

Роль межмодального взаимодействия в психологической и мозговой организации математических способностей

Н.А. Хохлов,
М.С. Ковязина

МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

Поступила 16 ноября 2016/ Принята к публикации: 23 ноября 2016

The role of crossmodal interaction in psychological and brain organization of mathematical abilities

Nikita A. Khokhlov*,
Maria S. Kovyazina

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

* Corresponding author E-mail: nkhokhlov@psychmsu.ru

Received November 16, 2016 / Accepted for publication: November 23, 2016

В статье проанализированы работы отечественных и зарубежных ученых, посвященные роли межанализаторного взаимодействия в развитии и реализации математических способностей. Межмодальное взаимодействие рассматривается как дополнительная категория нейропсихологического анализа, позволяющая расширить имеющиеся представления о психологической структуре и мозговом обеспечении математической деятельности. Обсуждаются сведения, подтверждающие актуальность изучения взаимодействия органов чувств. Большая часть исследований по этой проблеме проведена на модели синестезии, являющейся достаточно редким феноменом. Однако накопленные в отечественных и зарубежных работах сведения позволяют говорить о том, что взаимодействие анализаторов характерно не только для синестетов. Совместная работа органов чувств имеет место с самого рождения у любого человека и выступает необходимым условием развития познавательных процессов.

Предполагается, что межанализаторный синтез играет важную роль в формировании пространственных представлений и способности к интуитивному восприятию количества (эволюционной основы математических способностей). На мозговом уровне эти процессы обеспечиваются преимущественно работой теменных отделов и третичных зон коры, расположенных на стыке корковых отделов анализаторов, и височных отделов, находящихся рядом с парагиппокампальной областью.

При освоении школьной математики структура математических способностей меняется за счет вербально-символического кодирования количественных представлений. Оперирование символами открывает новые возможности, но оно также сужает спектр модальностей, задействованных в решении математических задач. При этом способность к перешифровке информации из одной модальности в другую и после освоения школьной математики оказывает влияние на эффективность выполнения математической деятельности. Решение математических задач сопровождается межмодальным взаимодействием, протекающим большей частью неосознанно. Одни условия задачи могут эффективнее обрабатываться в одной модальности, другие – в другой.

По всей видимости, способность к различным межмодальным перешифровкам существенно варьирует от человека к человеку. Эффективность межмодальных взаимодействий может обуславливать выраженность определенных компонентов математических способностей и влиять на успешность решения соответствующих типов математических задач.

Ключевые слова: математические способности, межанализаторное взаимодействие, взаимодействие органов чувств, синестезия, межмодальные перешифровки, пространственные представления, дифференциальная нейропсихология.

The paper analyzes the work of Russian and foreign scholars devoted to the role of cross analyzer cooperation in developing and implementing mathematical abilities. Crossmodal interaction is considered as an additional category of neuropsychological analysis that allows to extend the existing ideas about the psychological structure and brain providing the mathematical ability. There are data that confirm the relevance of studying the interaction of the senses. Many of the research on this issue are carried out using the synesthesia which is considered a rare phenomenon. However, both Russian and foreign works suggest that the interaction of analyzers is not characteristic only to those whose brain is synesthetic. The joint work of the senses is characteristic of every person since his/her childhood, and is an obligatory condition for cognitive processes.

Cross analyzer synthesis is assumed to play an important role in producing spatial representations and the ability to intuitively perceive the notion of quantity (evolutionary foundations of mathematical ability). On the brain level, these processes are provided primarily by functioning of parietal and tertiary cortical areas located at the junction of cortical analyzer areas and also temporal areas that border on the parahippocampal brain area.

When dealing with school mathematics the structure of mathematical abilities is changing due to verbal and symbolic representations of numerical coding. Dealing with symbols opens up new opportunities, but it also narrows the spectrum of modalities involved in doing mathematical sums. Thus, the ability to re-encode information from one modality to another after school mathematics is perceived has an impact on the efficacy of mathematical activity. Doing mathematical sums is accompanied by crossmodal interaction that occurs on the unconscious level.

Some problem conditions may be efficiently processed in one modality, others may be solved in other modality.

Apparently, the ability to various crossmodal re-encoding patterns varies considerably from person to person. The effectiveness of crossmodal interactions may determine the severity of certain components of mathematical abilities and influence successful solutions of the corresponding types of mathematical problems.

Keywords: mathematical ability, cross analyzer interaction, senses interaction, synesthesia, crossmodal re-encoding, spatial presentation, differential neuropsychology.

Психологическая и мозговая организация математических способностей является актуальной проблемой дифференциальной нейропсихологии. Накопленные факты свидетельствуют о том, что в деятельности по решению задач специфический вклад вносят различные мозговые зоны. Между тем сопоставление нейропсихологических показателей с математическими способностями не позволяет выявить фундаментальные закономерности, которые объясняли бы существенную долю вариативности последних. Возникает необходимость разработки дополнительных категорий нейропсихологического анализа. Одной из таких категорий выступает межмодальное взаимодействие.

В данной статье обсуждаются сведения, подтверждающие актуальность изучения взаимодействия органов чувств. Хотя бо льшая часть исследований межмодального взаимодействия проведена на модели синестезии, можно говорить о том, что взаимодействие анализаторов имеет место у любого человека и развивается с самого рождения. Мы полагаем, что межанализаторный синтез лежит в основе формирования пространственных представлений и способности к интуитивному восприятию количества. Эти процессы являются эволюционной основой математических способностей. Освоение вербально-символического ко-

дирования приводит к их существенной перестройке. Оперирование символами открывает новые возможности мыслительной деятельности, но оно также сужает спектр модальностей, задействованных в решении математических задач. Полимодальное представление условий и процесса решения задачи может существенно повышать продуктивность решения, что объясняется особой ролью межмодального взаимодействия в психологической и мозговой организации математических способностей.

Проблема взаимодействия органов чувств

Обсуждение взаимодействия органов чувств требует введения понятий «модальность» и «анализатор». Модальность означает «принадлежность к определенной сенсорной системе (анализатору)» и используется «для обозначения, характеристики и классификации ощущений, сигналов, стимулов, информации, рецепторов, расстройств» (Большой психологический словарь, 2009, С. 362). Анализатор – «термин, введенный И.П. Павловым для обозначения целостного нервного механизма, осуществляющего прием и анализ сенсорной информации определенной модальности» (там же, С. 34).

Информация поступает на вход анализатора и по проводящим путям достигает коркового представительства. Уже на этапе проводящих путей имеются переклочки, позволяющие неосознанно соотносить сигналы разных модальностей. Модальная специфичность сохраняется в рамках первичных и вторичных зон коры головного мозга. Комплексные же формы переработки информации предполагают объединение работы нескольких анализаторов, происходящее в третичных зонах. А.Р. Лурия по этому поводу писал: «Третичные зоны задних отделов мозга располагаются, как уже говорилось, на границе между затылочными, височными и постцентрными областями полушария и составляют зону перекрытия корковых отделов зрительного, слухового, вестибулярного кожно-кинестетического анализаторов. Их центром являются 39-е и 40-е поля Бродмана или нижнетеменная область; есть, однако, все основания включать в их состав также и прилегающие височно-затылочные образования 37-го и 21-го полей. Все эти поля сохраняют общую для всех рецепторных зон поперечную исчерченность и выраженное шестислойное строение и преимущественно состоят из клеток верхних слоев коры, имеющих короткие аксоны и осуществляющих главным образом ассоциативные функции; приходящие к ним волокна идут от ассоциативных ядер зрительного бугра и несут информацию, уже обобщенную на низших уровнях. Эти зоны формируются только у человека и созревают позднее, чем все остальные зоны задних отделов коры, полностью вступая в работу лишь к 7-летнему возрасту. Все это дает основание предположить, что описываемые нами третичные образования играют особую роль в осуществлении межанализаторных синтезов и что при их участии осуществляется как синтез сигналов внутри одного анализатора, так и перенос структур возбуждения из одного анализатора в другой» (Лурия, 2003, С. 163–164).

