

## Нейрофизиологические механизмы символической репрезентации количества

**Юлия Александровна Маракшина**

Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований,  
Москва, Россия

**Мария Александровна Ситникова**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Белгород, Россия,  
Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований,  
Москва, Россия

**Тимофей Валерьевич Адамович**

Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований,  
Москва, Россия

## Neurophysiological Mechanisms of Symbolic Quantity Representation

**Julia A. Marakshina**

Federal Research Centre of Psychological and Interdisciplinary Studies,  
Moscow, Russia

**Maria A. Sitnikova**

Belgorod State National Research University,  
Belgorod, Russia,  
Federal Research Centre of Psychological and Interdisciplinary Studies,  
Moscow, Russia

**Timofey V. Adamovich**

Federal Research Centre of Psychological and Interdisciplinary Studies,  
Moscow, Russia

**Для цитирования:** Маракшина, Ю. А., Ситникова, М. А., Адамович, Т. В. (2023). Нейрофизиологические механизмы символической репрезентации количества. *Lurian Journal*, 4(3), 22–55. doi: 10.15826/Lurian.2023.4.3.2

**To cite this article:** Marakshina, J. A., Sitnikova, M. A., & Adamovich, T. V. (2023). Neurophysiological Mechanisms of Symbolic Quantity Representation. *Lurian Journal*, 4(3), 22–55. doi: 10.15826/Lurian.2023.4.3.2

**Аннотация.** Исследование символической репрезентации количества является важной темой современной нейронауки. Данная тема связана с проблемами обучения математике, а также с механизмами символической обработки языковых систем человеком, что делает ее актуальной в области образования и педагогики. Целью исследования выступает анализ современного состояния проблемы нейрофизиологических механизмов символической репрезентации количества с использованием различных психофизиологических методов. В статье освещены основные вопросы, актуальные для современных психофизиологических исследований чувства числа. Представлены методы нейровизуализации, которые используются в данных исследованиях, их преимущества и недостатки. В обзоре описаны различные подходы к исследованию символической репрезентации количества. Рассмотрены проблемы развития репрезентации числа в онтогенезе, соотношения несимволического чувства числа и символической репрезентации количества с точки зрения модели тройного кода, мэппинга, эффекта числовой дистанции. Дана критика модели тройного кода, представления о развитии символической репрезентации в мозге (переход от правых областей мозга к левому полушарию). Описана гипотеза лобно-теменного сдвига, обусловившего процессы символической репрезентации количества, а также соотношение символических репрезентаций количества и точных вычислений. Отдельно проанализированы имеющиеся к настоящему моменту данные о психофизиологических механизмах символического чувства числа. Проведенный анализ показал, что символическая репрезентация количества обеспечивается мозговой системой, включающей различные структуры. В обзоре обозначены перспективы возможных исследований.

**Ключевые слова:** символическая репрезентация количества; ЭЭГ; фМРТ; фБИК-спектроскопия; лобно-теменной сдвиг

**Abstract.** The study of the symbolic quantity representation is currently an important topic in modern neuroscience. This area is related to the problems of teaching mathematics, as well as the mechanisms of symbolic processing of language systems in humans, which makes it relevant in the field of education and pedagogy. The purpose of the study was to analyze the state of the art in neurophysiological mechanisms of the symbolic quantity representation using different psychophysiological methods. The article presents the main issues relevant to modern psychophysiological studies of number sense. The main neuroimaging methods used in these studies, their advantages and disadvantages are considered. The review describes various approaches to the study of the symbolic quantity representation. The problems of number representation development, the relationship between the non-symbolic number sense and the symbolic quantity representation from the point of view of the triple code model, mapping, effect of numerical distance are considered. A critique of the triple code model and the idea of the symbolic representation development in the brain, particularly

the transition from the right areas of the brain to the left hemisphere are presented. The hypothesis of a frontoparietal shift of the symbolic quantity representation is described, as well as the relationship between symbolic representations of quantity and exact calculations. The currently available data on the psychophysiological mechanisms of the symbolic number sense are analyzed separately. The analysis showed that the symbolic quantity representation is provided by a brain system that includes different structures. The review outlines future directions for possible research.

**Keywords:** *symbolic quantity representation; EEG; fMRI; fNIRS; fronto-parietal shift*

## Введение

Чувство числа является базовой способностью воспринимать и оценивать количества (величины). Принято выделять несимволическое (или приблизительное) чувство числа как способность различать количества без счета и символическое чувство числа, связанное с оперированием математическими символами, например, арабскими цифрами (Dehaene, 1997, 2009; Gelman & Gallistel, 1986; Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004; Verguts & Fias, 2004). Несимволическое чувство числа связывают с системой приблизительной оценки количества — Approximate Number System, ANS (Halberda & Feigenson, 2008). Оно имеет эволюционные предпосылки и возникает у животных (Dehaene, 1997; Feigenson et al., 2004; Park J., Park D., & Polk, 2012; Piazza & Izard, 2009), присутствует уже у младенцев и сохраняется у взрослых (Dehaene, 2009; Desoete, Ceulemans, Roeyers, & Huylebroeck, 2009; Feigenson et al., 2004; Gallistel & Gelman, 2000; Izard, Sann, Spelke, & Streri, 2009; Piazza & Izard, 2009; Piazza, Izard, Pinel, Le Bihan, & Dehaene, 2004). Несимволическое чувство числа позволяет примерно оценивать количество представленных объектов. Символическое чувство числа является результатом работы системы точной оценки количества — Exact Number System, ENS (Castronovo & Göbel, 2012; Dehaene, 2009; Verguts & Fias, 2004). Символическое чувство числа позволяет оценивать величину объектов с помощью соответствующих им чисел. В нашем обзоре рассматриваются различные вопросы взаимосвязи между навыками приближенных и точных чисел. Термин «точные числовые навыки» используются в этой статье для обозначения числовых способностей, основанных на символических (вербальных или арабских) числах (Mussolin, Nys, Leybaert, & Content, 2016).

К настоящему моменту накоплен большой массив данных о нейрофизиологических основах символического чувства числа. Данные из разных областей, от когнитивной психологии до электрофизиологии, дают дополнительную информацию о том, как мозг манипулирует числами, именно поэтому изучение нейрофизиологических основ функционирования чувства числа представляет собой важную задачу. Отдельное направление исследований связано с изучением того, является ли несимволическое чувство числа основой для символического. Большая часть таких исследований направлена на выявление соотношения обеих

систем распознавания численности и связанных с ними мозговых механизмов в онтогенезе. Еще одно направление исследований занимается изучением нейрофизиологических механизмов символической обработки языковых систем у человека. Математический язык также представляет собой отдельную символическую систему, поэтому возникает задача изучения особенностей нейронных сетей, обслуживающих функционирование семантических сетей языка и математических понятий. В связи с этим осуществляются также исследования прямых вычислений (exact calculation) — процессов осуществления таких математических операций, как сложение, вычитание, умножение, деление, которые в той или иной степени признаются связанными с чувством числа.

Далее в статье представлен обзор наиболее важных результатов исследований нейрофизиологических механизмов символической репрезентации количества. Сначала рассматриваются различные методы нейровизуализации, с помощью которых исследуются ее механизмы. Затем осуществляется обзор результатов исследования психофизиологических механизмов чувства числа, проведенного с помощью различных методов, с учетом их преимуществ и недостатков. Анализируется современное состояние данной исследовательской области, уже выявленные экспериментальные факты, а также противоречия.

### **Методы нейровизуализации в исследованиях чувства числа**

В психофизиологических исследованиях чувства числа используется целый ряд современных методов нейровизуализации: электроэнцефалография (ЭЭГ), регистрация связанных с событиями потенциалов (ССП), магнитоэнцефалография (МЭГ), метод функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) и морфометрии, позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), функциональная оптическая томография (спектроскопия) в ближней инфракрасной области (ФИК-спектроскопия). Широкий набор методов связан с определенными преимуществами и ограничениями конкретных методов исследования, поэтому при анализе результатов исследований необходимо учитывать эти особенности используемых методов.

В *таблице* приведена сравнительная характеристика использования различных нейрофизиологических методов.

При анализе психофизиологических механизмов чувства числа чаще всего исследуются топография и структурная организация осуществления процессов чувства числа, при этом используются методы функциональной магнитно-резонансной томографии и связанных с событиями потенциалов. Об этом свидетельствует библиометрический анализ исследований мозговых механизмов чувства числа, проведенный с помощью программы Vosviewer (*рис. 1*).

Томографические методы (фМРТ, ФИК-спектроскопия) благодаря лучшему пространственному разрешению помогают выявить те области мозга, которые играют ключевую роль в осуществлении символического чувства числа. Метод

Таблица  
Сравнительная характеристика различных методов регистрации нейрофизиологических данных

Метод	Временное разрешение	Пространственное разрешение	Портативность	Глубина воздействия или локализация источников активности	Цена	Эксплуатация	Ограничения
ЭЭГ	Высокое (мс)	Невысокое	Да, при использовании специальных систем регистрации	Проблема обратной задачи восстановления источников	Приемлемая	Несложная	Необходимость экранирования
фМРТ	Невысокое (с)	Высокое (мм)	Нет	Изображения всего мозга	Высокая	Сложная	Недопустимо использовать лицам с металлическими имплантатами, коронарами, пейсмейкерами и т.д., при беременности и клаустрофобии
ПЭТ	Низкое (мин)	Высокое (мм)	Нет	Изображения всего мозга	Высокая	Сложная	Необходимость введения радиофармпрепарата
МЭГ	Высокое (мс)	Высокое (мм)	Нет	Хорошая локализация источников	Высокая	Сложная	Необходимость экранирования
ФИК-спектро-скопия	Высокое (мс)	Достаточно высокое	Да	Поверхность	Приемлемая	Достаточно несложная	Чувствительность к характеристикам волос и черепа



состоянии, что практически невозможно, учитывая возрастные особенности данной группы. Явным плюсом выступает и мобильность фИК-спектроскопии, что делает возможным сбор большого количества данных за небольшой срок за пределами лаборатории, в полевых условиях при выездных исследованиях в труднодоступных заселенных районах. Наконец, важным преимуществом этого метода является относительно невысокая цена аппарата и простота в обслуживании. Таким образом, в исследованиях мозговой топографии чувства числа на первый план выходят методы, обладающие хорошим пространственным разрешением (фМРТ, фИК-спектроскопия, ПЭТ).

