибки нарушения пропорций при сохранении общей кон-

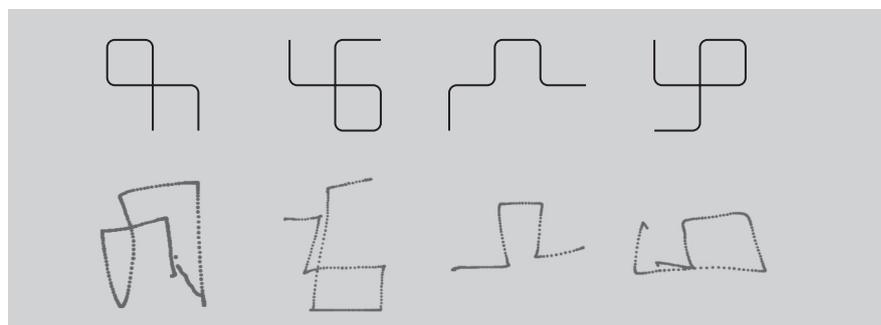


Рис. 2. Примеры ошибок воспроизведения траекторий. Верхний ряд – образцы траектории, нижний ряд – ответы испытуемых. Представлены четыре типа ошибок (слева направо): грубое искажение, усложнение, упрощение и нарушение пропорций (дизметрия).

Fig. 2. E in reproduction of trajectories. Upper row – samples of the trajectory, the bottom row – the answers of the test subjects. There are four types of errors (from left to right): gross distortion, complication, simplification and violation of proportions (dysmetry).

фигурации траектории могут быть обусловлены особенностями зрительно-моторной координации движений.

Представляется интересным, насколько часто ошибки разного типа встречаются в зависимости от типа предъявления стимула, его сложности, и как эти показатели меняются с возрастом.

Результаты

Общее число ошибок всех четырех типов, допускаемых детьми разных возрастов при воспроизведении траекторий различной сложности, предъявляемых в разных режимах, представлено на рисунке 3.

Дисперсионный анализ с двумя внутригрупповыми факторами РЕЖИМ (два

количества ошибок по мере усложнения траектории меняется незначительно, в то время как в режиме D – отчетливо увеличивается.

Среднее число грубых нарушений траектории, допускаемых детьми разных возрастов при воспроизведении траекторий различной сложности, предъявляемых в разных режимах, представлено на рисунке 4А. В этом случае дисперсионный анализ показал влияние следующих факторов:

- РЕЖИМ F – (1, 55) = 19.269, ($p < 0.001$, = 0.259), в режиме S испытуемые допускают больше ошибок, чем в режиме D;
- СЛОЖНОСТЬ – F(2, 110) = 11.814, ($p < 0.001$, = 0.177), по мере усложнения траекторий количество ошибок растёт;

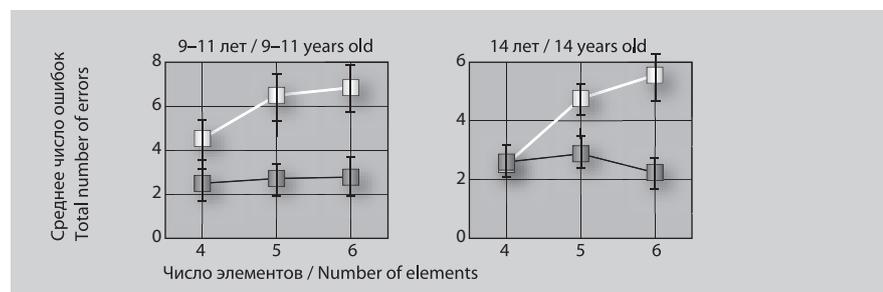


Рис. 3. Общее число ошибок всех четырех типов, допускаемых детьми разных возрастов при воспроизведении траекторий различной сложности, предъявляемых в разных режимах.