С 2 до 7 лет «созревает гиппокампальная комиссура, которая лежит в основе обеспечения полисенсорной межмодальной интеграции и памяти. Межгиппокампальным структурам принадлежит роль инициатора и стабилизатора взаимоотношения между правым и левым полуша-



Хохлов Никита Александрович –
клинический психолог, нейропсихолог, аспирант
кафедры нейро- и патопсихологии факультета
психологии МГУ имени М.В. Ломоносова.
E-mail: nkhhokhlov@psychmsu.ru



Ковязина Мария Станиславовна –
доктор психологических наук, доцент, профессор
кафедры нейро- и патопсихологии факультета
психологии МГУ имени М.В. Ломоносова.
E-mail: kms130766@mail.ru

риями» (Ковязина, 2012, С. 17). И межмодальные, и межполушарные координации существуют у ребенка уже при рождении. Система «длинных» связей обеспечивает процессы дистантной интеграции. Через комиссуральные структуры она соединяет билатерально, симметрично расположенные отделы коры. Она обеспечивает также продольные взаимосвязи структур, расположенных внутри одного полушария (Шеповальников, Цицерошин, Погосян, 1997). У взрослого человека имеется несколько уровней межмодального взаимодействия, осуществляемого как внутри одного полушария, так и между полушариями. Межмодальные мозговые тракты характеризуются латеральными различиями (Catani, de Schotten, 2012).

Основной моделью изучения межанализаторного взаимодействия является синестезия. Синестезия – это «феномен, заключающийся в том, что стимуляция одной сенсорной модальности приводит к возникновению ощущений, характерных для другой сенсорной модальности» (Большой психологический словарь, 2009, С. 613). Р.С. Немов приводит следующие определения синестезии: «1. Одновременное возникновение разных ощущений под влиянием одного и того же стимула. 2. Способность стимула вызывать не только специфическое для него ощущение в органе чувств, который природой создан для его восприятия, но также ощущения в других органах чувств, не приспособленных для восприятия данного стимула. 3. Повышение чувствительности одних органов чувств под влиянием стимулов, воздействующих на другие органы чувств. В этом своем значении термин “синестезия” близок по своему содержанию к понятию “сенсбилизация”» (Немов, 2015, С. 109). Синестезии посвящено множество обзоров отечественных и зарубежных авторов (Кузнецова, 2004; Зеленина, 2010; Прокофьева, 2010; Cytowic, 2002; Robertson, Sagiv, 2004; Campen van, 2007; Hochel, Milán, 2008; Simner, 2012; Ward, 2013; Riccò, de Córdoba Serrano, Day, 2014).

Одним из первых синестезию описал Ф. Гальтон (Galton, 1880, 1881). Он изучал людей, способных выстраивать цифры, наделяемые качествами формы и цвета, в пространственные ряды (графемная синестезия). Была описана чи-

словая линия – ментальная карта, автоматически появляющаяся, когда человек думает о числах. В настоящее время предполагается, что числовая линия – это результат совместной активации участков в теменной доле, которая отвечает за распознавание чисел, и в угловой извилине, отвечающей за восприятие пространства (Ramachandran, Hubbard, 2001; Hubbard et al., 2005).

Систематическое изучение взаимодействия анализаторов в СССР проводилось под руководством С.В. Кравкова. Результаты исследований обобщены в книге «Взаимодействие органов чувств» (Кравков, 1948). Как отмечает И.Б. Котова, «изучение проблемы взаимодействия органов чувств было подготовлено предшествующей работой С.В. Кравкова по психофизиологии зрения. В основу этих исследований была положена идея целостности живого организма, взаимной связи и взаимной обусловленности отдельных его частей. Исходя из этого, С.В. Кравков выдвинул гипотезу, согласно которой целостность организма сказывается и на функционировании органов чувств, и потому характер возникающих ощущений и восприятий зависит не только от прямого, сейчас действующего раздражителя, но и от всей совокупности – прочих, непрямых раздражителей. С.В. Кравков стремился обосновать тот факт, что деятельность органов чувств необходимо изучать под углом зрения эволюционного развития их как приспособления к наилучшему выполнению познавательных функций, при непременном понимании органов чувств как анализаторов, у которых периферические, рецепторные и центральные (мозговые) процессы всегда связаны друг с другом» (Кравков 1982, С. 54–55). В работах С.В. Кравкова было показано, что на зрительное восприятие может влиять слуховая стимуляция. Выяснилось, что зрительные функции зависят не только от работы каждого глаза, но и от воздействий, идущих в центральную нервную систему от других органов чувств. «С.В. Кравков доказал существование межцентральных связей, т.е. функциональных связей между корковыми центрами различных органов чувств, которые могут быть как содружественными, так и антагонистическими. Важным путем вза-

имодействия он считал вегетативную нервную систему, отводя ей роль регулятора функциональных свойств и физико-химических условий жизни различных частей организма, в том числе и органов чувств. “Эфаптические”, межцентральные и вегетативные пути С.В. Кравков относил к безусловным связям, носящим характер некоторых врожденных, анатомически обусловленных соотношений» (там же, С. 58).

А.Р. Лурия выделял две формы взаимодействия органов чувств. «С одной стороны, отдельные ощущения могут влиять друг на друга, причем работа одного органа чувств может стимулировать или угнетать работу другого органа чувств. С другой стороны, существуют более глубокие формы взаимодействия, при которых органы чувств работают вместе, обуславливая новый, материнский вид чувствительности, который в психологии получил название синестезии» (Лурия, 2006, С. 106). Комментируя исследования С.В. Кравкова, он отмечал, что «...влияние одних ощущений на другие ощущения, по-видимому, происходит на уровне верхних отделов ствола и зрительного бугра, где волокна, проводящие возбуждения от различных органов чувств, сближаются, и передача возбуждений с одной системы на другую может осуществляться особенно успешно» (там же). Синестезия отличается от такого взаимодействия наличием переноса качеств одной модальности на другую. Явление синестезии особенно отчетливо проявляется у лиц с повышенной возбудимостью подкорковых образований. Существуют и более сложные формы взаимодействия анализаторов. «Известно, что мы почти никогда не воспринимаем осязательные, зрительные и слуховые раздражения изолированно: воспринимая предметы внешнего мира, мы видим их глазом, ощущаем прикосновением, иногда воспринимаем их запах, звучание и т.д. Естественно, что это требует взаимодействия органов чувств (или анализаторов) и обеспечивается их синтетической работой. Эта синтетическая работа органов чувств протекает при ближайшем участии коры головного мозга и прежде всего тех “третьих” зон (“зон перекрытия”), в которых представлены нейроны, относящиеся к разным модальностям» (Лурия, 2006,

С. 107). Б.М. Величковский, В.П. Зинченко, А.Р. Лурия указывают на то, что «перцептивные системы формируются под влиянием задач, возникающих в деятельности индивида. Многие перцептивные задачи требуют совместной работы нескольких перцептивных систем, поэтому возможны интермодальные или переходные формы чувствительности, занимающие промежуточное положение между традиционными модальностями» (Величковский, Зинченко, Лурия 1973, С. 54).

Б.Г. Ананьев, обсуждая сенсорно-перцептивную организацию человека, отмечал важность учета единства двух основных нервных механизмов: анализаторов и временных связей. Условием формирования временных связей (термин И.П. Павлова) является совпадение по времени двух или более событий, значимое для текущего функционального состояния и ситуации. «Благодаря механизму временных связей работа анализатора становится все более гибкой, изменчивой, тонко отражающей изменяющиеся условия жизни (“колебания” во внешней и внутренней среде). Динамика абсолютной и разностной чувствительности разных модальностей объяснима именно воздействием механизма временных связей на уровень развития и состояния механизма анализаторов. Это же воздействие определяет в значительной мере межанализаторные связи как механизм взаимодействия ощущений разных модальностей» (Ананьев, 1996, С. 60). Ученый считал, что в период детства неизбежно происходит овладение переводом образов из одной модальности в другую: «... усвоение ребенком словарного состава языка происходит путем ассоциирования слухового образа слова со зрительным, обозначаемого этим словом предмета. Предметная отнесенность слова для ребенка – первая реальность речи – есть вместе с тем зрительное включение в ассоциативные массы обозначенных словом образов вещей» (там же, С. 133–134). Эти рассуждения во многом перекликаются с единой теорией психических процессов Л.М. Веккера, уделявшего ключевое внимание пространственно-временной структуре. Л.М. Веккер считал, что мышление является не безмодальным, а, напротив, полимодальным и интермодальным.

«Мысль, выходя за пределы “вырезаемых” соответствующей модальностью участков спектров, “ходит” по всему диапазону каждого из этих спектров, может переходить из одного спектра в другой (например, из оптического в акустический), тем самым раздвигая их границы в пределе до бесконечности» (Веккер, 2000, С. 201–202).