Проблема поиска адекватного инструмента для измерения структуры процесса осуществления несимволического чувства числа является одной из важнейших на современном этапе исследований (Li, Zhou, & Lindskog, 2019). Важным методом исследований чувства числа, обеспечивающим хорошее временное разрешение, является ЭЭГ, которая позволяет анализировать быстрые процессы. Привязка сигнала ЭЭГ к различающимся во времени событиям, из которых складывается процесс определения численности (например, подготовка к восприятию стимула, ранние и поздние компоненты реакции на стимул), помогает различить вклад отдельных нейронных процессов, обеспечивающих реализацию чувства числа. Особое значение здесь приобретает метод ССП. Спонтанная ЭЭГ отражает тысячи одновременно осуществляющихся мозговых процессов, т. е. реакция мозга на один стимул или интересующее событие обычно не видна при записи ЭЭГ в одном повторении данного стимула, так как собственно реакция на стимул сочетается с фоновой активностью мозга, шумовыми электромагнитными помехами. Этот шум заслоняет интересующий сигнал, который представляет собой последовательность исследуемых ССП. Чтобы зафиксировать реакцию мозга на стимул, нужно осуществить много повторений и усреднить их результаты. ССП состоят из серии положительных и отрицательных пиков, которые принято называть компонентами. По сравнению с поведенческими измерениями (время реакции, количество правильных ответов) метод ССП позволяет решать задачи выявления структуры интересующего процесса, того, что происходит между стимулом и ответом, позволяя определить, на какие стадии воздействуют конкретные экспериментальные манипуляции. Компоненты ССП отражают различные составляющие процесса обработки символической репрезентации количества, возникающие в его разных временных точках.

Таким образом, томографические и электрофизиологические методы имеют свои преимущества и недостатки, что позволяет эффективно выбирать необходимый из них в зависимости от целей исследования.

## Развитие репрезентации числа в онтогенезе

Несимволическое чувство числа (Approximate Number System, ANS) — способность приблизительно оценивать количества, представленные в несимволическом (нечисловом) формате без подсчетов (Gebuis & Van Der Smagt, 2011). Чувство числа обеспечивается системой приблизительных вычислений (ANS), которая позволяет оценивать массивы, состоящие из четырех и более объектов, и системой слежения за объектами (Object Tracking System), которая позволяет оценивать количество объектов в том случае, когда их меньше четырех. Система слежения за объектами обеспечивает оценку количества объектов за счет ее восстановления из визуальных (перцептивных) признаков, или параметров, таких как занимаемая объектами площадь поверхности, расстояние между ними и т. д. Одни исследователи считают, что система приблизительных вычислений обеспечивается механизмами непосредственной оценки количества, однако другие предполагают, что здесь так же, как и в системе слежения за объектами, играет важную роль оценка визуальных параметров. «Примирающей» их точкой зрения является идея об одновременной работе данных механизмов, но в разных условиях восприятия объектов (Кузьмина, 2020).

Топографические исследования, основанные на методике картирования мозга, связывают несимволическое чувство числа с активацией теменных долей и, в частности, внутритеменной борозды (Dehaene, Molko, Cohen, & Wilson, 2004; Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003; Pinel, Piazza, Le Bihan, & Dehaene, 2004). Использование различных методов нейровизуализации позволяет исследователям прийти к консенсусу о роли теменной коры в реализации чувства числа, что подтверждается результатами метаанализов (например, Hawes, Sokolowski, Ononye, & Ansari, 2019). Как и любой другой психический процесс, реализация чувства числа имеет свою структуру, включающую отдельные подпроцессы, связанные с этапами восприятия определенных числовых паттернов, удержания внимания на них, принятия решения о численности представленных объектов. Все эти процессы распределены во времени, поэтому основным требованием к инструменту для измерения чувства числа выступает хорошая временная чувствительность, или разрешение. Таким инструментом является оценка изменений компонентов ССП. Исследователи связывают процессы обработки количества с компонентами N1, P2, P3 (P300), регистрируемыми преимущественно в затылочно-теменных областях. Буквы N или P обозначают полярность (отрицательную или положительную соответственно) пиков, за которой следует число, указывающее либо задержку в миллисекундах, либо порядковое положение компонента в осциллограмме. Например, отрицательный пик, который является первым существенным пиком и возникает приблизительно через 100 мс после предъявления стимула, обозначают N100 (указывая, что его задержка составляет 100 мс после стимула и что он является отрицательным) или N1 (указывая на то, что это первый отрицательный пик). За ним часто следует положительный пик, обычно называемый P200 или P2.

Таким образом, компоненты отражают различные стадии процесса обработки количества, о чем свидетельствуют их числовые индикаторы. Данные компоненты используются при поиске ответа на вопрос о том, является ли чувство числа самостоятельным процессом или оценка количества не может быть независимой и опирается на какие-либо визуальные параметры. Обсуждая этот вопрос, важно учесть то, что оба этих процесса могут осуществляться в разные отрезки времени. Предполагается, что пик N1 связан с числовым форматом, размером стимула, а также распределением и поддержанием пространственного внимания (Hillyard & Anllo-Vento, 1998; Hyde & Spelke, 2012). Предположительно, изменение N1 может дополнительно повлиять на компоненты P2 и P2p (Libertus, Woldorff, & Brannon, 2007). P2p — положительный компонент, пик которого приходится на 200–300 мс после появления стимула. Считается, что P2p в теменно-затылочной доле и внутри-теменной борозде (IPS) связан с числовым представлением, оценкой и сравнением (Dehaene, 1996; Pinel, Dehaene, Rivière, & LeBihan, 2001).

Важно отметить, что улучшение показателей системы приближительных вычислений происходит до старшего школьного возраста, стабилизация ее показателей наблюдается в возрасте примерно 30 лет (Halberda, Ly, Wilmer, Naiman, & Germine, 2012). Экспериментально доказано, что уже шестимесячные младенцы могут определять два массива точек как состоящие из разного количества объектов (Xu & Spelke, 2000). К полуторагодовалому возрасту у детей формируются понятие порядка числа: ребенок может выбрать из двух массивов точек больший по количеству, т. е. упорядочить массивы от меньшего к большему (Brannon, 2002). Уже в трехлетнем возрасте дети приобретают способность точно оценивать количество (то, что описывается термином *количественные числительные*). Таким образом, на данном этапе онтогенеза появляется способность соотносить количества, выраженные в несимволическом формате, с символическими числами (например, арабскими).

В начальной школе дети осваивают числа, которые соотносятся с репрезентациями числа в несимволическом формате, появляются первые навыки устного счета, постепенно начинает развиваться система *точных вычислений* (*exact calculations*) — способность производить вычисления с числами, выраженными в символической форме, такие как сложение, вычитание, умножение и деление.

Вопрос о том, как дети начинают оперировать числовыми символами, остается предметом различных исследований, многие из них сосредоточены на роли приближительного несимволического представления числа в этом процессе (Piazza et al., 2010). По мере взросления продолжает увеличиваться роль символических репрезентаций количества. В исследовании Т. Gebuis, I. K. Herfs, J. L. Kenemans, E. H. De Naan и M. J. Van der Smagt (2009) изучалось развитие автоматической обработки чисел в символической форме у детей второго (6 лет) и четвертого (8 лет) класса, а также взрослых. Использовалась задача эффекта конгруэнтности размера: на экране одновременно предъявлялись либо два числа, либо два массива точек, обозначающих разное количество. При этом изменялся физический размер стимулов: размер шрифта цифр и размер точек. Создавались конгруэнтные условия

предъявления, когда большая по величине цифра была написана большим шрифтом или точки из большего по численности массива имели больший размер, либо неконгруэнтные условия, когда меньшая по величине цифра была написана большим шрифтом или точки из меньшего по численности массива имели больший размер. Таким образом создавался конфликт физического размера и размера величины. Необходимо было реагировать на физический размер стимула. Главным итогом исследования является то, что эффект конгруэнтности размера в символическом задании наблюдался уже у второклассников. Кроме того, с возрастом эффект конгруэнтности становился более выраженным в символическом задании и уменьшался в несимволическом. Данные результаты были обнаружены как при определении времени реакции, так и при анализе латентности компонентов ССП — Р300 и LRP (Late Readiness Potential, LRP). Можно заключить, что с возрастом репрезентация в мозге процессов, связанных с обработкой символических величин, увеличивается, что может быть связано с обучением.

### **Соотношение несимволического чувства числа и символической репрезентации количества: модель тройного кода**

Одним из ключевых в понимании механизмов символической репрезентации количества является вопрос о ее соотношении с несимволическим чувством числа. В соответствии с некоторыми современными представлениями числовое познание (numerical cognition) существует в разных формах. Наиболее распространенная и влиятельная модель тройного кода (Triple Code Model) числового познания предполагает наличие следующих репрезентативных кодов для числа: аналоговые несимволические представления величины (в частности, способность оценить количество объектов без счета), вербально-фонологические репрезентации величины (слова, обозначающие арабские числа, обеспечение устного счета), зрительные репрезентации арабских чисел. При этом каждая из репрезентаций обеспечивается функционально различными мозговыми субстратами. Модель тройного кода представлена на *рис. 2*.

Модель тройного кода была сформирована на основе ряда исследований, предоставивших аргументы в пользу наличия отдельных числовых репрезентаций и их представленности в мозге. Функциональная организация мозговых доменов, участвующих в обеспечении числовых репрезентаций, в соответствии с моделью числового кода, представлена на *рис. 3*. Числовая репрезентация величины активирует нижние теменные области обоих полушарий, в то время как задания с цифровыми кодами (арабские числа) активируют веретенообразные извилины обоих полушарий, а семантические обозначения числа, представленные вербальной информацией, вызывают активность в левых перисильвиевых областях и левой угловой извилине.