Fig. 3. The total number of errors of all four types in children of different ages in the reproduction of trajectories of different complexity, presented in different modes

уровня: статический и динамический) и СЛОЖНОСТЬ (3 уровня: 4, 5 и 6 элементов) и одним межгрупповым фактором ВОЗРАСТ (2 уровня) показал следующие значимые эффекты:

- влияние фактора РЕЖИМ – F(1, 55) = 60.306, ($p < 0.001$, = 0.523), в режиме S испытуемые допускают меньше ошибок, чем в режиме D;
- влияние фактора СЛОЖНОСТЬ – F(2, 110) = 13.702, ($p < 0.001$, = 0.199), по мере усложнения траекторий количество ошибок растёт;
- влияние взаимодействия факторов РЕЖИМ и ВОЗРАСТ – F(1, 55) = 6.064, ($p = 0.017$, = 0.099), возрастные различия заметны при динамическом предъявлении стимула и практически отсутствуют в статическом режиме;
- влияние взаимодействия факторов СЛОЖНОСТЬ и РЕЖИМ – F(2, 110) = 15.592, ($p < 0.001$, = 0.221), в режиме S

- взаимодействие факторов РЕЖИМ и ВОЗРАСТ – F(1, 55) = 17.754, ($p < 0.001$, = 0.177), возрастные различия наблюдаются в режиме D и практически отсутствуют в режиме S;
- взаимодействие факторов СЛОЖНОСТЬ и РЕЖИМ – F(2, 110) = 7.487, ($p = 0.001$, = 0.120), с возрастом влияние сложность фигуры снижается (в основном за счет динамического режима)
- взаимодействие факторов СЛОЖНОСТЬ и РЕЖИМ – F(2, 110) = 13.317, ($p = 0.001$, < 0.1195), в режиме S количество ошибок по мере усложнения траектории меняется незначительно, в то время как в режиме D отчетливо увеличивается.

Среднее количество ошибок усложнения и упрощения, допускаемых детьми разных возрастов при воспроизведении траекторий различной сложности,

предъявляемых в разных режимах, представлены на рисунке 4Б. Дисперсионный анализ числа таких ошибок показал значимое влияние следующих факторов:

- РЕЖИМ – F(1, 55) = 35.964, ($p < 0.001$, = 0.395), в режиме S испытуемые допускают больше ошибок, чем в режиме D;
- СЛОЖНОСТЬ – F(2, 110) = 8.930, ($p < 0.001$, = 0.140), по мере усложнения траекторий количество ошибок растёт;
- ВОЗРАСТ – F(1, 55) = 4.392, ($p = 0.041$, = 0.074), количество ошибок уменьшается с возрастом;
- значимое взаимодействие факторов СЛОЖНОСТЬ и РЕЖИМ – F(1, 55) = 4.431, ($p = 0.014$, = 0.075), в режиме S количество ошибок по мере усложнения траектории меняется незначительно, в то время как в режиме D отчетливо увеличивается.

Среднее количество нарушений пропорции элементов, допускаемых детьми разных возрастов при воспроизведении траекторий различной сложности, предъявляемых в разных режимах, представлены на рисунке 4В. Дисперсионный анализ в данном случае показал значимое влияние следующих факторов:

- РЕЖИМ – F(1, 55) = 13.746, ($p < 0.001$, = 0.200), в режиме S испытуемые допускают меньше ошибок, чем в режиме D;
- СЛОЖНОСТЬ – F(2, 110) = 25.796, ($p < 0.001$, = 0.319), в целом, можно отметить повышение числа грубых нарушений пропорции при усложнении траектории с 4 до 5 элементов и последующее снижение их числа при воспроизведении траекторий из 6 элементов.
- взаимодействие факторов СЛОЖНОСТЬ и ВОЗРАСТ – F(1, 55) = 10.338, ($p < 0.001$, = 0.158), у детей младшего школьного возраста число ошибок такого типа снижается по мере усложнения траектории, в то время как у подростков происходит сначала рост (от 4 к 5 элементам), а затем снижение (от 5 к 6 элементам) числа нарушений пропорции элементов траектории.