Т.Н. Березина указывает на то, что, «поскольку психические образы полимодальны, то слова как первосигнальные стимулы могут входить в образ не только в виде синестезии, но и просто как звуки» (Березина, 2012, С. 80). Автор предлагает выделять пять уровней обработки наглядной информации. «На каждом уровне формируются соответствующие образы-интеграторы. Образы первого порядка – эйдетические образы, в них воспроизводится изображение окружающего мира с фотографической точностью. Образы второго порядка – классические вторичные образы, образы конкретных предметов, детали образа могут меняться при визуализации. Образы третьего порядка – образы обобщенных предметов (имаген “животное”), визуализируются в виде контура. Образы четвертого порядка – образы высшего уровня обобщения предметов (имаген “вещь”) являются пространственными образованиями, при попытке их визуализации происходит мысленное выделение части внутреннего пространства. Образы пятого порядка – невербальные эталоны моральных, философских, математических обобщений. Поскольку психические образы полимодальны, то слова как первосигнальные стимулы могут входить в образ не только в виде синестезии, но и просто как звуки» (там же, С. 82–83).

Взаимодействию органов чувств уделяется внимание и в коррекционной работе с детьми (Ayres, 1979). «Сенсорная интеграция – это взаимодействие всех органов чувств. Она начинается очень рано, уже в утробе матери. Взаимодействие всех органов чувств подразумевает упорядочивание ощущений и раздражителей таким образом, чтобы человек мог адекватно реагировать на определенные стимулы и действовать в соответствии с ситуацией» (Кислинг, 2011, С. 15).

Многое остается неясным в отношении мозговых механизмов синестезии.

Не вызывает сомнений, что в реализации синестезии задействованы области мозга, отвечающие за восприятие стимулов соответствующих модальностей. Однако дальше возникают существенные разночтения, связанные как с неодинаковым пониманием того, что такое синестезия, так и с использованием различных методов нейровизуализации. Кроме того, большинство исследований влияния синестезии на решение задач представляют собой анализы индивидуальных случаев, а выявление общих закономерностей затруднено из-за индивидуальных различий между синестетами. Обзор фМРТ-исследований (Rouw, Scholte, Colzoli, 2011) позволяет выделить шесть мозговых зон в теменной и лобной коре, которые активируются при синестезии. Предполагается, что эти зоны связаны с реализацией трех познавательных процессов: сенсорного, связывания отдельных свойств посредством внимания и познавательного контроля. При разных видах синестезии отмечается преимущественная активация разных отделов мозга. Например, при графемно-цветовой синестезии межмодальное взаимодействие может происходить на низшем или высшем уровне обработки информации. В первом случае ведущую роль играет веретенообразная извилина, во втором – угловая извилина (Ramachandran, Hubbard, 2001). Еще одним участком мозга, принимающим участие в межмодальном взаимодействии, является энторинальная кора, находящаяся в височной доле и выступающая посредником между гиппокампальной формой и новой корой. Энторинальная кора связывает сигналы, поступающие по зрительному и слуховому каналам. Выделяют латеральную и медиальную части энторинальной коры, различающиеся по клеточному составу и структуре связей (Witter et al., 2000). Медиальная часть энторинальной коры играет важную роль в обеспечении пространственной ориентации и запоминании пространственного расположения (Suzuki, Miller, Desimone, 1997; Fyhn et al., 2004; Zhang et al., 2014). Имеются сведения об участии медиальных отделов височной доли (энторинальной и периринальной коры) в реализации функции восприятия (Graham, Gaffan, 2005; Suzuki, 2009; Baxter, 2009; Suzuki, Baxter, 2009).

Межанализаторное взаимодействие является повсеместным и не исчерпывается лишь феноменом синестезии. Синестезия в той или иной мере характерна для 0,05–4% населения (процентные оценки существенно варьируют в зависимости от позиции исследователя). Не-

Как отмечает Н.А. Киселева, «вначале математика изучала реальный мир, отвлекаясь лишь от конкретной качественной природы объектов, которые подлежат счету и измерению. Здесь математика была, грубо говоря, наукой о числах и фигурах, причем изучала их как посто-

ская системы математических представлений относительно независимы, однако в процессе обучения символическая математика опосредствует и подчиняет себе несимволическую. Что касается продвинутой математики, то для ее освоения важны пространственные и языковые способности, а способность к элементарным вычислениям не играет существенной роли (Wei et al., 2012).

Известно, что совпадение пространственного расположения стимула и реакции приводит к уменьшению времени ответа, даже если местоположение не является условием задачи (Simon, Wolf, 1963). При пространственно-числовой синестезии подобный эффект обнаруживается даже в том случае, если число не является существенным свойством задачи (Arend, Gertner, Henik, 2013). Имеется врожденная склонность реагировать в сторону источника раздражения. При этом на меньшие числа люди быстрее реагируют слева, а на большие – справа, что отражает автоматическое объединение местоположения руки и семантической величины модально-независимого числа (Dehaene, Bossini, Giraux, 1993). Дети с низкими зрительно-пространственными способностями также демонстрируют эти классические эффекты, однако сильнее отклоняются от верных позиций при выполнении пространственно-числовых заданий (Crollen, Noël, 2015).

Имеются убедительные сведения о наличии связи способности к мысленному пространственному вращению с базовыми числовыми представлениями (Thompson et al., 2013). Есть основания полагать, что участие пространственных представлений в работе с математической информацией затрагивает не только отдельные числа, но и арифметические операции в целом (Fischer, Shaki, 2014). Взаимодействие между числами и пространственными представлениями было исследовано с помощью спектроскопии в ближней инфракрасной области. Обнаружены гемодинамические корреляты этого взаимодействия во внутримозговой борозде обоих полушарий и угловой извилине левого полушария (Cutini et al., 2014). Показано, что работа с числами и массивами точек сопровождается преимущественной активацией

Если синестезия имеет отношение к сфере ощущений и является относительно редким явлением, то межмодальное взаимодействие, в целом, характеризует восприятие как познавательный процесс. Мы полагаем, что межмодальное взаимодействие выступает необходимым условием развития всех познавательных процессов и является одним из механизмов реализации мыслительной деятельности

которые люди, чье восприятие может рассматриваться как синестетическое, не считают себя синестетами, и потому часто не учитываются в исследованиях. Однако даже при отсутствии синестезии у всех людей имеет место межмодальное взаимодействие без которого невозможно целостное восприятие окружающего мира. Если синестезия имеет отношение к сфере ощущений и является относительно редким явлением, то межмодальное взаимодействие, в целом, характеризует восприятие как познавательный процесс. Мы полагаем, что межмодальное взаимодействие выступает необходимым условием развития всех познавательных процессов и является одним из механизмов реализации мыслительной деятельности.

янные, неизменные величины и отношения их рассматривала как постоянные, неизменные отношения постоянных величин. Далее, во второй период происходит отвлечение не только от конкретной качественной природы объектов, но уже и от конкретного количественного содержания чисел, что позволило оперировать с символами конкретных чисел (a, b, c ...» (Киселева, 1967, С. 7).

Интуитивное восприятие количества (субитация) обнаруживается уже в младенческом возрасте. Дети, у которых эта способность в шестимесячном возрасте развита сильнее, впоследствии успешнее овладевают арифметическими навыками (Starr, Libertus, Brannon, 2013). Младенцы способны сравнивать числовую информацию, поступающую в разных модальностях, используя хранящиеся в памяти представления (Feigenson, 2011). Хотя способность определять общее количество элементов в наборе является эволюционно базовой, нельзя с уверенностью утверждать, что именно она становится основой осваиваемой в дальнейшем символической математики (Lyons, Ansari, 2015). Многие животные умеют усматривать количество без пересчета, и эта способность обеспечивается работой теменных участков мозга. У человека происходит введение символов для обозначения количества, что приводит к перестройке архаических систем (Piazza, Izard, 2009). Школьное обучение способствует освоению символической математики, причем траектории развития несимволических и символических математических способностей не совпадают (Matejko, Ansari, 2016). Мы полагаем, что исходно несимволическая и символиче-

Роль межмодального взаимодействия в обеспечении математических способностей

Математические способности являются крайне неоднородным явлением. Имеется множество теоретических подходов к изучению сущности математической деятельности и выделению структуры математических способностей, подробный обзор которых представлен в нашей работе (Хохлов, 2015). Мы полагаем, что эволюционной функцией математической деятельности является оценка пространства и количества объектов во множествах. У человека она приобретает свою специфику, связанную с символическим опосредствованием количественных представлений.

правой внутримеменной борозды, а работа с квантификаторами – активацией левой средней височной извилины и нижней лобной извилины (Wei et al., 2014).