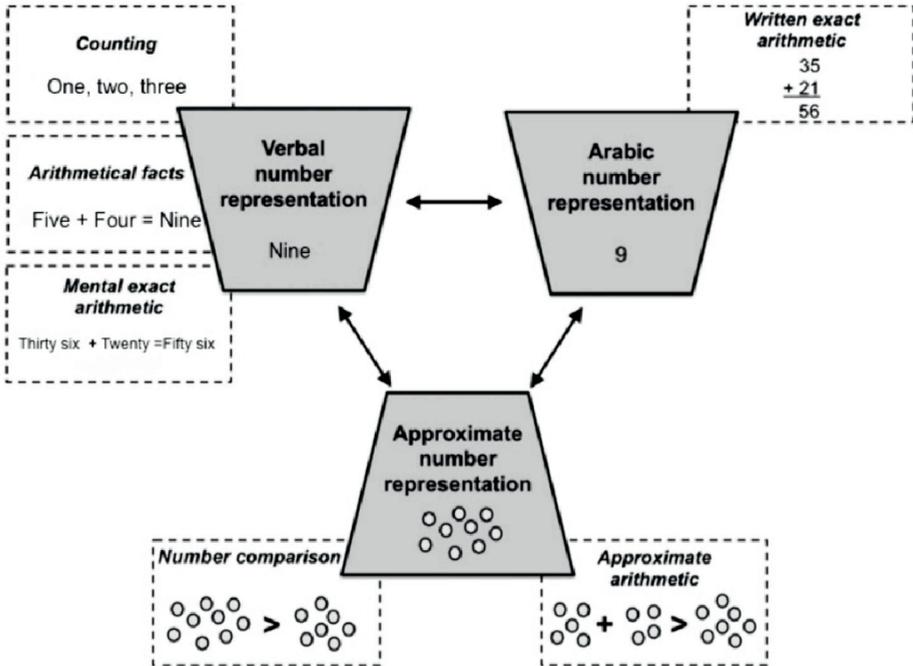


Рис. 2. Модель тройного кода:

аналоговая репрезентация величины, вербально-фонологическая репрезентация числа (слово «девять»), зрительная репрезентация арабских чисел (символ «9»).

Источники: Julie, Alain, & Jacqueline, 2013

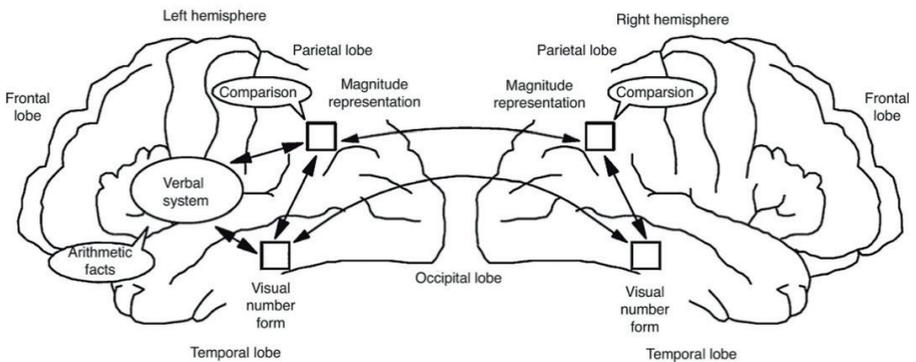


Рис. 3. Репрезентация в мозге модели тройного кода:

локализация основных областей, которые задействованы в трех числовых кодах, представлена на латеральной проекции левого и правого полушарий; стрелки указывают на функциональную передачу информации с помощью числовых кодов и не предназначены для реалистичного изображения существующих проводящих путей нервных волокон, организация которых у людей до конца не изучена.

Источники: Dehaene & Cohen, 1995

Однако стоит отметить, что в большинстве исследований рассматривались только конкретные репрезентации, но не все одновременно. Исследование, представленное в 2018 г. М. Skagenholt, U. Träff, D. Västfjäll и K. Skagerlund, выделяется тем, что в нем изучались одновременно все три формы репрезентаций с помощью фМРТ. В исследовании использовались три задачи, связанные с каждым из вышеупомянутых числовых кодов, с целью выявления нейронных коррелятов обработки числа в выборке взрослых ( $N = 46$ ). Анализ контраста «задача — контрольное условие» выявил зависящую от задачи активность, что можно рассматривать как частичную поддержку модели тройного кода, но одновременно обнаружил сложную распределенную лобно-теменную сеть, задействованную во всех числовых кодах. Результаты показывают, что модель тройного кода правильно предсказывает существование некоторых функционально диссоциированных нейронных субстратов, но требует обновления, учитывающего взаимодействие с процессами внимания. Контрасты, соответствующие различиям в сложности задач, выявили специфические нейронные корреляты эффекта числовой дистанции, связанные с тем, что близко расположенные друг к другу числа труднее различить, чем числа, расположенные дальше друг от друга. Анализ связи продемонстрировал перекрывающиеся нейронные корреляты во всех задачах, подтверждая представления о лобно-теменной сети обработки чисел. Таким образом, авторы предлагают аргументы в пользу пересмотра модели тройного кода.

## Мэппинг

Цель электрофизиологических исследований составляет поиск ответа на вопрос, является ли несимволическое чувство числа основой для осуществления символического чувства числа. Модель, в соответствии с которой символическая обработка количества накладывается на приблизительную оценку количества с помощью несимволических представлений, называется *мэппингом* (в англоязычной литературе — *mapping*). Суть этой модели заключается в том, что взрослые интуитивно переносят символические числа на соответствующие несимволические представления перед дальнейшей обработкой (Dehaene, 1997). Пример задачи в парадигме мэппинга представлен на *рис. 4*.

## Эффект числовой дистанции

Модель мэппинга опирается на поиск общих закономерностей эффекта числовой дистанции и размера для несимволического и символического чувства числа. Эффект числовой дистанции заключается в том, что при увеличении расстояния между объектами они лучше различаются, эффект размера заключается в том, что при равном расстоянии между числами лучше различаются числа меньшего

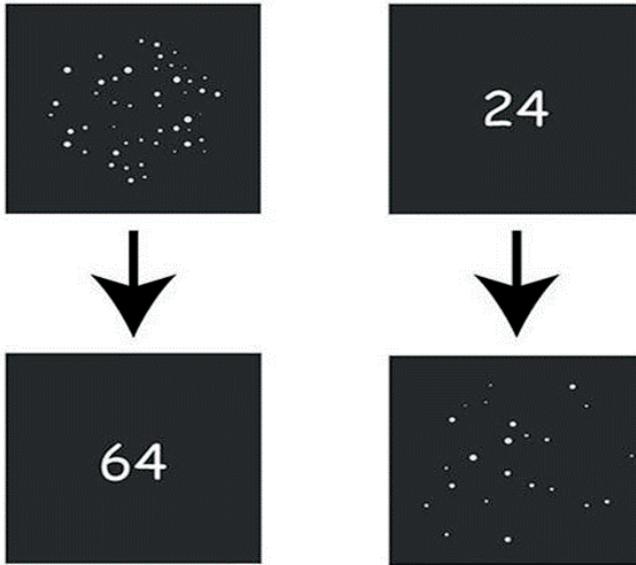


Рис. 4. Пример задачи в парадигме мэппинга:

стимулы, представляющие величину, даны в последовательном формате; на пробе слева сначала предъявляется несимволическая величина (массив точек), затем — символическая (арабское число), на пробе справа сначала предъявляется число, затем — массив точек; необходимо сравнить предъявляемые величины путем ответа на вопрос, какая из их больше.

Источник: Van Hoogmoed & Kroesbergen, 2018

размера (например, 3 и 4 сопоставить легче, чем 7 и 8). На электрофизиологическом уровне эффект числовой дистанции связывают с компонентами N1, P2 (Dehaene, 1996; Libertus et al., 2007; Temple & Posner, 1998). Как использование эффекта числовой дистанции, возникающего в задачах мэппинга, помогает пониманию того, является ли несимволическое чувство числа основой для символического? Если предположение о существовании несимволического базиса верно, то эффекты дистанции в задачах с символическими величинами будут аналогичны тем, что появляются в задачах с несимволическими величинами. Кроме того, если несимволическое чувство числа является основой процессов обработки величин, выраженных в любой форме, можно ожидать схожие паттерны ССП для обработки символических и несимволических величин. И напротив, возникающие различия являются аргументом против модели мэппинга и свидетельствуют о том, что приблизительное чувство числа не является основой для обработки всех символических количественных величин.

Модель мэппинга поддерживается поведенческими данными некоторых экспериментов, в ходе которых показано, что эффекты числовой дистанции и размера, продемонстрированные в задачах на несимволическое чувство числа, сохраняются также в задачах на символическое чувство числа (Dehaene, Dupoux, & Mehler, 1990;

Holloway & Ansari, 2008; Sasanguie, De Smedt, Defever, & Reynvoet, 2012; Sasanguie, Göbel, Moll, Smets, & Reynvoet, 2013; Verguts & van Opstal, 2005). Часть исследований ССП позволяют заключить, что временная динамика эффектов дистанции и размера в задачах на символическое сравнение сходна с возникающей при несимволической обработке (Dehaene, 1996; Libertus et al., 2007; Temple & Posner, 1998). Таким образом, результаты исследований ССП трактуются как аргумент в пользу того, что обработка количества, выраженного в символической форме, основана на несимволическом чувстве числа. Вместе с тем некоторыми исследователями ставится вопрос о природе возникновения данных эффектов и о том, связаны ли они непосредственно с обработкой информации о количестве либо с другими процессами. Исследования показали, что эффект дистанции может проявляться не только при сравнении числовых величин (Hoogmoed & Kroesbergen, 2018; Opstal, Gevers, De Moor, & Verguts, 2008). Так, в исследовании А. Н. Hoogmoed и Е. Н. Kroesbergen (2018) с помощью кластерного пермутационного анализа ССП был обнаружен эффект дистанции, но не числовой, а для поверхностной площади предъявляемых массивов точек, что интерпретируется авторами как аргумент в пользу наличия системы оценки количества с опорой на визуальные параметры (поверхностная площадь точек является одним из таких параметров). В исследовании F. van Opstal и др. (2008) использовались задачи, включающие в качестве стимулов буквы и цифры. Участникам предлагалось определить, является ли предъявляемая цифра в диапазоне от 1 до 9 меньше или больше 5, а также идет ли предъявляемая от J до R буква до или после буквы N в английском алфавите. При этом эффект дистанции обнаружен как для букв, так и для цифр, хотя предполагается, что буквы не имеют перекрывающихся нейронных представлений с соседними буквами. Данный эффект получил название *эффекта сравнения величины* (Comparison Distance Effect). Таким образом, он может быть связан не только с процессами определения количества, но и с другими, более общими (например, принятием решений).