Обсуждение результатов

Полученные в группе подростков данные о влиянии сложности последовательности и способа ее предъявления согласуются с полученными в предыду-

ших исследованиях результатами – по мере роста длины последовательности количество допускаемых ошибок растет, причем, в первую очередь, за счет неправильного воспроизведения траекторий, предъявленных в динамическом режиме. Обнаруженная тенденция к снижению эффекта длины в статическом режиме с возрастом (Антонова и др., 2015) нашла свое подтверждение в новых данных.

Проведенный анализ ошибок, допускаемых испытуемыми разных возрастов, показал, что, в целом, от предподросткового к подростковому возрасту число ошибок меняется незначительно ($p=0.1$). Это в основном обусловлено сходными результатами, полученными в режиме статического предъявления траектории. В динамическом режиме число ошибок у подростков заметно меньше, чем у детей 9–11 лет. Дополнительный дисперсионный анализ, в который были включены только ошибки, допущенные в режиме D, показал значимое влияние фактора возраста – $F(1, 55)=4.701$, ($p=0.034$, $\eta^2=0.079$). Также дополнительное попарное сравнение показывает, что наиболее отчетливые отличия наблюдаются при воспроизведении наиболее простых траекторий в динамическом режиме ($p=0.036$ с поправкой Бонферрони). Подростки воспроизводят простые траектория значительно лучше, чем дети младшего школьного возраста. По мере усложнения траекторий количество ошибок в обеих группах растет, причем, это характерно только для динамического режима. По всей видимости, на фоне общего роста возможностей запоминания и точного воспроизведения траектории, заданной динамическим образцом, у подростков еще недостаточно сформированы механизмы запоминания такой информации при увеличении ее объема. Это согласуется с данными о запоминании последовательности зрительно-пространственных элементов разной длины в работе Luciana и его коллег (Luciana et al., 2005). В ней показано, что при пространственном поиске (spatial self-ordered search) подростки достаточно хорошо удерживают последовательности из 3–4 элементов и начинают ошибаться при поиске среди 6–8 элементов. Можно также отметить, что на выборке взрослых испытуемых в динамическом режиме было обнаружено отсутствие ошибок при воспроизведе-

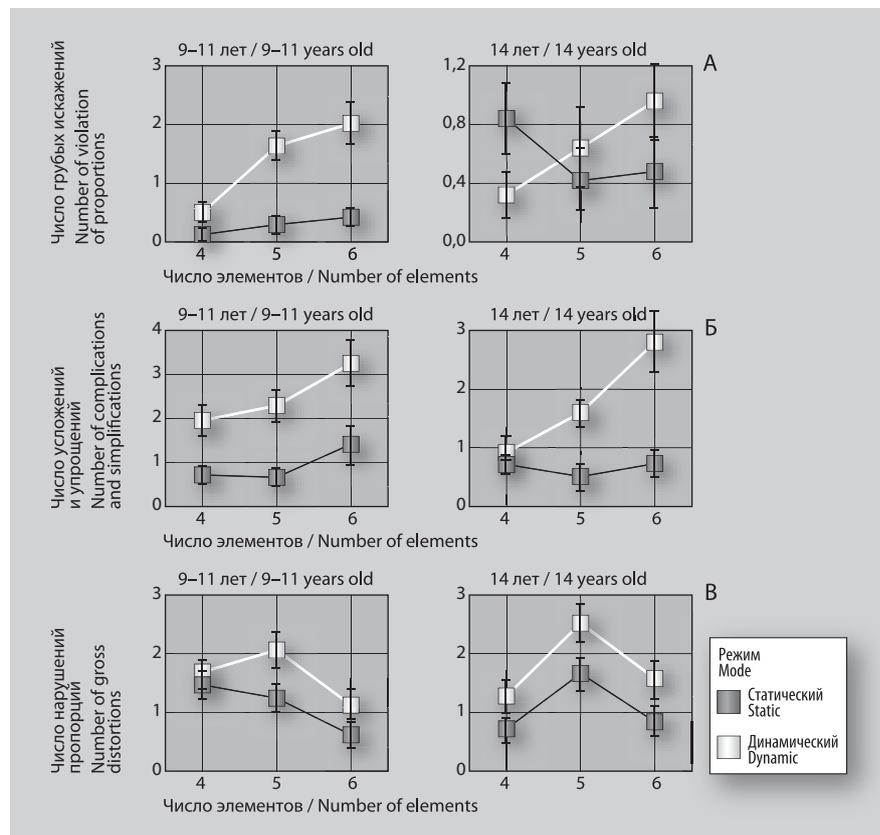


Рис. 4. Средние значения ошибок разного типа, допускаемых детьми разных возрастов при воспроизведении траекторий различной сложности, предъявляемых в разных режимах. А – грубые нарушения траектории; Б – усложнения и упрощения траектории; В – нарушение пропорций элементов фигуры.