Оперирование пространственными представлениями имеет непосредственное отношение к взаимодействию анализаторов. Как отмечает А.М. Леушина, работавшая с дошкольниками, «в основе познания маленькими детьми качественных и количественных признаков предметов и явлений лежат сенсорные процессы» (Леушина, 1974, С. 27). На разных этапах развития ведущую роль играют разные анализаторы, но при этом постоянно происходит межанализаторное взаимодействие. «Ребенок окружен различными множествами, выраженными не только предметами, но и звуками, движениями и т.д. Эти множества ребенок воспринимает различными анализаторами: зрительным, слуховым, осязательным, кинестетическим и др.» (там же, С. 74). Поступление согласованной информации по различным каналам позволяет формировать более точные представления о количестве. «Если зрительный анализатор способствует синтезированию отдельных элементов в единое структурно-замкнутое целое, то слуховой, двигательный и речедвигательный анализаторы способствуют вычленению отдельных элементов внутри этого целого. Такое взаимодействие анализаторов является весьма важным для развития восприятия множества в целом и образующих его элементов. Отсюда следует педагогический вывод о необходимости использовать при формировании у детей счетной деятельности и представления о множестве все анализаторы. Между множествами, воспринимаемыми разными анализаторами, устанавливается взаимно-однозначное соответствие» (там же, С. 79). Важно, что «в формировании пространственных представлений и способов ориентации в пространстве участвуют различные анализаторы (кинестетический, осязательный, зрительный, слуховой, обонятельный)» (там же, С. 113). Развитие пространственных представлений может быть способом развития математических способностей. Например, в одном из исследований (Kriszti n et al., 2015) было показано, что занятия оригами позволяют корректиро-

вать трудности в работе с числовым материалом у детей. В отечественной нейропсихологии подготовку дошкольников к изучению математики также предлагается начинать с развития зрительно-пространственных функций (Ахутина и др., 2007; Ахутина, Пылаева, 2015).

Ярким примером совместного использования зрительно-пространственного восприятия и арифметических действий является определение времени по часам со стрелками. При первичном овладении этим умением дети должны каждый раз определять положение минутной стрелки с учетом числового обозначения и затем производить умножение на 5. Позднее, при возникновении автоматизированного навыка, осознанного умножения уже не происходит. Развернутое поэлементное действие заменяется свернутым действием, имплицитно содержащим в себе как пространственный, так и математический компонент. Интересно, что даже среди взрослых людей наблюдаются выраженные индивидуальные различия в эффективности определения времени по часам. Показано (Балашова, Ковязина, 2006), что здоровые люди обычно правильно определяют время по часам с обычным циферблатом. Однако при определении времени по часам без цифр без ошибок справляются с этим лишь 54% испытуемых. Этот факт позволяет предположить, что почти у половины взрослых людей необходимым компонентом определения времени по часам остается математическая операция, возможная лишь при непосредственном восприятии чисел.

Ценные сведения о связи математических и пространственных представлений при реализации межмодального взаимодействия дает изучение синестезии. Хотя синестезия рассматривается как нечто выходящее за рамки нормы, существуют универсальные механизмы межмодального взаимодействия, характерные как для синестетов, так и для обычных людей (Sagiv, Ward, 2006). По-видимому, пространственно-числовое взаимодействие является одним из таких механизмов. Пространственная синестезия позволяет расставлять на определенных местах представляемого пространства цифры, буквы, дни недели и другие последовательные серии. Однако такая спо-

собность существует и у обычных людей или может быть развита в процессе тренировок (Foer, 2012). Предполагается, что за эту способность отвечают теменные отделы мозга, однако в случае синестезии эффект достигается их близостью с височными отделами, задействованными в кодировании последовательностей (Eagleman, 2009). При исследовании испытуемого, имевшего возможность представлять математические формулы и объекты в виде геометрических фигур, было обнаружено, что работа с формулами, вызывающими синестезию, сопровождается активацией височных, теменных и передних отделов мозга в левом полушарии (Brogaard, Vanni, Silvanto, 2013). При графемно-цветовой синестезии возникают цветовые или фактурные ассоциации (фотизмы) с буквами, цифрами и словами. В тех случаях, когда цифры вызывают у людей цветовые ощущения, они эффективнее выполняют познавательные и математические задания, если фактический цвет цифр совпадает с вызываемым в процессе синестезии (Cohen Kadosh, Henik, 2008; Green, Goswami, 2008; Mills et al., 2009; Ghirardelli et al., 2010). В большинстве случаев человек указывает на возникновение цветовых ассоциаций в ответ на предъявление цифр, однако возможно и обратное – возникновение числовых представлений в ответ на предъявление цветов (McCarthy et al., 2013). Получены данные в пользу того, что несимволические обозначения количества также могут вызывать синестезию (Gertner, Arend, Henik, 2013). В работе Дж. Хейл с соавторами (Hale et al., 2014) обсуждаются преимущества синестезии при восприятии времени, чисел и пространства. Показано, что люди, которым свойственны эти виды синестезии, оказываются значимо успешнее при вынесении порядковых суждений в отношении пространства с опорой на зрительно-пространственную рабочую память.

Хотя нейробиологические исследования, проведенные с помощью различных методов нейровизуализации, выявляют схожие области мозга, задействованные в реализации межмодального взаимодействия, пространственных функций и математической деятельности, следует с осторожностью подходить к интерпретации получаемых

результатов с позиции узкого локализицизма. Преимущественная активация определенной области мозга далеко не всегда указывает на ее ведущую роль в обеспечении изучаемой функции. Если деятельность является автоматизированной, а соответствующие функции давно сформированы, уровень метаболизма в обеспечивающих эту деятельность участках мозга может не отличаться от фонового. Кроме этого, существует большая вариативность в операциональном составе математической деятельности, так что в разных ситуациях в работу могут включаться разные нейрональные контуры.

Нейропсихологический анализ решения задач, проведенный А.Р. Лурия и Л.С. Цветковой, показывает, что «различные отделы коры головного мозга, совместная работа которых осуществляет сложную психическую деятельность, имеют свои строго специализированные функции и каждый из этих отделов вносит в построение этой сложной деятельности свой специфический вклад» (Лурия, Цветкова, 2010, С. 322–323). Ведущую (но не единственную) роль в решении задач играют теменно-затылочные и лобные отделы мозга. По-видимому, третичные поля коры, представляющие собой зоны перекрытия анализаторов, позволяют оперировать полимодальными объектами при выполнении мыслительных операций. «Координируя центральные отделы зрительного, кинестетического и вестибулярного анализаторов, затылочно-теменные отделы коры играют существенную роль в объединении поступающей информации в симультанные пространственные группы, сопоставляя отдельные сигналы и организуя их в целые пространственно ориентированные структуры» (там же, С. 38). При поражении теменно-затылочных отделов «распадается возможность объединять элементы последовательно поступающей информации в симультанно обозримые схемы» (там же, С. 323). Можно полагать, что именно пространственная локализация является основой объединения информации, поступающей от разных органов чувств. Более того, само по себе «пространство» – это схема внешнего мира, основанная на согласованном поступлении различных видов сигнала.

Процесс развития пространственных представлений начинается с первых дней жизни. «Сначала ребенок видит движущийся предмет и выбрасывает руку по направлению к этому предмету. Позже зрительно-пространственный контроль определяет не только последнюю точку, но и само дотягивание, т.к. возникают более сложные формы управления движением, предполагающие использование полисенсорной информации» (Ахутина, Пылаева, 2015, С. 175).

На наш взгляд, решение математических задач всегда сопровождается межмодальным взаимодействием, протекающим большей частью неосознанно. Одни условия задачи могут эффективнее об-

Преимущественная активация определенной области мозга далеко не всегда указывает на ее ведущую роль в обеспечении изучаемой функции. Если деятельность является автоматизированной, а соответствующие функции давно сформированы, уровень метаболизма в обеспечивающих эту деятельность участках мозга может не отличаться от фонового

рабатываться в одной модальности, другие – в другой. Соответственно, если условия задачи были восприняты в одной модальности, а затем перекодированы и обработаны в другой, это может приводить как к повышению, так и к снижению эффективности решения. Если в исходной модальности задача решалась эффективнее, то перевод условий задачи в другую модальность приводит к снижению эффективности решения, если же исходная модальность плохо подходила для оперирования полученной информацией, то перевод в другую модальность, в которой задача решается быстрее и проще, приводит к повышению эффективности решения.