Также F. van Opstal и др. (2008) проанализировали данные на основе сравнения расстояния между предыдущей цифрой или буквой (прайминг) и текущим числом или буквой (цель). Они показали, что время реакции было меньше в случае, когда цифра в предыдущей пробе была близка к цифре, представленной в текущей пробе (4 предшествует 3), чем когда предыдущая цифра была дальше от текущей цифры (4 предшествует 1). Предполагается, что более быстрая реакция обусловлена тем фактом, что величина уже была частично активирована и таким образом подготовлена во время обработки предыдущей цифры. Подобный эффект получил название *эффекта подготовленной дистанции* (Priming Distance Effect). Данный эффект специфичен для цифр и не распространяется на буквы.

В следующем исследовании F. van Opstal и T. Verguts (2011) определили, что эффект подготовленной дистанции обнаруживается в задаче сопоставления с образцом, использующей числовые стимулы в другой форме. Участникам последовательно были представлены два числовых значения (число и слово, обозначающее число), требовалось ответить, означают ли эти стимулы одинаковую или разную величину.

При предъявлении стимулов, которые отличались друг от друга, манипулировали расстоянием между праймингом (число, которое представлено первым) и целью (число, которое представлено вторым). Время реакции на цели было меньше, когда числа находились дальше друг от друга (например, 2 и 8), чем когда числа были близки друг к другу (например, 7 и 8), что было интерпретировано как эффект большей коактивации из-за перекрывающихся нейронных представлений чисел в последнем случае. Но не было определено, связаны ли эффекты расстояния для чисел в символической форме с эффектами расстояния, найденными для несимволических стимулов.

Кроме того, часть исследователей отмечает низкую корреляцию между эффектами дистанции в символических и несимволических задачах. Это ставит под сомнение то, решаются ли обе задачи на основе обработки одинакового типа (Holloway & Ansari, 2009). В исследовании А. Н. van Hoogmoed и Е. Х. Kroesbergen (2018) было обнаружено, что ССП имеют различающиеся паттерны, полученные с помощью пермутационной кластеризации, которые были связаны с эффектами дистанции в задачах на несимволическое чувство числа (сравнение массивов точек) и задачах мэппинга (сравнение чисел и массивов точек). Недавние исследования показывают, что хотя модель приблизительного чувства числа может относительно хорошо описывать поведенческие результаты в задачах с несимволическими количествами, но при описании поведенческих результатов в задачах символического сравнения возникают трудности, которые снова указывают на то, что числа в символической форме не обрабатываются с помощью приблизительного чувства числа (Krajcsi, Lengyel, & Kojouharova, 2018). Можно отметить, что исследований, рассматривающих эффекты дистанции для символического чувства числа, немного. В работе R. Merkley, A. Shimi и G. Scerif (2016) использовалась парадигма искусственных символов с целью исследования влияния информации о величине и порядке на символическое чувство числа. Участники были распределены по двум группам, первая группа обучалась ассоциировать абстрактные символы (аналоги арабских чисел) с несимволическими числовыми величинами (массивы точек), вторая группа учила порядковую последовательность абстрактных символов. Таким образом, обработка новых символических величин в группах строилась либо на сопоставлении с несимволическими, либо на основе понимания качества порядка. Первая группа участников в представлениях о символических величинах основывалась на приблизительном несимволическом чувстве числа, в то время как вторая группа изучала символические величины «сами по себе». После обучения участникам предлагалось выполнить задачу сравнения величины массивов точек с недавно выученными символами, при этом варьировались числовые дистанции между точками и абстрактными символами (от близкой до дальней). Одновременно регистрировались ССП (N1 и P2p). В результате обнаружено, что эффект числовой дистанции, выраженный в ССП, проявлялся в обеих группах и не различался между ними. Таким образом, было показано, что обработка выученных символов-аналогов чисел связана с теми же электрофизиологическими маркерами, что и реальные

числа, а также то, что электрофизиологические ответы не связаны с тем, каким образом были сформированы символические представления участников — на основе величины или на основе порядковой информации. Не удалось обнаружить предполагаемые различия в эффектах дистанции. Возможно, это связано с тем, что взрослые участники эксперимента при решении задач все равно соотносили свои представления со знанием реальных числовых величин и проецировали вновь выученные абстрактные символы величин на ментальную числовую линию (мысленная линия, на которую с помощью приблизительного чувства числа нанесены репрезентации величин) вне зависимости от типа обучения.

Таким образом, доминирующие числовые модели познания предполагают наличие аналоговой системы, которая участвует в манипуляциях как с несимволическими величинами, так и с теми, которые выражены в формате символов. Она функционирует в соответствии с законом Вебера, при этом фракция Вебера может интерпретироваться как минимальная разница между объектами, которая может быть воспринята (Кузьмина, 2018). С ней связан эффект числовой дистанции. Как отмечают А. Krajcsi с коллегами (2018), только несимволическое сравнение поддерживается ANS, а сравнение символьных чисел обрабатывается другими представлениями.

В то же время в части исследований показано, что эффект числовой дистанции проявляется также при сравнении символических числовых величин. В поддержку этого выступает тот факт, что у детей с дискалькулией (нарушением арифметических навыков) нарушается эффект числовой дистанции. Это связано с мозговым базисом данного эффекта: только у нормотипичных детей (у которых отсутствует дискалькулия) эффект числовой дистанции проявляется с опорой на внутритемную борозду обоих полушарий (Mussolin, Mejias, & Noël, 2010).

### **Критика модели тройного кода**

Модель тройного кода относится к домен-специфическим, т. е. приписывающим функциональные домены числовых репрезентаций отдельным областям в мозге. Хотя эта модель предполагает, что обработка чисел требует тесного взаимодействия теменной области, связанной с конкретным доменом, с общедоменными префронтальными процессами, с участием управляющего контроля, роль префронтальных областей и участие управляющих функций в этой модели четко не определены (Moeller, Willmes, & Klein, 2015). Нейровизуализационные исследования, которые проводились в последнее время, представили доказательства участия лобных областей в решении арифметических задач, что подтверждается метааналитическим исследованием (Arsalidou & Taylor, 2011). Например, лобные области мозга, вероятно, будут задействованы в формулировании целей и следовании им (верхние лобные области) и в ориентировке в движениях глаз (требуется в задачах на оценку количества величин, задействующих прецентральную извилину) (Arsalidou &

Taylor, 2011). Кроме того, теменные области мозга не являются специфичными только для обработки количества, но оказываются вовлеченными в осуществление других процессов. Так, в метаанализе Z. Hawes и др. (2019) обобщены результаты 83 работ по нейровизуализации. Было определено, что три когнитивных процесса (числа в символическом формате, арифметические вычисления и мысленное вращение) активировали теменные области обоих полушарий внутри и вокруг внутритеменной борозды. Обработка числовых стимулов и арифметических вычислений была связана с активацией в левой внутритеменной борозде, в то время как мысленное вращение и арифметические вычисления имели общую активацию в средних лобных извилинах. Выделенные паттерны активации имеют большую специализацию для обработки символической числовой репрезентации и мысленных манипуляций соответственно. Также были выявлены области, обеспечивающие специфический вклад лобно-теменных структур в арифметические вычисления и правой верхней теменной долики — в мысленное вращение. Таким образом, данные результаты можно рассматривать как аргумент в пользу того, что домен-специфические модели не могут в полной мере объяснить, как мозгом обрабатываются числовые репрезентации.

Также в исследованиях было установлено, что оценка величины происходит в теменных областях неспецифично, вне зависимости от стимульного формата. Это верно и для символических репрезентаций. В исследовании V. Venkatraman, D. Ansari и M. V.L. Chee (2005) участникам предлагались простые задачи на сложение с использованием как символических (арабские цифры), так и несимволических (массивы точек) стимулов. Анализ выявил общие нейронные субстраты для символического и несимволического сложения в передней внутритеменной борозде обоих полушарий, левой задней внутритеменной борозде, медиальной лобной извилине и левой прецентральной извилине. Правая теменная и лобная области коры продемонстрировали большую активацию в условиях несимволического сложения. Результаты исследования показывают, что операции сложения обрабатывается во внутритеменной борозде независимо от формата стимула. Не было обнаружено различий между точным и приближительным сложением с использованием символических и несимволических стимулов.

Наконец, еще одним аргументом в поддержку того, что обработка числовых репрезентаций является неспецифическим процессом, становится новая парадигма исследований в рамках сетевого подхода, позволяющая не просто выделить ряд отделов мозга, задействованных в числовом познании, а выявить сеть структур, одновременно выполняющих ту или иную числовую функцию. Не так давно сложная анатомо-функциональная система, лежащая в основе числового познания, стала доступной для оценки в живом мозге. К. Moeller с коллегами (2015) проанализировали 27 исследований, изучающих роль мозга в числовом познании. Несмотря на значительную неоднородность методологических подходов, исследованных популяций и применяемых процедур оценки, результаты предоставили доказательства наличия связности (коннективности) мозга, вовлеченной в чи-

словое познание. Анализ как функциональной/эффективной, так и структурной связности подтвердил предположение, что численное познание обеспечивается лобно-теменной сетью, включающей внутритеменные, а также префронтальные участки коры. Оценка структурной связности показала вовлечение лобно-теменных ассоциативных волокон, охватывающих верхний продольный пучок в дорсальной плоскости и систему наружной капсулы / крайней капсулы в вентральной области. Комиссуральные волокна, по-видимому, соединяют двусторонние внутритеменные борозды при обработке информации о числовой величине. Идентификация проекционных волокон, таких как верхняя часть лучистого венца, указывает на связь между корой, базальными ганглиями и таламусом в числовом познании. Исследования функциональной / эффективной связности также указывают на особую роль гиппокампа в числовом познании. Таким образом, анализ связей в мозге, включенных в обработку числовых репрезентаций, позволяет выяснить, как различные числовые домены могут работать согласованно. В целом обзоры недавних исследований подтверждают вовлеченность сразу многих структур в осуществление числовых репрезентаций. Как отмечают E. D. Wilkey и D. Ansari (2020), нейронный субстрат чувства числа более широко распределен в мозге, чем принято утверждать. Таким образом, в последние годы наблюдается отход от модели тройного кода и обращение к пересмотренным домен-неспецифическим моделям.