Fig. 4. Mean values of errors of different types in children of different ages when playing trajectories of varying complexity, presented in different modes. А – gross violations of the trajectory; В – complications and simplification of the trajectory; В – violation of proportions of the figure elements.

нии простых траекторий и небольшое число ошибок в самых сложных траекториях, состоящих из 6 элементов (Антонова и др., 2015).

При анализе отдельных типов ошибок выявлены разные возрастные различия. Так, число грубых искажений траекторий субзначимо уменьшается с возрастом ($p=0.095$). Как было указано выше, такие ошибки могут быть вызваны неправильной репрезентацией последовательности, когда испытуемый оказывается неспособным запомнить и удержать информацию. Интересно, что в отношении этого типа ошибок эффект длины и способа предъявления последователь-

ности, выраженный у детей 9–11 лет, практически отсутствует у подростков. Это позволяет предположить, что общее качество репрезентации у них лучше в основном за счет лучшего удержания и воспроизведения более сложных объектов. Также можно отметить, что именно число грубых искажений у подростков не отличается при динамическом и статическом режимах, что свидетельствует в пользу того, что дети данного возраста в большей степени оказываются способны сформировать и удержать репрезентацию последовательности вне зависимости от типа исходной информации.

По мере роста длины последовательности количество допускаемых ошибок растет, причем, в первую очередь, за счет неправильного воспроизведения траекторий, предъявленных в динамическом режиме. Обнаруженная тенденция к снижению эффекта длины в статическом режиме с возрастом нашла свое подтверждение в новых данных.

Специфика репрезентаций, формируемых на основе информации разного типа, с возрастом снижается. У подростков на фоне увеличения объема удерживаемых репрезентаций наблюдается снижение ошибок по типу изменения числа элементов и увеличения числа метрических неточностей

Число ошибок усложнения и упрощения, которые могут быть связаны с трудностями перешифровки зрительно-пространственной информации в моторную форму, в отличие от остальных показателей, значимо уменьшается с возрастом. При этом у подростков, по сравнению с детьми предподросткового возраста, их число наиболее заметно снижается в простых траекториях в динамическом режиме. Это может быть связано с развитием управляющих функций в подростковом возрасте. Важно подчеркнуть, что подростки демонстрируют наиболее заметное отличие от младшей группы при воспроизведении самых простых траекторий в динамическом режиме ($p=0.032$ по результатам попарного сравнения с поправкой Бонферрони). Если предположить, что при динамическом предъявлении последовательности формируется менее четкая репрезентация, то у подростков этот недостаток точности практически не проявляется в простых последовательностях, но приводит ко все большему числу ошибок, связанных с упрощением или усложнением фигуры по мере удлинения последовательности. Это может говорить о том, что ресурсы управляющих функций у них все же ограничены и недостаток четкости репрезентации приводит к росту числа ошибок моторной реализации последовательности из 5–6 элементов. Удержание состава последовательности требует кросс-модальной координации между зрительным усвоением и моторной реализацией с одной стороны и временной координации с другой стороны (Saults & Cowan, 2007). Именно такую функцию приписывают блоку управляющего контроля (executive control) в системе рабочей памяти – удержание целостной программы реализации последовательности. Согласно нашим данным, этот блок у подростков в целом развит лучше, чем у детей младшего возраста, однако обнаруживает слабость при усложнении задачи.