Хорошо известно описание процесса решения задач С.В. Шерешевским, обладавшим феноменальной памятью, основанной на спонтанных синестетических ассоциациях. Работавший с ним А.Р. Лурия отмечал явные преимущества наглядного мышления: «Нетрудно видеть, как быстро и легко выполняется умозрительное решение задачи там, где решение ее вербально-логическим путем должно вызывать дополнительные отвлекающие расчеты» (Лурия, 1996, С. 64). Визуальное мышление активно использовалось в античной и средневековой математике. Например, для математиче-

ских текстов средневековой Индии (возможно, они восходят к более древним временам) были характерны наглядные способы доказательства геометрических утверждений. Читателям предлагался чертеж, под которым было написано всего одно слово: «Смотри!» (Успенский, 2011). Интересна также идея М. Чангизи, предложившего использовать особенность человеческого восприятия для совершения вычислительных операций. «В отличие от мышления, когда мы “перемалываем” идеи одну за другой, зрение не требует усилий. Более того, множество очень сложных зрительных стимулов может обрабатываться одновременно: одна увиден-

ная нами картина – это тысячи входных сигналов» (Чангизи, 2015, С. 282). В качестве примера была предложена «зрительная микросхема», позволяющая использовать зрительную систему для вычисления функции строгой дизъюнкции. Зрительные стимулы могут быть восприняты двумя четко различимыми способами (повернутыми в одну или другую сторону). В любой точке схемы значение сигнала зависит от значений входных сигналов. Следование взглядом по микросхеме позволяет вычислять итоговый результат, не задумываясь над значениями булевых функций. Скорость такого решения в несколько раз выше традиционного способа, поскольку зрительная система производит вычисления без явных усилий и автоматически выдает содержащее ответ восприятие.

Мы предполагаем, что способность к различным межмодальным перешифровкам существенно варьирует от человека к человеку. Эффективность определенных межмодальных взаимодействий может стоять за выраженностью тех или иных компонентов математических способностей и обуславливать успешность решения соответствующих типов математических задач. В дальнейшем эта гипотеза может быть проверена на эмпирическом уровне.

Заключение

Перспективность изучения межмодального взаимодействия отмечают многие отечественные и зарубежные авторы. Анализ имеющихся научных данных подтверждает необходимость учета взаимодействия органов чувств в нейропсихологических исследованиях. Есть основания полагать, что взаимодействие

Непрерывное взаимодействие органов чувств, протекающее на разных уровнях нервной системы, обеспечивает полноту, целостность и непротиворечивость восприятия окружающего мира. Воспринятая информация обрабатывается полимодально и может перекодироваться из одной модальности в другую при реализации познавательной деятельности.

анализаторов лежит в основе развития и формирования всех познавательных процессов. Непрерывное взаимодействие органов чувств, протекающее на разных уровнях нервной системы, обеспечивает полноту, целостность и непротиворечивость восприятия окружающего мира. Воспринятая информация

обрабатывается полимодально и может перекодироваться из одной модальности в другую при реализации познавательной деятельности.

Результаты рассмотренных исследований позволяют говорить о том, что межмодальное взаимодействие играет существенную роль в психологической и мозговой организации математических способностей. Синтетическая ра-

бота органов чувств на ранних этапах развития позволяет формировать пространственные представления, которые являются эволюционной основой не-символической математики. На мозговом уровне данный процесс преимущественно обеспечивается работой теменных отделов и третичных зон коры, находя-

щихся на стыке корковых отделов анализаторов. Определенную роль также играют височные отделы, находящиеся рядом с парагиппокампальной областью. В дальнейшем при освоении школьной математики структура математических способностей меняется, на первый план выходит вербально-символическое кодирование количественных представлений. Перестройка функциональных систем сопровождается возрастающей ролью межполушарного взаимодействия. Мы полагаем, что способность к перешифровке информации из одной модальности в другую не только является предпосылкой развития математических способностей, но и после освоения школьной математики оказывает влияние на эффективность выполнения математической деятельности. Для целого ряда задач унимодальный процесс решения с использованием только вербально-символического кодирования оказывается неоптимальным, а перевод условий задачи из одной модальности в другую способствует увеличению эффективности решения.

Литература:

- Ананьев Б.Г. Психология и проблемы человекознания / под ред. А.А. Бодалева. – Москва : Издательство «Институт практической психологии»; Воронеж : МОДЭК, 1996. – 384 с.
- Ахутина Т.В., Манелис Н.Г., Пылаева Н.М. и др. Скоро школа. Путешествие с Бимом и Бомом в страну Математику: пособие по подгот. детей к шк.: метод. указ. – Москва: Теревинф, Генезис, 2007. – 32 с.
- Ахутина Т.В., Пылаева Н.М. Преодоление трудностей учения: нейропсихологический подход : учеб. пособие для студ. учреждений высш. образования. – Москва: Академия, 2015. – 288 с.
- Балашова Е.Ю., Ковязина М.С. Исследование оптико-пространственных функций в норме // Журнал прикладной психологии. – 2006. – № 6(1). – С. 36–44.
- Березина Т.Н. Психические образы высших порядков: слово как звучание и как значение // Педагогика и психология образования. – 2012. – № 4. – С. 71–84.
- Большой психологический словарь / сост. и общ. ред. Б.Г. Мещеряков, В.П. Зинченко. – Москва : АСТ, АСТ МОСКВА; Санкт-Петербург : Прайм-ЕВРОЗНАК, 2009. – 811 с.
- Веккер Л.М. Психика и реальность: единая теория психических процессов. – Москва : Смысл, PerSe, 2000. – 685 с.
- Величковский Б.М., Зинченко В.П., Лурия А.Р. Психология восприятия. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1973. – 247 с.
- Зеленина Е.О. Синестезия как проблема педагогики музыкального воспитания и образования: развитие слухо-зрительных интермодальных ассоциаций. – Санкт-Петербург : Астерион, 2010. – 174 с.
- Киселева Н.А. Математика и действительность. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1967. – 124 с.
- Кислинг У. Сенсорная интеграция в диалоге: понять ребенка, распознать проблему, помочь обрести равновесие / под ред. Е.В. Ключковой. – Москва : Теревинф, 2011. – 240 с.
- Ковязина М.С. Нейропсихологический анализ патологии мозолистого тела. – Москва : Генезис, 2012. – 176 с.
- Котова И.Б. С.В. Кравков как психолог и психофизиолог // Вопросы психологии. – 1982. – № 4. – С. 50–60.
- Кравков С.В. Взаимодействие органов чувств. – Москва; Ленинград : АН СССР, 1948. – 128 с.
- Кузнецова Э.А. Трактат о синестезии. – Казань: Казан. гос. ун-т им. В.И. Ульянова-Ленина, 2004. – 123 с.
- Леушина А.М. Формирование элементарных математических представлений у детей дошкольного возраста. – Москва : Просвещение, 1974. – 368 с.
- Лурия А.Р. Романтические эссе. – Москва : Педагогика-Пресс, 1996. – 240 с.
- Лурия А.Р. Основы нейропсихологии : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – Москва : Академия, 2003. – 384 с.
- Лурия А.Р. Лекции по общей психологии. – Санкт-Петербург : Питер, 2006. – 320 с.