Подводя итог исследованиям структурной и топографической организации несимволического и символического чувства числа, можно заключить, что в настоящее время на нейрофизиологическом уровне подтверждено наличие различных эффектов, обнаруженных ранее в поведенческих показателях (эффект числовой дистанции, эффект конгруэнтности). Также не достигнуто согласие в вопросе о том, лежит ли в основе символического чувства числа несимволическое, являются ли эти процессы напрямую связанными. Часть исследователей обнаруживают схожие электрофизиологические паттерны в механизмах осуществления несимволического и символического чувства числа, в частности, эффектах числовой дистанции (Dehaene, 1996; Libertus et al., 2007; Temple & Posner, 1998), в то время как другие сообщают о различиях (Holloway & Ansari, 2009; Hoogmoed & Kroesbergen, 2018; Krajcsi et al., 2018; Merkley et al., 2016).

### **Развитие символической репрезентации в мозге: переход от правых областей мозга к левому полушарию**

Многие исследования сконцентрированы на вопросе о том, сходны или различны мозговые механизмы для двух систем обработки символического и несимволического чувства числа. Были выдвинуты две основные теории, объясняющие взаимосвязь между несимволическим чувством числа и точными вычислительными навыками в процессе развития. S. Dehaene (1997) и K. Wynn (1992) утверждают, что несимволическое чувство числа может способствовать приобретению

способностей к символическим числам. С. R. Gallistel и R. Gelman (1992) выдвигают несколько иную гипотезу, что несимволическая система оценки величин включает в себя основные принципы вычислений. Другая точка зрения, предложенная S. Carey (2001, 2004, 2009), постулирует относительную независимость между изучением вербальных числительных и несимволическим чувством числа. С. Mussolin и коллеги (2016) утверждают, что ребенок устанавливает значение «два» из взаимодействия между приобретенными естественными языковыми квантификаторами (слова, описывающие количество) и зрительным объектом. В то же время значения больших чисел, таких как «пять», опираются на уже полученное знание, т. е. «пять» означает «на один больше, чем четыре, что на один больше, чем три». Осуществляется это путем интеграции представлений-квантификаторов естественного языка с помощью внешнего последовательного упорядоченного списка так называемых «счетчиков». Аргументы в пользу относительной независимости несимволического чувства числа и символических репрезентаций количества приводят J. Negen и B. W. Sarnecka (2015). Они утверждают то, что корреляция точности приблизительной оценки количества у детей со знанием символических числительных не является достоверной, так как ее обнаружение связано с самой процедурой измерения. Например, в некоторых экспериментах детям дается возможность правильно оценить количество, основываясь на размере (а не количестве) представленных точек; в то же время маленькие дети с небольшим запасом числительных могут неправильно интерпретировать значение фразы «больше точек». При коррекции задания, дающей возможность опираться на количество, корреляция между точностью приблизительной оценки количества и знанием чисел у детей редуцируется. Так или иначе, точка зрения об относительной независимости несимволических и символических числовых репрезентаций имеет под собой определенные предпосылки. Они связаны с тем, что несимволическое чувство числа может опираться на анализ невербальных зрительно-пространственных характеристик, а символическое — вовлекать области, связанные с обработкой символов (знаков). Если зрительно-пространственные характеристики связаны с функционированием теменных областей, то обработка символов может затрагивать области, отвечающие за обработку вербальной информации, в том числе височные и лобные отделы коры. В связи с этим актуальным становится вопрос, является ли мозговой базис для символического и несимволического чувства числа одинаковым или различающимся.

Ряд исследователей обнаруживают доказательства наличия особых вербальных механизмов, участвующих в обработке символических величин, в ходе поиска их мозгового субстрата. В раннем исследовании L. Zago и коллег (2001) с применением ПЭТ изучались области мозговой активации, соответствующие различным типам символической числовой обработки: простому чтению чисел, воспроизведению простых операций (умножение цифр), вычислению (умножение двузначных чисел). Таким образом, в условии воспроизведения тестировались преимущественно процессы припоминания, тогда как при вычислениях включались процессы числовой

обработки, связанные с оперированием двузначными числами в рабочей памяти. Обнаружено, что припоминание по сравнению с чтением активирует правую теменно-премоторную сеть, а также сеть называния — левую переднюю инсулу и правый мозжечок. Решение задачи по умножению двузначных чисел активирует левую лобно-теменную сеть и актуализирует мысленное визуальное представление посредством включения билатеральных нижних височных извилин. То есть оперирование математическими величинами в символической форме затрагивает области левого полушария, связанные также с процессами языковой обработки.

S. Bugden, M. G. Woldorff, E. M. Brannon (2019) в своем исследовании задаются вопросом о том, является ли несимволическое чувство числа предиктором символического. Для ответа на этот вопрос авторы пытаются выявить общую нейронную сеть для символического и несимволического чувства числа. В результате они обнаруживают общую сеть, включающую билатеральную внутритеменную борозду, правую верхнюю теменную долю, билатеральную нижнюю височную извилину, которая относится к структурам, задействованным в обработке языковых репрезентаций. Таким образом, делается вывод об общности двух числовых систем.

В исследовании H. Zhang, C. Chen, X. Zhou (2012) изучалось, осуществляется ли обработка математических терминов и обработка числовых репрезентаций одними и теми же областями мозга. Участникам исследования предлагалось оценить семантическое расстояние на пяти типах материалов, включая геометрические, алгебраические, лингвистические термины, слова для обозначения инструментов и других общих предметов, а также арабские числа. Активация мозга измерялась с помощью фМРТ. Результаты показали, что задания с геометрическими терминами сопровождалось увеличением активации в горизонтальной внутритеменной борозде (по сравнению с задачами, включающими алгебраические термины, лингвистические термины и инструментальные слова). В то же время выполнение задания с алгебраическими терминами не продемонстрировало большей активации в этой области, чем выполнение заданий с лингвистическими терминами и служебными словами. Оперирование арабскими числами показало большую активацию, чем манипулирование нечисловыми словами, во внутритеменной борозде обоих полушарий, правой нижней лобной извилине и средней лобной извилине обоих полушарий. В свою очередь, обработка нечислового материала сопровождалась увеличением активации в левой нижней лобной извилине и левой средней теменной извилине. Эти результаты позволяют предположить, что область мозга, отвечающая за обработку чисел (левая внутритеменная борозда), по-видимому, участвует в семантической обработке только геометрических терминов и не участвует в обработке остальных математических терминов (включая алгебраические термины). И алгебраические, и геометрические термины обрабатываются сходным образом с базовыми семантическими понятиями в левой височной и лобной областях.

При исследованиях связи вербальных представлений и числовых репрезентаций полезной оказывается культурная парадигма. Такие исследования позволяют, учитывая особенности языка и обозначений чисел, используемых в нем,

изучать его влияние на обработку числовых репрезентаций. Так, в исследовании V. Pitt, E. Gibson, S. T. Piantadosi (2022), проведенном в рамках популяции цимане в Боливии, было продемонстрировано, что способность к точным представлениям количества ограничивается диапазоном вербального счета участников; они пользовались только тем количеством слов, которые могли воспроизвести в связи с этой задачей. Вне этого диапазона они прибегали к числовой аппроксимации (приблизительной оценке количества). Таким образом, подтверждается роль языка в манипулировании точными числовыми величинами.

Обратимся к вопросу о том, являются ли нейронные сети, обслуживающие семантические системы языка и математические понятия, общими. В фМРТ-исследовании E. Eger, P. Sterzer, M. O. Russ, A. L. Giraud, A. Kleinschmidt (2003) изучалось, является ли обработка числовых символических репрезентаций специфической по отношению к обработке других символов (букв), а также несимволической информации (цвета). Участникам исследования предъявлялись три типа стимулов (числа, буквы и цвета) в зрительной либо слуховой модальностях. Обнаружено увеличение активации во внутритеменной борозде обоих полушарий при предъявлении чисел (по сравнению с предъявлением букв и цветов) как в зрительной, так и в слуховой модальности. Результаты позволили авторам сделать вывод, что на уровне мозгового функционирования существует специфическая независимая от модальности обработка числовых репрезентаций, которая может лежать в основе обработки числовых величин. Также вопрос о специфичности семантической математической системы затрагивается в исследовании M. Amalric и S. Dehaene (2018). фМРТ-исследование, выполненное с участием профессиональных математиков, показало, что в элементарное чувство числа вовлечены билатеральные внутритеменные и вентральные височные области. При этом даже простое припоминание математических и нематематических фактов (например, «Синус — периодическая функция» и «Лондонские автобусы красные») затрагивает разные области. На основе данных результатов авторы делают вывод о двух различных семантических системах (математической и нематематической), обслуживаемых соответствующими нейронными сетями. Также было обнаружено, что когда испытуемый упоминает число или термины, обозначающие количественные отношения («еще немного», «много» или «больше, чем другой»), регистрируется электрическая активность в области внутритеменной борозды (Hawes et al., 2019).