Ошибки нарушения пропорций не меняются с возрастом, в траекториях средней сложности их число даже

выше в старшей группе испытуемых. Таким образом, можно говорить о том, что зрительно-моторные координации у детей и подростков при выполнении такого рода задач отличаются незначительно. На фоне общего улучшения качества и точности репрезентаций подростки не демонстрируют заметного преимущества в точности движений при воспроизведении последовательности. Интересно, что у детей младшего возраста ошибки дизметрии встречаются наиболее часто в простых траекториях, а по мере их усложнения – уменьшаются. Возможное объяснение такой картины может быть найдено, если связать возникновение этого типа ошибок с формированием репрезентации предъявляемого стимула как целостной конфигурации (фигуры). Имеются данные о том, что число ошибок, связанных с нарушением пропорций элементов, растет при воспроизведении серии движений как целостного объекта (Sekuler, Siddiqui et al., 2003). Можно предположить, что дети, выполняющие серию поэлементно, делают таких ошибок меньше. Соответственно, младшие дети более склонны к поэлементному выполнению более сложных фигур, поэтому число ошибок этого типа падает с усложнением последовательности. Подростки, в свою очередь, выполняют простые последовательности более «целостно», при этом в самых простых они допускают таких ошибок немного, в траекториях средней сложности начинают допускать больше ошибок такого типа, а при увеличении числа элементов до шести переходят к поэлементному воспроизведению, поэтому число нарушений пропорций снижается (отсюда форма графика 4В слева). Надо заметить, что это предположение, сделанное на основании визуального анализа ошибок, требует дополнительной проверки с помощью анализа временных параметров движений испытуемых при выполнении последовательности.

Таким образом, в целом, можно говорить о том, что у подростков качество воспроизведения последовательности повы-

шается в основном за счет относительно простых задач – запоминания простых траекторий, но предъявляемых в динамической форме. Для детей младшего возраста такая задача оказывается относительно сложной, они допускают больше ошибок, а для подростков при запоминании и воспроизведении относительно простых, трехзвенных траекторий режим предъявления оказывается неважен. Отсюда можно сделать предположение, что специфика репрезентаций, формируемых на основе информации разного типа, с возрастом снижается. У подростков на фоне увеличения объема удерживаемых репрезентаций наблюдается снижение ошибок по типу изменения числа элементов и увеличения числа метрических неточностей. Похожий эффект обратной зависимости объема и точности описан в статье Machizawa и Driver (Machizawa & Driver, 2011).

Заключение

Анализ точности воспроизведения последовательностей разной сложности, заданных зрительным образцом, предъявляемых в статическом и динамическом режимах показал, что подростки, по сравнению с детьми предподросткового возраста, справляются с этой задачей лучше. В основном эти возрастные различия связаны с лучшим запоминанием и воспроизведением информации, заданной динамическим образцом, что выражается в исчезновении эффекта режима предъявления в наиболее грубых ошибках у подростков. При этом наибольшее различие между возрастными группами получено в отношении ошибок упрощения и усложнения последовательности, которые связываются с управляющими функциями. В целом, на основании полученных данных можно говорить о том, что у подростков увеличивается объем удерживаемой в рабочей памяти серийной информации и повышение точности ее репрезентации в более сложной ситуации динамического предъявления. При этом в силу ограниченных способностей подростков, по сравнению со взрослыми, точность воспроизведения (и репрезентации) снижается при усложнении задачи.

Литература:

- Ахутина Т.В., Корнеев А.А., Матвеева Е.Ю. и др. Методики исследования функций II блока // Методы нейропсихологического обследования детей 6–9 лет. – Москва, 2016. – С. 69–142.
- Ахутина Т.В., Корнеев А.А., Матвеева Е.Ю. Развитие функций прогнирования и контроля у детей 7–9 лет. // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология - 2016. - №1 - с. 42–63
- Антонова А.А., Абсатова К.А., Корнеев А.А., Курганский А.В. Отсроченное двигательное воспроизведение незамкнутых полигонов, заданных статическим и динамическим зрительным образцом: сравнение детей 9–11 лет и взрослых // Физиология человека. – 2015. – Т. 41. – №. 2. – С. 38–45.
- Зинченко Ю.П., Филатов М.А., Колосова А.И., Макеева С.В. Сравнительный стохастический и хаотический анализ параметров внимания учащихся в аспекте их работоспособности // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. — 2017. — №4 — с. 21–33
- Корнеев А.А., Курганский А.В. Внутренняя репрезентация серии движений при воспроизведении статического рисунка и траектории движущегося объекта // Журнал высшей нервной деятельности имени И.П. Павлова. – 2013. – Т. 63. – №. 4. – С. 437–450.
- Alloway, T.P., Gathercole S.E., & Pickering S.J. (2006) Verbal and visuospatial short-term and working memory in children: Are they separable? *Child development*, 77(6), 1698–1716. doi:10.1111/j.1467-8624.2006.00968.x
- Bisley, J.W., & Pasternak T. (2000) The multiple roles of visual cortical areas MT/MST in remembering the direction of visual motion. *Cerebral Cortex*, 10(11), 1053–1065. doi:10.1093/cercor/10.11.1053
- Conklin, H.M. et al. (2007) Working memory performance in typically developing children and adolescents: Behavioral evidence of protracted frontal lobe development. *Developmental neuropsychology*, 31(1), 103–128. doi:10.1207/s15326942dn3101_6
- Constantinidis, C.A. (2016) Code for Cross-Modal Working Memory. *Neuron*, 89(1), 3–5. doi:10.1016/j.neuron.2015.12.033
- Gathercole S.E. et al. (2004) The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental psychology*, 40(2), 177.
- Ginsburg, V. et al. (2017) Coding of serial order in verbal, visual and spatial working memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 146(5), 632. doi:10.1037/xge0000278
- Gruber, O., & von Cramon, D.Y. (2001) Domain-specific distribution of working memory processes along human prefrontal and parietal cortices: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience Letters*, 297(1), 29–32. doi:10.1016/S0304-3940(00)01665-7
- Hurlstone, M.J., & Hitch, G.J. (2015) How is the serial order of a spatial sequence represented? Insights from transposition latencies. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 41(2), 295. doi:10.1037/a0038223
- 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. doi:10.1037/a0034221
- Inaba, N. et al. (2007) MST neurons code for visual motion in space independent of pursuit eye movements. *Journal of Neurophysiology*, 97(5), 3473–3483. doi:10.1152/jn.01054.2006
- Isbell E. et al. (2015) Visual working memory continues to develop through adolescence. *Frontiers in psychology*, 6, 696. doi:10.3389/fpsyg.2015.00696
- Kang, M.S. et al. (2011) Visual working memory contaminates perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(5), 860–869. doi:10.3758/s13423-011-0126-5