- Лурия А.Р., Цветкова Л.С. Нейропсихологический анализ решения задач : учеб. пособие. – Москва : МПСИ; Воронеж : МОДЭК, 2010. – 368 с.
- Немов Р.С. Общая психология. В 3 тт. Т. II. Познавательные процессы и психические состояния : учебник. – Москва : Юрайт, 2015. – 1007 с.
- Прокофьева Л.П. Синестезия в современной науке. Т. 10. й парадигме // Известия Саратовского университета. Серия Филология. Журналистика. – 2010 – Т. 10. – Вып. 1. – С. 3–10.
- Успенский В.А. Апология математики. – Санкт-Петербург : Амфора, 2011. – 554 с.
- Хохлов Н.А. Тест на математические (арифметические, алгебраические, геометрические) способности «МААГС-2015». – Москва : Генезис, 2015. – 80 с.
- Хохлов Н.А., Ковязина М.С. Латеральные признаки и их взаимодействие как фактор выраженности математических способностей в юношеском возрасте // Национальный психологический журнал. – 2016. – № 3(23). – С. 97–113. doi: 10.11621/npj.2016.0313
- Чангизи М. Революция в зрении: что, как и почему мы видим на самом деле. – Москва : АСТ, CORPUS, 2015. – 304 с.
- Шеповальников А.Н., Цицерошин М.Н., Погосян А.А. О роли различных зон коры и их связей в формировании пространственной упорядоченности поля биоэлектрических потенциалов мозга в постнатальном онтогенезе // Физиология человека. – 1997. – Т. 23. – № 2. – С. 12–24.
- Arend, I., Gertner, L., & Henik, A. (2013) Perceiving numbers influences actions in number-space synesthesia. *Cortex*. Vol. 49 (7), 1955-1962. doi: 10.1016/j.cortex.2012.04.019
- Ayres, A.J. (1979) *Sensory Integration and the Child*. Los Angeles: Western Psychological Association, 191.
- Baxter, M.G. (2009) Involvement of medial temporal lobe structures in memory and perception. *Neuron*. Vol. 61 (5), 667-677. doi: 10.1016/j.neuron.2009.02.007
- Brogaard, B., Vanni, S., & Silvano, J. (2013) Seeing mathematics: perceptual experience and brain activity in acquired synesthesia. *Neurocase*. Vol. 19 (6), 566-575. doi: 10.1080/13554794.2012.701646
- Catani, M., & de Schotten, M.T. (2012) *Atlas of Human Brain Connections*. New York, Oxford University Press, 519. doi: 10.1093/med/9780199541164.001.0001
- Cohen, Kadosh, R., & Henik, A. (2008) Color congruity effect: where do colors and numbers interact in synesthesia? *Cortex*. Vol. 42 (2), 259-263.
- Crollen, V., & Noël, M.P. (2015) Spatial and numerical processing in children with high and low visuospatial abilities. *Journal of Experimental Child Psychology*. Vol. 132, 84-98. doi: 10.1016/j.jecp.2014.12.006
- Cutini, S., Scarpa, F., Scatturin, P., Dell'Acqua, R., & Zorzi, M. (2014) Number-space interactions in the human parietal cortex: Enlightening the SNARC effect with functional near-infrared spectroscopy. *Cerebral Cortex*. Vol. 24 (2), 444-451. doi: 10.1093/cercor/bhs321
- Cytowic, R.E. (2002) *Synesthesia: A Union of the Senses*. 2nd ed. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 424.
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993) The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology*. Vol. 122 (3), 371-396. doi: 10.1037/0096-3445.122.3.371
- Eagleman, D.M. (2009) The objectification of overlearned sequences: a new view of spatial sequence synesthesia. *Cortex*. Vol. 45 (10), 1266-1277. doi: 10.1016/j.cortex.2009.06.012
- Feigenson, L. (2011) Predicting sights from sounds: 6-month-olds' intermodal numerical abilities. *Journal of Experimental Child Psychology*. Vol. 110 (3), 347-361. doi: 10.1016/j.jecp.2011.04.004
- Fischer, M.H., & Shaki, S. (2014) Spatial associations in numerical cognition – from single digits to arithmetic. *Quarterly journal of experimental psychology*. Vol. 67 (8), 1461-1483.
- Foer, J. (2012) *Moonwalking with Einstein: The Art and Science of Remembering Everything*. London, Penguin Books, 307. doi: 10.1080/17470218.2014.927515
- Fyhn, M., Molden, S., Witter, M.P., Moser, E.I., & Moser, M.B. (2004) Spatial representation in the entorhinal cortex. *Science*. Vol. 305 (5688), 1258-1264. doi: 10.1126/science.1099901
- Galton, F. (1880) Visualised numerals. *Nature*. Vol. 21, 252-256, 494-495. doi: 10.1038/021494e0
- Galton, F. (1881) The visions of sane persons. *Proceedings of the Royal Institution*. Vol. 9, 644-655.
- Gertner, L., Arend, I., & Henik, A. (2013) Numerical synesthesia is more than just a symbol-induced phenomenon. *Frontiers in Psychology*. Vol. 4. A. 860. doi: 10.3389/fpsyg.2013.00860
- Ghirardelli, T.G., Mills, C.B., Zilioli, M.K., Bailey, L.P., & Kretschmar, P.K. (2010) Synesthesia affects verification of simple arithmetic equations. *The Journal of general psychology*. Vol. 137 (2), 175-189. doi: 10.1080/00221301003645152
- Graham, K.S., & Gaffan, D. (2005) The role of the medial temporal lobe in memory and perception: evidence from rats, nonhuman primates and humans. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. B: Comparative and Physiological Psychology*. Vol. 58 (3-4), 193-201. doi: 10.1080/02724990544000059
- Green, J.A., & Goswami, U. (2008) Synesthesia and number cognition in children. *Cognition*. Vol. 106 (1), 463-473. doi: 10.1016/j.cognition.2007.01.013
- Hale, J., Thompson, J.M., Morgan, H.M., Cappelletti, M., & Kadosh, R.C. (2014) Better together? The cognitive advantages of synaesthesia for time, numbers, and space. *Cognitive Neuropsychology*. Vol. 31 (7-8), 545-564. doi: 10.1080/02643294.2014.967759
- Hochel, M., & Milán, E.G. (2008) Synaesthesia: the existing state of affairs. *Cognitive neuropsychology*. Vol. 25 (1), 93-117. doi: 10.1080/02643290701822815
- Hubbard, E.M., Pinel, P., Piazza, M., & Dehaene, S. (2005) Interactions between numbers and space in parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 6, 435-448. doi: 10.1038/nrn1684
- Knops, A., & Willmes, K. (2014) Numerical ordering and symbolic arithmetic share frontal and parietal circuits in the right hemisphere. *NeuroImage*. Vol. 84, 786-795. doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.09.037
- Krisztján, Á., Bernáth, L., Gombos, H., & Vereczkei, L. (2015) Developing numerical ability in children with mathematical difficulties using origami.

- Perceptual and motor skills. Vol. 121 (1), 233-243. doi: 10.2466/24.10.PMS.121c16x1
- Lyons, I.M., & Ansari, D. (2015) Foundations of children's numerical and mathematical skills: the roles of symbolic and nonsymbolic representations of numerical magnitude. *Advances in Child.* 93-116. doi: 10.1016/bs.acdb.2014.11.003
- McCarthy, J.D., Barnes, L.N., Alvarez, B.D., & Caplovitz, G.P. (2013) Two plus blue equals green: grapheme-color synesthesia allows cognitive access to numerical information via color. *Consciousness and Cognition.* Vol. 22 (4), 1384-1392. doi: 10.1016/j.concog.2013.09.005
- Matejko, A.A., & Ansari, D. (2016) Trajectories of Symbolic and Nonsymbolic Magnitude Processing in the First Year of Formal Schooling. *PLoS One.* Vol. 11 (3). doi: 10.1371/journal.pone.0149863. doi: 10.1371/journal.pone.0149863
- Mills, C.B., Metzger, S.R., Foster, C.A., Valentine-Gresko, M.N., & Ricketts, S. (2009) Development of color-grapheme synesthesia and its effect on mathematical operations. *Perception.* Vol. 38 (4), 591-605. doi: 10.1068/p6109
- Piazza, M., & Izard, V. (2009) How humans count: numerosity and the parietal cortex. *Neuroscientist.* Vol. 15 (3), 261-273.
- Ramachandran, V.S., & Hubbard, E.M. (2001) Synaesthesia – a window into perception, thought and language. *Journal of Consciousness Studies.* Vol. 8 (12), 3-34.
- Riccò, D, de Córdoba Serrano, M.J., & Day, S.A. (2014) Theoretical, artistic and scientific foundations. Granada: Ediciones Fundación Internacional ArteCittà, 372.
- Robertson, L.C., & Sagiv, N. (2004) Synesthesia: Perspectives from Cognitive Neuroscience. Oxford, Oxford University Press, 304.
- Rouw, R., Scholte, H.S., & Colizoli, O. (2011) Brain areas involved in synaesthesia: a review. *Journal of neuropsychology.* Vol. 5 (2), 214-242. doi: 10.1111/j.1748-6653.2011.02006.x
- Sagiv, N., & Ward, J. (2006) Crossmodal interactions: lessons from synesthesia. *Progress in Brain Research.* Vol. 155, 259-271. doi: 10.1016/S0079-6123(06)55015-0
- Simner, J. (2012) Defining synaesthesia. *British journal of psychology.* Vol. 103 (1), 1-15.
- Simon, J.R., & Wolf, J.D. (1963) Choice reaction time as a function of angular stimulus-response correspondence and age. *Ergonomics.* Vol. 6 (1), 99-105. doi: 10.1080/00140136308930679
- Starr, A., Libertus, M.E., & Brannon, E.M. (2013) Number sense in infancy predicts mathematical abilities in childhood. *PNAS.* Vol. 110 (45), 18116-18120. doi: 10.1073/pnas.1302751110
- Suzuki, W.A. (2009) Perception and the medial temporal lobe: evaluating the current evidence. *Neuron.* Vol. 61 (5), 657-666. doi: 10.1016/j.neuron.2009.02.008
- Suzuki, W.A., & Baxter, M.G. (2009) Memory, perception, and the medial temporal lobe: a synthesis of opinions. *Neuron.* Vol. 61 (5), 678-679. doi: 10.1016/j.neuron.2009.02.009
- Suzuki, W.A., Miller, E.K., & Desimone, R. (1997) Object and place memory in the macaque entorhinal cortex. *Journal of Neurophysiology.* Vol. 78 (2), 1062-1081.
- Thompson, J.M., Nuerk, H.-C., Moeller, K., & Cohen Kadosh, R. (2013) The link between mental rotation ability and basic numerical representations. *Acta Psychologica.* Vol. 144 (2), 324-331. doi: 10.1016/j.actpsy.2013.05.009
- Wei, W., Yuan, H., Chen, C., & Zhou, X. (2012) Cognitive correlates of performance in advanced mathematics. *British Journal of Educational Psychology.* Vol. 82 (1), 157-181. doi: 10.1111/j.2044-8279.2011.02049.x
- Wei, W., Chen, C., Yang, T., Zhang, H., & Zhou, X. (2014) Dissociated neural correlates of quantity processing of quantifiers, numbers, and numerosities. *Human Brain Mapping.* Vol. 35 (2), 444-454. doi: 10.1002/hbm.22190
- Witter, M.P., Wouterlood, F.G., Naber, P.A., & Van Haefen, T. (2000) Anatomical organization of the parahippocampal-hippocampal network. *Annals of the New York Academy of Sciences.* Vol. 911, 1-24. doi: 10.1111/j.1749-6632.2000.tb06716.x
- Zhang, S.J., Ye, J., Couey, J.J., Witter, M., Moser, E.I., & Moser, M.B. (2014) Functional connectivity of the entorhinal-hippocampal space circuit. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences.* Vol. 369 (1635): 20120516. doi: 10.1098/rstb.2012.0516