Роль семантических систем, связанных с обработкой математических понятий, увеличивается в онтогенезе. Как уже отмечалось выше, возрастная динамика мозговых механизмов чувства числа может изменяться в связи с перестройкой самой структуры чувства числа. Если на ранних этапах онтогенеза превалирует несимволическое чувство числа, то с развитием речевой функции у ребенка на первый план выходит символическое чувство числа. Поэтому с возрастом структуры, связанные с символической числовой обработкой, могут также выходить на передние позиции в осуществлении данной функции. Факты в пользу этого изменения демонстрируют фМРТ-исследования. Если в младенческом и дошкольном возрасте

обработка изменения во множествах объектов осуществляется под контролем правой теменной коры (Cantlon, Brannon, Carter, & Pelphrey, 2006; Izard et al., 2009; Park, Li, & Brannon, 2014), то во взрослом возрасте активность становится билатеральной (Ansari, Dhital, & Siong, 2006; Cantlon et al., 2006; Emerson & Cantlon, 2015; Piazza, Pinel, Le Bihan, & Dehaene, 2007) за счет развития символических репрезентаций числа и вовлечения левых вербальных областей. Исследования мозговой активации при выполнении арифметических вычислений при помощи фИК-спектроскопии у детей младшего и среднего школьного возраста (например, Dresler et al., 2009; Soltanlou et al., 2017) выявили двустороннюю активацию лобно-теменной сети (аналогичная активация наблюдалась в исследованиях фМРТ у взрослых и детей) (Arsalidou, Pawliw-Levac, Sadeghi, & Pascual-Leone, 2017; Arsalidou & Taylor, 2011). Т. Dresler и коллеги (2009) наблюдали увеличение активации в теменной и задней лобной областях в процессе вычислений в сравнении с чтением у детей младшего и среднего школьного возраста, что соответствует результатам фМРТ у детей (Ansari et al., 2006; Kucian et al., 2006; Rivera, Reiss, Eckert, & Menon 2005) и результатам фИК-спектроскопии у взрослых (Richter et al., 2009). Показано также, что одновременно с вовлечением левого полушария мозга в числовую обработку снижается активация гиппокампа у взрослых и подростков по сравнению с детьми 8–9 лет (Qin et al., 2014) и увеличивается активация левой супрамаргинальной извилины и угловой извилины путем вовлечения связанных с языком областей в извлечение математических фактов из долговременной памяти в возрасте от 8 до 14 лет (Ansari, 2008; Prado, Mutreja, & Booth, 2014). Важной мозговой структурой, ключевой для понимания процесса числовой обработки в мозге, является угловая извилина, которая считается специфически связанной с обработкой символических величин, в отличие от остальных структур теменных долей. Левая угловая извилина совместно с левой передней цингулярной корой и левой нижней лобной извилиной вовлечены в осуществление сложения благодаря вербальному кодированию (Dehaene, Spelke, Pinel, Stanescu, & Tsivkin, 1999). В ряде исследований также показано, что угловая извилина связана с функционированием символического чувства числа (Göbel, Walsh, & Rushworth, 2001; Grabner et al., 2007). Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что развитие в онтогенезе символических репрезентаций чувства числа осуществляется параллельно с функциональными изменениями в мозге: активация сдвигается в сторону областей левого (вербального) полушария, что обусловлено необходимостью оперировать символическими обозначениями чисел и отношений между ними.

Таким образом, на основе анализа исследований можно сделать вывод о различиях в мозговых механизмах обработки несимволического и символического чувства числа: первое затрагивает области преимущественно правого полушария, в частности, внутритеменной борозды, в то время как второе обнаруживает расширение сети обработки числовых репрезентаций на регионы левого полушария, близкие к зонам, вовлеченным в обработку языка (например, угловую извилину, лежащую на стыке с височными долями).

## Лобно-теменной сдвиг в созревании процессов символической репрезентации количества

Известно, что помимо генерализации мозговой активации во время осуществления символических числовых репрезентаций на оба полушария имеются и другие фокусы изменений. Так, в недавнем обзоре M. Soltanlou, M. A. Sitnikova, H. C. Nuerk и T. Dresler (2018) отмечается, что развитие психофизиологических механизмов осуществления вычислений происходит в соответствии с так называемым лобно-теменным сдвигом: если на ранних этапах онтогенеза большую роль в данном процессе играют лобные структуры, то по мере взросления они уступают свою функцию теменным областям. Этот сдвиг отражает переход от трудоемких процедурных к автоматическим стратегиям в возрасте от 8 до 19 лет (Rivera et al., 2005). Кроме того, усиление, связанное с задачей активации, в двусторонних лобных областях (прецентральная премоторная и моторная области) наблюдалось у детей младшего возраста в сравнении с детьми старшего возраста. Активация происходит из-за менее автоматизированной обработки вычислений и большей речевой активности. Лобно-теменной сдвиг при осуществлении вычислений обнаружен рядом исследователей (Artemenko, Soltanlou, Ehlis, Nuerk, & Dresler, 2018; Kaufmann et al., 2006; Kucian, von Aster, Loenneker, Dietrich, & Martin, 2008; Rivera et al., 2005). Используя функциональную магнитно-резонансную томографию, D. Ansari, N. Garcia, E. Lucas, K. Hamon и B. Dhital (2005) изучили различия в развитии функциональной нейроанатомии, лежащие в основе обработки чисел в символической форме. Авторы исследовали эффект числовой дистанции. Ранее данный эффект был описан для величин, выраженных в несимволическом числовом количестве.

Феномен приблизительной оценки количества теоретически подтверждается явлением, называемым *эффектом числовой дистанции (числовой пропорции)*, которое обнаруживается в задачах сравнения чисел. Данный эффект заключается в том, что точность сравнения количества объектов, представленных в несимволической форме, снижается при сравнении более близких по количеству объектов, т. е. с меньшей числовой дистанцией между сравниваемыми наборами или с большей числовой пропорцией между наборами. Например, люди ошибаются меньше, если сравнивают 10 и 20 объектов, чем 10 и 14 (Holloway & Ansari, 2009; Smets, Gebuis, & Reynvoet, 2013). В исследовании D. Ansari и коллег (2005) эффект числовой дистанции моделировался на величинах в числовом формате. 12 взрослых и 12 детей должны были определить относительную величину двух однозначных арабских цифр. Авторы исследовали, какие области мозга демонстрировали значимое увеличение активации при обработке числовых пар с меньшими расстояниями в паре по сравнению с парами с большими расстояниями. Во взрослой группе числовая дистанция модулировалась теменными областями обоих полушарий. Напротив, в группе детей преимущественно наблюдалась активация лобных отделов. Авторы сделали выводы о том, что функциональная вовлеченность мозговых областей,

лежащая в основе обработки символических числовых величин, претерпевает онтогенетический сдвиг в сторону большей теменной вовлеченности. Это изменение может отражать созревание лежащих в основе репрезентаций и повышения автоматизма в отображении связи между числовыми символами и величинами, которые они представляют.

Также проводились исследования того, проявляется ли сходная мозговая специализация во время оперирования числовыми репрезентациями разного типа у детей и взрослых. В исследовании К. Kucian и коллег (2008) изучалась специфика числовых репрезентаций у 9- и 12-летних детей. С помощью фМРТ активацию мозга регистрировали у учащихся третьего и шестого классов, а также взрослых. Одновременно предлагались задания, в которых надо было либо осуществить точное сложение и ввести ответ самостоятельно, либо вычислить приблизительную сумму и выбрать наиболее близкое к правильному ответу число из предложенных. В задании несимволического сравнения необходимо было сравнить два набора различных предметов и выбрать набор с большим количеством объектов. Было показано, что у детей активировались те же структуры, что и у взрослых. Дети продемонстрировали более слабую активацию внутритеменной борозды во время выполнения трех задач, в левой нижней лобной извилине во время точных вычислений и в затылочных областях при сравнении несимволических величин. В то же время активация в передней поясной извилине, области, связанной с усилением внимания и нагрузкой на рабочую память, у детей увеличивалась. Кроме того, у детей выявлено снижение или отсутствие деактивации областей, вовлеченных в так называемую сеть по умолчанию (*default mode network*) во время вычислений, что связано с обобщенным эффектом развития. При этом различий между приблизительными и точными вычислениями выявлено не было. Таким образом, делается вывод о переходе к более автоматизированным мысленным вычислениям, что находит отражение в улучшении выполнения заданий и усилении активации мозга в областях, связанных с числовой обработкой, и снижении активации во вспомогательных областях.

В лонгитюдном исследовании С. Artemenko и соавт. (2018) с применением метода ФИК-спектроскопии изучали процессы прямых вычислений (*exact calculation*). Авторы выявили снижение активации лобных областей в процессе вычитания у школьников с 6-го по 7-й класс, что объясняется меньшей трудоемкостью вычислений. В то же время сложение и умножение требовало повышенной активации угловой извилины и височных областей, что связывается с более автоматизированными вычислениями и припоминанием математических фактов. Авторы делают выводы о том, что мозговая сеть для арифметической обработки уже сформирована у 12–14-летних подростков, но все еще претерпевает изменения в процессе развития. Результаты соотносятся с данными о лобно-теменном сдвиге в осуществлении чувства числа, полученными в других исследованиях.

## Символические репрезентации количества и точные вычисления

Как уже отмечалось выше, процесс перехода от преимущественного использования несимволического чувства числа к символическим репрезентациям количества продолжается в ходе онтогенеза и включает в себя несколько этапов. В возрасте 18 месяцев появляется возможность оценивать порядок величин, выраженных в несимволической форме, т. е. возможность оценивать, какая из них является большей. Эта способность становится основой для формирования порядкового числительного, выраженного в символическом формате.

Символические числа имеют как количественные (символ — количество), так и порядковые (символ — символ) репрезентации. Несмотря на поведенческие данные, предполагающие различную обработку количественных и порядковых репрезентаций, в литературе по нейровизуализации отмечается недостаток консенсуса относительно того, имеют ли эти процессы общие или разные нейронные основы и как нейронные корреляты количественной и порядковой репрезентаций меняются с возрастом. В своем исследовании А. А. Matejko, J. E. Hutchison и D. Ansari (2019) изучали нейронные корреляты количественной (эффект расстояния) и порядковой (обратный эффект расстояния) обработки у 50 детей в возрасте 7–10 лет и 26 взрослых в возрасте 19–26 лет. Обнаружено, что взрослые задействовали преимущественно левосторонние лобно-теменные области для порядковой обработки, в то время как дети демонстрировали активацию в правой латеральной орбитальной и нижней лобной извилинах как для порядковой, так и для количественной обработки. Дополнительный анализ показал, что взрослые задействовали левую внутритеменную борозду больше, чем дети, для работы с порядковой репрезентацией, это предположительно связано с тем, что внутритеменная борозда может больше настраиваться на порядковые свойства символических величин по мере развития. Вместе с предыдущими данными, описывающими важность левой внутритеменной борозды для обработки количества, полученные результаты показывают, что количественная и порядковая обработка могут иметь общие нейронные субстраты в левой внутритеменной борозде и что эта область становится по мере развития все более специализированной для работы с количеством и порядковыми числительными.