- Lehnert, G., & Zimmer, H.D. (2008) Modality and domain specific components in auditory and visual working memory tasks. *Cognitive processing*, 9(1), 53–61. doi:10.1007/s10339-007-0187-6
- Luciana, M., & Nelson, C.A. (2002) Assessment of neuropsychological function through use of the Cambridge Neuropsychological Testing Automated Battery: performance in 4- to 12-year-old children. *Developmental neuropsychology*, 22(3), 595–624. doi:10.1207/S15326942DN2203_3
- Luciana M. et al. (2005) The development of nonverbal working memory and executive control processes in adolescents. *Child development*, 76(3), 697–712. doi:10.1111/j.1467-8624.2005.00872.x
- Machizawa, M.G., & Driver, J. (2011) Principal component analysis of behavioural individual differences suggests that particular aspects of visual working memory may relate to specific aspects of attention. *Neuropsychologia*, 49(6), 1518–1526. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2010.11.032
- Nee, D.E., & D'Esposito, M. (2016) The Representational Basis of Working Memory. In: Current Topics in Behavioral Neurosciences. Springer, Berlin, Heidelberg, 1–18. doi:10.1007/7854_2016_456
- Passolunghi, M.C., & Siegel, L.S. (2001) Short-term memory, working memory, and inhibitory control in children with difficulties in arithmetic problem solving. *Journal of experimental child psychology*, 80(1), 44–57. doi:10.1006/jecp.2000.2626
- Pasternak, T., & Zaksas, D. (2003) Stimulus specificity and temporal dynamics of working memory for visual motion. *Journal of Neurophysiology*, 90(4), 2757–2762. doi:10.1152/jn.00422.2003
- Pickering, S.J. et al. (2001) Development of memory for pattern and path: Further evidence for the fractionation of visuo-spatial memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 54(2), 397–420. doi:10.1080/713755973
- Saults, J.S., & Cowan, N. (2007) A central capacity limit to the simultaneous storage of visual and auditory arrays in working memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136(4), 663–684. doi:10.1037/0096-3445.136.4.663
- Sekuler, R. et al. (2003) Reproduction of seen actions: stimulus-selective learning. *Perception*, 32(7), 839–854. doi:10.1068/p5064
- Soemer, A., & Saito, S. (2016) Domain-specific processing in short-term serial order memory. *Journal of Memory and Language*, 88, 1–17. doi:10.1016/j.jml.2015.12.003
- Spronk, M., Vogel, E.K., & Jonkman, L.M. (2012) Electrophysiological evidence for immature processing capacity and filtering in visuospatial working memory in adolescents. *PLoS One*, 7(8), e42262. doi:10.1371/journal.pone.0042262
- Camos, V. (2017) Domain-Specific Versus Domain-General Maintenance in Working Memory: Reconciliation Within the Time-Based Resource Sharing Model. *Psychology of Learning and Motivation*, 67, 135–171. doi:10.1016/bs.plm.2017.03.005
- Welsh, M.C., Pennington, B.F., & Groisser, D.B. (1991) A normative-developmental study of executive function: A window on prefrontal function in children. *Developmental neuropsychology*, 7(2), 131–149. doi:10.1080/87565649109540483
- Wing, A.M. (2000) Motor control: Mechanisms of motor equivalence in handwriting. *Current biology*, 10(6), R245–R248. doi:10.1016/S0960-9822(00)00375-4