References:

- Akhutina, T.V., Manelis, N.G., & Pylaeva, N.M et al. (2007) School is soon. A journey with Bim and Bom to the world of Mathematics: school preparation guide for children. Moscow, Terevinf, Genesis, 32.
- Akhutina, T.V., & Pylaeva, N.M. (2015) Overcoming learning difficulties: Neuropsychological approach: manual for higher school. Moscow, Akademiya, 288.
- Ananiev, B.G. (1996) Psychology and issues anthropology. Moscow, Izdatel'stvo «Institut prakticheskoy psikhologii», Voronezh: NPO «MODEK», 384.
- Arend, I., Gertner, L., & Henik, A. (2013) Perceiving numbers influences actions in number-space synesthesia. *Cortex.* Vol. 49 (7), 1955-1962. doi: 10.1016/j.cortex.2012.04.019
- Ayres, A.J. (1979) Sensory Integration and the Child. Los Angeles: Western Psychological Association, 191.
- Balashova, E.Yu, & Kovyazina, M.S. (2006) Research on optical-spatial functions normally. [*Zhurnal prikladnoy psikhologii*]. 6 (1), 36-44.
- Baxter, M.G. (2009) Involvement of medial temporal lobe structures in memory and perception. *Neuron.* V. 61 (5), 667-677. doi: 10.1016/j.neuron.2009.02.007
- Berezina, T.N. (2012) Mental images of the highest order: the word as sound and meaning. [*Pedagogika i psikhologiya obrazovaniya*]. 4, 71.
- Brogaard, B., Vanni, S., & Silvano, J. (2013) Seeing mathematics: perceptual experience and brain activity in acquired synesthesia. *Neurocase.* Vol. 19 (6), 566-575. doi: 10.1080/13554794.2012.701646
- Catani, M., & de Schotten, M.T. (2012) Atlas of Human Brain Connections. New York, Oxford University Press, 519. doi: 10.1093/med/9780199541164.001.0001

- Changizi, M. (2015) Revolution in vision: what, how and why we see in reality. Moscow, AST, CORPUS, 304.
- Cohen, Kadosh, R., & Henik, A. (2008) Color congruity effect: where do colors and numbers interact in synesthesia? *Cortex*. Vol. 42 (2), 259-263.
- Crollen, V., & Noël, M.P. (2015) Spatial and numerical processing in children with high and low visuospatial abilities. *Journal of Experimental Child Psychology*. Vol. 132, 84-98. doi: 10.1016/j.jecp.2014.12.006
- Cutini, S., Scarpa, F., Scatturin, P., Dell'Acqua, R., & Zorzi, M. (2014) Number-space interactions in the human parietal cortex: Enlightening the SNARC effect with functional near-infrared spectroscopy. *Cerebral Cortex*. Vol. 24 (2), 444-451. doi: 10.1093/cercor/bhs321
- Cytowic, R.E. (2002) Synesthesia: A Union of the Senses. 2nd ed. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 424.
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993) The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology*. Vol. 122 (3), 371-396. doi: 10.1037/0096-3445.122.3.371
- Eagleman, D.M. (2009) The objectification of overlearned sequences: a new view of spatial sequence synesthesia. *Cortex*. Vol. 45 (10), 1266-1277. doi: 10.1016/j.cortex.2009.06.012
- Feigenson, L. (2011) Predicting sights from sounds: 6-month-olds' intermodal numerical abilities. *Journal of Experimental Child Psychology*. Vol. 110 (3), 347-361. doi: 10.1016/j.jecp.2011.04.004
- Fischer, M.H., & Shaki, S. (2014) Spatial associations in numerical cognition – from single digits to arithmetic. *Quarterly journal of experimental psychology*. Vol. 67 (8), 1461-1483.
- Foer, J. (2012) Moonwalking with Einstein: The Art and Science of Remembering Everything. London, Penguin Books, 307. doi: 10.1080/17470218.2014.927515
- Fyhn, M., Molden, S., Witter, M.P., Moser, E.I., & Moser, M.B. (2004) Spatial representation in the entorhinal cortex. *Science*. Vol. 305 (5688), 1258-1264. doi: 10.1126/science.1099901
- Galton, F. (1880) Visualised numerals. *Nature*. Vol. 21, 252-256, 494-495. doi: 10.1038/021494e0
- Galton, F. (1881) The visions of sane persons. *Proceedings of the Royal Institution*. Vol. 9, 644-655.
- Gertner, L., Arend, I., & Henik, A. (2013) Numerical synesthesia is more than just a symbol-induced phenomenon. *Frontiers in Psychology*. Vol. 4. A. 860. doi: 10.3389/fpsyg.2013.00860
- Ghirardelli, T.G., Mills, C.B., Zilioli, M.K., Bailey, L.P., & Kretschmar, P.K. (2010) Synesthesia affects verification of simple arithmetic equations. *The Journal of general psychology*. Vol. 137 (2), 175-189. doi: 10.1080/00221301003645152
- Graham, K.S., & Gaffan, D. (2005) The role of the medial temporal lobe in memory and perception: evidence from rats, nonhuman primates and humans. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. B: Comparative and Physiological Psychology*. Vol. 58 (3-4), 193-201. doi: 10.1080/02724990544000059
- Green, J.A., & Goswami, U. (2008) Synesthesia and number cognition in children. *Cognition*. Vol. 106 (1), 463-473. doi: 10.1016/j.cognition.2007.01.013
- Hale, J., Thompson, J.M., Morgan, H.M., Cappelletti, M., & Kadosh, R.C. (2014) Better together? The cognitive advantages of synaesthesia for time, numbers, and space. *Cognitive Neuropsychology*. Vol. 31 (7-8), 545-564. doi: 10.1080/02643294.2014.967759
- Hochel, M., & Milán, E.G. (2008) Synaesthesia: the existing state of affairs. *Cognitive neuropsychology*. Vol. 25 (1), 93-117. doi: 10.1080/02643290701822815
- Hubbard, E.M., Pinel, P., Piazza, M., & Dehaene, S. (2005) Interactions between numbers and space in parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 6, 435-448. doi: 10.1038/nrn1684
- Khokhlov, N.A. (2015) Mathematics (arithmetic, algebraic, geometric) ability test «MAAGS-2015». Moscow, Genesis, 80.
- Khokhlov N.A., & Kovyazina M.S. (2016). Lateral signs and their interaction as a factor in the severity of mathematical abilities in adolescence. *[Natsional'nyy psikhologicheskii zhurnal]*, 3, 97-113. doi: 10.11621/npj.2016.0313
- Kiselev, N.A. (1967) Mathematics and reality. Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo universitetata, 124.
- Kiessling, W. (2011) Sensory Integration in the conversation: to perceive a child, to recognize the problem, to help find a balance. Moscow, Terevinf, 240.
- Knops, A., & Willmes, K. (2014) Numerical ordering and symbolic arithmetic share frontal and parietal circuits in the right hemisphere. *NeuroImage*. Vol. 84, 786-795. doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.09.037
- Kotova, I.B., & Kravkov, S.V. (1982) As psychologist and psychophysicist. *[Voprosy psikhologii]*. 4, 50-60.
- Kovyazina, M.S. (2012) Neuropsychological analysis of the corpus callosum pathology. Moscow, Genesis, 176.
- Kravkov, S.V. (1948) The interaction of sensory organs. Moscow, Leningrad, AN SSSR, 128.
- Krisztján, Á., Bernáth, L., Gombos, H., & Vereczkei, L. (2015) Developing numerical ability in children with mathematical difficulties using origami. *Perceptual and motor skills*. Vol. 121 (1), 233-243. doi: 10.2466/24.10.PMS.121c16x1
- Kuznetsova, E.A. (2004) Treatise on synesthesia. Kazan, Kazanskiy gosudarstvennyy universitet im. V.I. Ul'yanova-Lenina, 123.
- Leushina, A.M. (1974) Development of elementary mathematical concepts in preschool children. Moscow, Prosvshhenie.
- Luria, A.R. (1996) Romantic essays. Moscow, Pedagogika-Press, 240.
- Luria, A.R. (2003) Basics of neuropsychology: manual. Moscow, Akademiya, 384.
- Luria, A.R. (2006) Lectures on general psychology. St. Petersburg, Piter, 320.
- Luria, A.R., & Tsvetkova, L.S. (2010) Neuropsychological analysis of problem solving: manual. Moscow, MPSI, Voronezh MODEK, 368.
- Lyons, I.M., & Ansari, D. (2015) Foundations of children's numerical and mathematical skills: the roles of symbolic and nonsymbolic representations of numerical magnitude. *Advances in Child*. 93-116. doi: 10.1016/bs.acdb.2014.11.003
- McCarthy, J.D., Barnes, L.N., Alvarez, B.D., & Caplovitz, G.P. (2013) Two plus blue equals green: grapheme-color synesthesia allows cognitive access to numerical information via color. *Consciousness and Cognition*. Vol. 22 (4), 1384-1392. doi: 10.1016/j.concog.2013.09.005