После появления понятия порядкового числительного и способности точно оценивать количество, сопоставляя его с соответствующей цифрой, у детей возникает способность к вычислениям. Различными авторами исследуется вопрос нейронных механизмов непосредственных вычислений (*exact calculations*). Прежде всего, исследуются базовые механизмы осуществления основных арифметических операций: сложения, вычитания, умножения и деления. Современные исследования этих операций шагнули за рамки традиционных неинвазивных методов, что открывает перед учеными ряд преимуществ. Так, в недавней работе E. F. Kutter, J. Boström, C. E. Elger, A. Nieder и F. Mormann (2022) участникам, страдающим эпилепсией, имплантировали электроды в височные доли мозга и наблюдали за их активно-

стью во время сложения и вычитания. Арифметические операции проводились с арабскими цифрами от 0 до 5, а также массивами точек. При этом использовались знаки сложения или вычитания, либо слова, обозначающие данные операции. Как результат, исследователи выявили популяции нейронов в гиппокампе и парагиппокампальной коре, ответственные либо за сложение, либо за вычитание (при этом неважно, в какой форме предлагались эти операции — в виде знака или соответствующего слова). Таким образом, новые данные, полученные в ходе этого эксперимента, с одной стороны, являются еще одним аргументом против теории тройного кода. С другой стороны, они поддерживают ранее полученные данные о роли нейронов медиальной височной коры в кодировании чисел (Kutter, Bostroem, Elger, Mormann, & Nieder, 2018) и гиппокампа, парагиппокампальной извилины в формировании дискалькулии (нарушения способности к арифметическим вычислениям) и математических способностей (Rykhlevskaia, Uddin, Kondos, & Menon, 2009; Supekar et al., 2013).

Важным вопросом, возникающим тогда, когда речь идет об осуществлении непосредственных вычислений (exact calculations), является обработка в мозге вычислений различной сложности. Известно, что сложность двузначного сложения и вычитания определяется необходимостью осуществления операции заимствования (для вычитания) или перехода через десяток (для сложения). С. Artemenko и соавт. (2018) исследовали сложность вычислений и ее нейрофизиологические механизмы для респондентов с различными математическими способностями с помощью методов фИК-спектроскопии и ССП. У участников с высокими показателями математических способностей, в отличие от тех, кто их не продемонстрировал, отмечалось увеличение лобной активации, в частности, в левой нижней лобной извилине. Также участники с разными способностями различались в осуществлении заимствования, что отражалось в различиях в медленных волнах на 1000–1500 мс в лобных отведениях. Авторы делают заключение о том, что сложные вычисления по-разному осуществляются лицами с различными математическими способностями.

Обобщая результаты исследований, можно отметить, что здесь исследователи обнаруживают достаточное единство во мнении о том, что символическое чувство числа обеспечивается мозговой системой, включающей различные структуры. Символическое чувство числа связано с вовлечением областей, отвечающих за символическую обработку (в том числе левого полушария). При этом обнаруживается специфическая мозговая сеть для обработки символов и понятий математического языка.

## Выводы

1. На данный момент исследователями выдвигается несколько возможных объяснительных принципов числового познания. С одной стороны, предлагается модель тройного кода, постулирующая наличие доменов, специ-

фичных для обработки разных типов числовой информации (несимволической, собственно чисел и слов, их обозначающих) и отдельных мозговых субстратов, обслуживающих их. В связи с новыми данными, полученными в том числе в парадигме сетевого подхода, выдвигаются альтернативные объяснения. Они связаны с рядом домен-неспецифических теорий, объясняющих активацию числовых репрезентаций распределенными по мозгу сетями и осуществлением числовой обработки при непосредственном участии управляющих функций.

2. Механизмы числовых репрезентаций развиваются в онтогенезе по принципу «из правого полушария в левое», что связано с увеличением роли вербально-фонологического компонента вычислений.
3. Механизмы числовых репрезентаций в онтогенезе испытывают лобно-теменной сдвиг: по мере взросления человека вместо лобных областей мозга на первый план выходят теменные области, что говорит о переходе от процессов, связанных с привлечением усилий, к автоматизированным процессам.

### Заключение

Основываясь на результатах представленных исследований, можно заключить следующее. С помощью методов исследования структуры процессов реализации чувства числа (в частности, ССП) подтверждено наличие в поведенческих показателях числовых эффектов (эффект числовой дистанции, эффект конгруэнтности). При изучении топографии чувства числа исследователи сходятся во мнении о вкладе теменных структур в осуществление данного процесса (в частности, внутритеменной борозды, угловой извилины). Остается дискуссионным вопрос о том, является ли несимволическое чувство числа необходимой основой для формирования символического и о связях между ними. В литературе обсуждается модель тройного кода числового познания, которую можно отнести к домен-специфическим теориям, а также конкурирующие с ней теории «общего фактора», связанные с вовлечением в числовую обработку управляющих процессов. В онтогенезе отмечается увеличение вклада левого полушария, связанного с символической числовой обработкой. Также по мере взросления человека наблюдается лобно-теменной сдвиг числовых репрезентаций: если у детей отмечается большая активация лобных структур, что связано с применением направленного внимания, увеличением затрат рабочей памяти, то у взрослых числовые репрезентации «сдвигаются» в сторону теменных структур. Можно заключить, что при планировании дальнейших исследований не следует опираться только на данные изучения структурной организации чувства числа либо мозговой топографии этого процесса. Зачастую они приводят к противоречивым результатам. Наиболее оптимальным способом является комплексное применение тех и других данных в одном иссле-

довании, что становится возможным при совместном использовании методов, дающих взаимодополняющую информацию о временных и пространственных особенностях реализации чувства числа, — например, ЭЭГ и фМРТ, ЭЭГ и ФИК-спектроскопия.

### Благодарности

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 22-28-02030 «Нейрокогнитивные механизмы символических числовых навыков».

### Литература

- Кузьмина, Ю. В. (2018). Интуитивное чувство числа: проблемы измерения и контроль визуальных свойств. *Теоретическая и экспериментальная психология*, 11(1), 51–66.
- Кузьмина, Ю. В. (2020). *Когнитивные механизмы несимволической репрезентации количества* (диссертация на соискание ученой степени кандидата психологических наук). Москва.
- Amalric, M., & Dehaene, S. (2018). Cortical circuits for mathematical knowledge: evidence for a major subdivision within the brain's semantic networks. *Philosophical Transactions of the Royal Society. B: Biological Sciences*, 373(1740), 20160515. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0515>
- Ansari, D. (2008). Effects of development and enculturation on number representation in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 9, 278–291. <https://doi.org/10.1038/nrn2334>
- Ansari, D., Dhital, B., & Siong, S. C. (2006). Parametric effects of numerical distance on the intraparietal sulcus during passive viewing of rapid numerosity changes. *Brain Research*, 1067(1), 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2005.10.083>
- Ansari, D., Garcia, N., Lucas, E., Hamon, K., & Dhital, B. (2005). Neural correlates of symbolic number processing in children and adults. *Neuroreport*, 16(16), 1769–1773. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000183905.23396.f1>
- Arsalidou, M., & Taylor, M. J. (2011). Is  $2 + 2 = 4$ ? Meta-analyses of brain areas needed for numbers and calculations. *Neuroimage*, 54(3), 2382–2393. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.10.009>
- Arsalidou, M., Pawliw-Levac, M., Sadeghi, M., & Pascual-Leone, J. (2017). Brain areas needed for numbers and calculations in children: meta-analyses of fMRI studies. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30, 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.08.002>
- Artemenko, C., Soltanlou, M., Ehlis, A.-C., Nuerk, H.-C., & Dresler, T. (2018). The neural correlates of mental arithmetic in adolescents: a longitudinal fNIRS study. *Behavioral and Brain Functions*, 14, 5. <https://doi.org/10.1186/s12993-018-0137-8>
- Brannon, E. M. (2002). The development of ordinal numerical knowledge in infancy. *Cognition*, 83(3), 223–240. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(02\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(02)00005-7)
- Bugden, S., Woldorff, M. G., & Brannon, E. M. (2019). Shared and distinct neural circuitry for nonsymbolic and symbolic double-digit addition. *Human Brain Mapping*, 40(4), 1328–1343. <https://doi.org/10.1002/hbm.24452>