References:

- Alloway, T.P., Gathercole S.E., & Pickering S.J. (2006) Verbal and visuospatial short-term and working memory in children: Are they separable? *Child development*, 77(6), 1698–1716. doi:10.1111/j.1467-8624.2006.00968.x
- Akhutina, T.V., Korneev, A.A., & Matveeva, E.Yu. (2016) Methods of investigating the functions of the second block. [Metody neyropsikhologicheskogo obsledovaniya detey 6–9 let]. Moscow, 69–142.
- Antonova, A.A., Absatova, K.A., Korneev, A.A., & Kurgansky, A.V. (2015) Delayed motor reproduction of non-closed polygons given by static and dynamic visual pattern: comparison of children 9–11 years old and adults. [Fiziologiya cheloveka], 41(2), 38–45.
- Bisley, J.W., & Pasternak T. (2000) The multiple roles of visual cortical areas MT/MST in remembering the direction of visual motion. *Cerebral Cortex*, 10(11), 1053–1065. doi:10.1093/cercor/10.11.1053
- Conklin, H.M. et al. (2007) Working memory performance in typically developing children and adolescents: Behavioral evidence of protracted frontal lobe development. *Developmental neuropsychology*, 31(1), 103–128. doi:10.1207/s15326942dn3101_6
- Constantinidis, C.A. (2016) Code for Cross-Modal Working Memory. *Neuron*, 89(1), 3–5. doi:10.1016/j.neuron.2015.12.033
- Gathercole S.E. et al. (2004) The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental psychology*, 40(2), 177.
- Ginsburg, V. et al. (2017) Coding of serial order in verbal, visual and spatial working memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 146(5), 632. doi:10.1037/xge0000278
- Gruber, O., & von Cramon, D.Y. (2001) Domain-specific distribution of working memory processes along human prefrontal and parietal cortices: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience Letters*, 297(1), 29–32. doi:10.1016/S0304-3940(00)01665-7
- Hurlstone, M.J., & Hitch, G.J. (2015) How is the serial order of a spatial sequence represented? Insights from transposition latencies. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 41(2), 295. doi:10.1037/a0038223
- 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. doi:10.1037/a0034221
- Inaba, N. et al. (2007) MST neurons code for visual motion in space independent of pursuit eye movements. *Journal of Neurophysiology*, 97(5), 3473–3483. doi:10.1152/jn.01054.2006
- Isbell E. et al. (2015) Visual working memory continues to develop through adolescence. *Frontiers in psychology*, 6, 696. doi:10.3389/fpsyg.2015.00696
- Kang, M.S. et al. (2011) Visual working memory contaminates perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(5), 860–869. doi:10.3758/s13423-011-0126-5
- Korneev, A.A., & Kurgansky, A.V. (2013) Internal representation of a series of movements during the reproduction of a static pattern and the trajectory of a moving object. [Zhurnal vysshey nervnoy deyatelnosti imeni I.P. Pavlova], 63(4), 437–450.
- Lehnert, G., & Zimmer, H.D. (2008) Modality and domain specific components in auditory and visual working memory tasks. *Cognitive processing*, 9(1), 53–61. doi:10.1007/s10339-007-0187-6
- Luciana, M., & Nelson, C.A. (2002) Assessment of neuropsychological function through use of the Cambridge Neuropsychological Testing Automated Battery: performance in 4- to 12-year-old children. *Developmental neuropsychology*, 22(3), 595–624. doi:10.1207/S15326942DN2203_3
- Luciana M. et al. (2005) The development of nonverbal working memory and executive control processes in adolescents. *Child development*, 76(3), 697–712. doi:10.1111/j.1467-8624.2005.00872.x
- Machizawa, M.G., & Driver, J. (2011) Principal component analysis of behavioural individual differences suggests that particular aspects of visual working memory may relate to specific aspects of attention. *Neuropsychologia*, 49(6), 1518–1526. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2010.11.032
- Nee, D.E., & D'Esposito, M. (2016) The Representational Basis of Working Memory. In: *Current Topics in Behavioral Neurosciences*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1–18. doi:10.1007/7854_2016_456
- Passolunghi, M.C., & Siegel, L.S. (2001) Short-term memory, working memory, and inhibitory control in children with difficulties in arithmetic problem solving. *Journal of experimental child psychology*, 80(1), 44–57. doi:10.1006/jecp.2000.2626
- Pasternak, T., & Zaksas, D. (2003) Stimulus specificity and temporal dynamics of working memory for visual motion. *Journal of Neurophysiology*, 90(4), 2757–2762. doi:10.1152/jn.00422.2003
- Pickering, S.J. et al. (2001) Development of memory for pattern and path: Further evidence for the fractionation of visuo-spatial memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 54(2), 397–420. doi:10.1080/713755973
- Saults, J.S., & Cowan, N. (2007) A central capacity limit to the simultaneous storage of visual and auditory arrays in working memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136(4), 663–684. doi:10.1037/0096-3445.136.4.663
- Sekuler, R. et al. (2003) Reproduction of seen actions: stimulus-selective learning. *Perception*, 32(7), 839–854. doi:10.1068/p5064
- Soemer, A., & Saito, S. (2016) Domain-specific processing in short-term serial order memory. *Journal of Memory and Language*, 88, 1–17. doi:10.1016/j.jml.2015.12.003
- Spronk, M., Vogel, E.K., & Jonkman, L.M. (2012) Electrophysiological evidence for immature processing capacity and filtering in visuospatial working memory in adolescents. *PLoS One*, 7(8), e42262. doi:10.1371/journal.pone.0042262
- Camos, V. (2017) Domain-Specific Versus Domain-General Maintenance in Working Memory: Reconciliation Within the Time-Based Resource Sharing Model. *Psychology of Learning and Motivation*, 67, 135–171. doi:10.1016/bs.plm.2017.03.005
- Welsh, M.C., Pennington, B.F., & Groisser, D.B. (1991) A normative-developmental study of executive function: A window on prefrontal function in children. *Developmental neuropsychology*, 7(2), 131–149. doi:10.1080/87565649109540483
- Wing, A.M. (2000) Motor control: Mechanisms of motor equivalence in handwriting. *Current biology*, 10(6), R245–R248. doi:10.1016/S0960-9822(00)00375-4