- Matejko, A.A., & Ansari, D. (2016) Trajectories of Symbolic and Nonsymbolic Magnitude Processing in the First Year of Formal Schooling. *PLoS One*. Vol. 11 (3). doi: 10.1371/journal.pone.0149863. doi: 10.1371/journal.pone.0149863
- (Eds.) Meshcheryakov, B.G., & Zinchenko, V.P. (2009) Big psychological dictionary. Moscow, AST, AST MOSKVA, St. Petersburg, Praym EVROZNAK, 811.
- Mills, C.B., Metzger, S.R., Foster, C.A., Valentine-Gresko, M.N., & Ricketts, S. (2009) Development of color-grapheme synesthesia and its effect on mathematical operations. *Perception*. Vol. 38 (4), 591-605. doi: 10.1068/p6109
- Nemov, R.S. (2015) General Psychology. Cognitive processes and mental states: textbook. Vol. 2. Moscow, Yurayt, 1007. doi: 10.1177/1073858409333073
- Piazza, M., & Izard, V. (2009) How humans count: numerosity and the parietal cortex. *Neuroscientist*. Vol. 15 (3), 261-273.
- Prokofiev, L.P. (2010) Synesthesia in the modern scientific paradigm. [*Izvestiya Saratovskogo universiteta*]. Vol. 10. Series Philology. Journalism. Vol. 1, 3-10.
- Ramachandran, V.S., & Hubbard, E.M. (2001) Synaesthesia – a window into perception, thought and language. *Journal of Consciousness Studies*. Vol. 8 (12), 3-34.
- Riccò, D, de Córdoba Serrano, M.J., & Day, S.A. (2014) Theoretical, artistic and scientific foundations. Granada: Ediciones Fundación Internacional ArteCittà, 372.
- Robertson, L.C., & Sagiv, N. (2004) Synesthesia: Perspectives from Cognitive Neuroscience. Oxford, Oxford University Press, 304.
- Rouw, R., Scholte, H.S., & Colizoli, O. (2011) Brain areas involved in synaesthesia: a review. *Journal of neuropsychology*. Vol. 5 (2), 214-242. doi: 10.1111/j.1748-6653.2011.02006.x
- Sagiv, N., & Ward, J. (2006) Crossmodal interactions: lessons from synesthesia. *Progress in Brain Research*. Vol. 155, 259-271. doi: 10.1016/S0079-6123(06)55015-0
- Shepovnikov, A.N., Tsitseroshin, M.N., & Pogosyan, A.A. (1997) On the role of various cortical areas and their connections in making spatial ordering of the brain area biopotentials in postnatal ontogenesis. [*Fiziologiya cheloveka*]. Vol. 23, 2, 12-24. doi: 10.1348/000712610X528305
- Simner, J. (2012) Defining synaesthesia. *British journal of psychology*. Vol. 103 (1), 1-15.
- Simon, J.R., & Wolf, J.D. (1963) Choice reaction time as a function of angular stimulus-response correspondence and age. *Ergonomics*. Vol. 6 (1), 99-105. doi: 10.1080/00140136308930679
- Starr, A., Libertus, M.E., & Brannon, E.M. (2013) Number sense in infancy predicts mathematical abilities in childhood. *PNAS*. Vol. 110 (45), 18116-18120. doi: 10.1073/pnas.1302751110
- Suzuki, W.A. (2009) Perception and the medial temporal lobe: evaluating the current evidence. *Neuron*. Vol. 61 (5), 657-666. doi: 10.1016/j.neuron.2009.02.008
- Suzuki, W.A., & Baxter, M.G. (2009) Memory, perception, and the medial temporal lobe: a synthesis of opinions. *Neuron*. Vol. 61 (5), 678-679. doi: 10.1016/j.neuron.2009.02.009
- Suzuki, W.A., Miller, E.K., & Desimone, R. (1997) Object and place memory in the macaque entorhinal cortex. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 78 (2), 1062-1081.
- Thompson, J.M., Nuerk, H.-C., Moeller, K., & Cohen Kadosh, R. (2013) The link between mental rotation ability and basic numerical representations. *Acta Psychologica*. Vol. 144 (2), 324-331. doi: 10.1016/j.actpsy.2013.05.009
- Uspenskiy, V.A. (2011) Mathematics apology. St. Petersburg, Amphora, 554.
- Van Campen, C. (2007) The Hidden Sense. Synesthesia in Art and Science. Cambridge, MIT Press, 198.
- Vekker, L.M. (2000) Mind and Reality: a unified theory of psychological processes. Moscow, Smysl, PerSe, 685.
- Velichkovsky, B.M., & Zinchenko, V.P., & Luria, A.R. (1973) The psychology of perception. Moscow Izdatel'stvo Moskovskogo universitetata, 247.
- Ward, J. (2013) Synesthesia. *Annual Review of Psychology*. Vol. 64, 49-75.
- Wei, W., Yuan, H., Chen, C., & Zhou, X. (2012) Cognitive correlates of performance in advanced mathematics. *British Journal of Educational Psychology*. Vol. 82 (1), 157-181. doi: 10.1111/j.2044-8279.2011.02049.x
- Wei, W., Chen, C., Yang, T., Zhang, H., & Zhou, X. (2014) Dissociated neural correlates of quantity processing of quantifiers, numbers, and numerosities. *Human Brain Mapping*. Vol. 35 (2), 444-454. doi: 10.1002/hbm.22190
- Witter, M.P., Wouterlood, F.G., Naber, P.A., & Van Haefen, T. (2000) Anatomical organization of the parahippocampal-hippocampal network. *Annals of the New York Academy of Sciences*. Vol. 911, 1-24. doi: 10.1111/j.1749-6632.2000.tb06716.x
- Zelenin, E.O. (2010) Synesthesia as an issue of musical education pedagogy and training: the development of audio-visual intermodal associations. St. Petersburg, Asterion, 174.
- Zhang, S.J., Ye, J., Couey, J.J., Witter, M., Moser, E.I., & Moser, M.B. (2014) Functional connectivity of the entorhinal-hippocampal space circuit. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. Vol. 369 (1635): 20120516. doi: 10.1098/rstb.2012.0516