- Cantlon, J. F., Brannon, E. M., Carter, E. J., & Pelphey, K. A. (2006). Functional imaging of numerical processing in adults and 4-y-old children. *PLoS Biology*, 4(5), e125.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040125>
- Carey, S. (2001). Cognitive foundations of arithmetic: Evolution and ontogenesis. *Mind & Language*, 16(1), 37–55. <https://doi.org/10.1111/1468-0017.00155>
- Carey, S. (2004). Bootstrapping & the origin of concepts. *Daedalus*, 133(1), 59–68.  
<https://doi.org/10.1162/001152604772746701>
- Carey, S. (Ed.). (2009). *The origin of concepts* (Vol. 3). New York, NY: Oxford University Press.
- Castronovo, J., & Göbel, S. M. (2012). Impact of high mathematics education on the number sense. *PLoS ONE*, 7(4), e33832. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033832>
- Dehaene, S. (1996). The organization of brain activations in number comparison: Event-related potentials and the additive-factors method. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8(1), 47–68.  
<https://doi.org/10.1162/jocn.1996.8.1.47>
- Dehaene, S. (1997). *The number sense: How the mind creates mathematics*. New York, NY: Oxford University Press.
- Dehaene, S. (2009). Origins of mathematical intuitions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1156(1), 232–259. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04469.x>
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1, 83–120.
- Dehaene, S., Dupoux, E., & Mehler, J. (1990). Is numerical comparison digital? Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(3), 626–641. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.16.3.626>
- Dehaene, S., Molko, N., Cohen, L., & Wilson, A. J. (2004). Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 14(2), 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2004.03.008>
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3–6), 487–506. <https://doi.org/10.1080/02643290244000239>
- Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R., & Tsivkin, S. (1999). Sources of mathematical thinking: Behavioral and brain-imaging evidence. *Science*, 284(5416), 970–974.  
<https://doi.org/10.1126/science.284.5416.970>
- Desoete, A., Ceulemans, A., Roeyers, H., & Huybreck, A. (2009). Subitizing or counting as possible screening variables for learning disabilities in mathematics education or learning? *Educational Research Review*, 4(1), 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2008.11.003>
- Dresler, T., Obersteiner, A., Schecklmann, M., Vogel, A. C. M., Ehlis, A.-C., Richter, M. M., ... Fallgatter, A. J. (2009). Arithmetic tasks in different formats and their influence on behavior and brain oxygenation as assessed with near-infrared spectroscopy (NIRS): a study involving primary and secondary school children. *Journal of Neural Transmission*, 116, 1689–1700.  
<https://doi.org/10.1007/s00702-009-0307-9>
- Eger, E., Sterzer, P., Russ, M. O., Giraud, A. L., & Kleinschmidt, A. (2003). A supramodal number representation in human intraparietal cortex. *Neuron*, 37(4), 719–726.  
[https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(03\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00036-9)
- Emerson, R. W., & Cantlon, J. F. (2015). Continuity and change in children's longitudinal neural responses to numbers. *Developmental Science*, 18(2), 314–326. <https://doi.org/10.1111/desc.12215>

- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002>
- Gallistel, C. R., & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition*, 44(1–2), 43–74. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90050-R](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90050-R)
- Gallistel, C. R., & Gelman, R. (2000). Non-verbal numerical cognition: From reals to integers. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(2), 59–65. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(99\)01424-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(99)01424-2)
- Gebuis, T., & Der Smagt, M. J. van. (2011). False approximations of the approximate number system? *PloS ONE*, 6(10), e25405. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025405>
- Gebuis, T., Herfs, I. K., Kenemans, J. L., De Haan, E. H., & Van der Smagt, M. J. (2009). The development of automated access to symbolic and non-symbolic number knowledge in children: An ERP study. *European Journal of Neuroscience*, 30(10), 1999–2008. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2009.06994.x>
- Gelman, R., & Gallistel, C. R. (1986). *The child's understanding of number*. Cambridge, MA; London, England: Harvard University Press. <https://doi.org/10.4159/9780674037533>
- Göbel, S., Walsh, V., Rushworth, M. F. S. (2001). The mental number line and the human angular gyrus. *Neuroimage*, 14(6), 1278–1289. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0927>
- Grabner, R. H., Ansari, D., Reishofer, G., Stern, E., Ebner, F., & Neuper, C. (2007). Individual differences in mathematical competence predict parietal brain activation during mental calculation. *Neuroimage*, 38(2), 346–356. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.07.041>
- Halberda, J., & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the “number sense”: the approximate number system in 3-, 4-, 5-, and 6-year-olds and adults. *Developmental Psychology*, 44(5), 1457–1465. <https://doi.org/10.1037/a0012682>
- Halberda, J., Ly, R., Wilmer, J. B., Naiman, D. Q., & Germine, L. (2012). Number sense across the lifespan as revealed by a massive Internet-based sample. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(28), 11116–11120. <https://doi.org/10.1073/pnas.1200196109>
- Hawes, Z., Sokolowski, H. M., Ononye, C. B., & Ansari, D. (2019). Neural underpinnings of numerical and spatial cognition: An fMRI meta-analysis of brain regions associated with symbolic number, arithmetic, and mental rotation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 103, 316–336. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.05.007>
- Hillyard, S. A., & Anllo-Vento, L. (1998). Event-related brain potentials in the study of visual selective attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(3), 781–787. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.3.781>
- Holloway, I. D., & Ansari, D. (2008). Domain-specific and domain-general changes in children's development of number comparison. *Developmental Science*, 11(5), 644–649. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00712.x>
- Holloway, I. D., & Ansari, D. (2009). Mapping numerical magnitudes onto symbols: The numerical distance effect and individual differences in children's mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(1), 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.04.001>
- Hoogmoed, A. H. van, & Kroesbergen, E. H. (2018). On the difference between numerosity processing and number processing. *Frontiers in Psychology*, 9, 1650. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01650>

- Hyde, D. C., & Spelke, E. S. (2012). Spatiotemporal dynamics of processing nonsymbolic number: An event-related potential source localization study. *Human Brain Mapping*, 33(9), 2189–2203. <https://doi.org/10.1002/hbm.21352>
- Izard, V., Sann, C., Spelke, E. S., & Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(25), 10382–10385. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812142106>
- Julie, N., Alain, C., & Jacqueline, L. (2013). Impact of language abilities on exact and approximate number skills development: Evidence from children with specific language impairment. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 56(3), 956–970. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2012/10-0229\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2012/10-0229))
- Kaufmann, L., Koppelstaetter, F., Siedentopf, C., Haala, I., Haberlandt, E., Zimmerhackl, L.-B., ... Ischebeck, A. (2006). Neural correlates of the number-size interference task in children. *Neuroreport*, 17(6), 587–591. <https://doi.org/10.1097/00001756-200604240-00007>
- Krajcsi, A., Lengyel, G., & Kojouharova, P. (2018). Symbolic number comparison is not processed by the analog number system: Different symbolic and non-symbolic numerical distance and size effects. *Frontiers in Psychology*, 9, 124. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00124>
- Kucian, K., Aster, M. von, Loenneker, T., Dietrich, T., & Martin, E. (2008). Development of neural networks for exact and approximate calculation: A fMRI study. *Developmental Neuropsychology*, 33(4), 447–473. <https://doi.org/10.1080/87565640802101474>
- Kucian, K., Loenneker, T., Dietrich, T., Dosch, M., Martin, E., & Von Aster, M. (2006). Impaired neural networks for approximate calculation in dyscalculic children: A functional MRI study. *Behavioral and Brain Functions*, 2, 31. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-2-31>
- Kutter, E. F., Bostroem, J., Elger, C. E., Mormann, F., & Nieder, A. (2018). Single neurons in the human brain encode numbers. *Neuron*, 100(3), 753–761. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.08.036>
- Kutter, E. F., Boström, J., Elger, C. E., Nieder, A., & Mormann, F. (2022). Neuronal codes for arithmetic rule processing in the human brain. *Current Biology*, 32(6), 1275–1284. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.01.054>
- Li, J., Zhou, X., & Lindskog, M. (2019). Editorial: Approximate Number System and Mathematics. *Frontiers in Psychology*, 10, 2084. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02084>
- Libertus, M. E., Woldorff, M. G., & Brannon, E. M. (2007). Electrophysiological evidence for notation independence in numerical processing. *Behavioral and Brain Functions*, 3(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-3-1>
- Matejko, A. A., Hutchison, J. E., & Ansari, D. (2019). Developmental specialization of the left intraparietal sulcus for symbolic ordinal processing. *Cortex*, 114, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.11.027>
- Merkley, R., Shimi, A., & Scerif, G. (2016). Electrophysiological markers of newly acquired symbolic numerical representations: the role of magnitude and ordinal information. *ZDM*, 48(3), 279–289. <https://doi.org/10.1007/s11858-015-0751-y>
- Moeller, K., Willmes, K., & Klein, E. (2015). A review on functional and structural brain connectivity in numerical cognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 227. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00227>
- Mussolin, C., Mejias, S., & Noël, M. P. (2010). Symbolic and nonsymbolic number comparison in children with and without dyscalculia. *Cognition*, 115(1), 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.10.006>

- Mussolin, C., Nys, J., Leybaert, J., & Content, A. (2016). How approximate and exact number skills are related to each other across development: A review. *Developmental Review, 39*, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2014.11.001>
- Negen, J., & Sarnecka, B. W. (2015). Is there really a link between exact-number knowledge and approximate number system acuity in young children? *British Journal of Developmental Psychology, 33*(1), 92–105. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12071>
- Opstal, F. van, Gevers, W., De Moor, W., & Verguts, T. (2008). Dissecting the symbolic distance effect: Comparison and priming effects in numerical and nonnumerical orders. *Psychonomic Bulletin & Review, 15*(2), 419–425. <https://doi.org/10.3758/PBR.15.2.419>
- Opstal, F. van, & Verguts, T. (2011). The origins of the numerical distance effect: The same-different task. *Journal of Cognitive Psychology, 23*(1), 112–120. <https://doi.org/10.1080/20445911.2011.466796>
- Park, J., Li, R., & Brannon, E. M. (2014). Neural connectivity patterns underlying symbolic number processing indicate mathematical achievement in children. *Developmental Science, 17*(2), 187–202. <https://doi.org/10.1111/desc.12114>
- Park, J., Park, D. C., & Polk, T. A. (2012). Parietal functional connectivity in numerical cognition. *Cerebral Cortex, 23*(9), 2127–2135. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs193>
- Piazza, M., & Izard, V. (2009). How humans count: Numerosity and the parietal cortex. *Neuroscience, 15*(3), 261–273. <https://doi.org/10.1177/1073858409333073>
- Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A. N., Berteletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., ... Zorzi, M. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia. *Cognition, 116*(1), 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.03.012>
- Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Tuning curves for approximate numerosity in the human intraparietal sulcus. *Neuron, 44*(3), 547–555. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.10.014>
- Piazza, M., Pinel, P., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2007). A magnitude code common to numerosities and number symbols in human intraparietal cortex. *Neuron, 53*(2), 293–305. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.11.022>
- Pinel, P., Dehaene, S., Rivière, D., & LeBihan, D. (2001). Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *Neuroimage, 14*(5), 1013–1026. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0913>
- Pinel, P., Piazza, M., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Distributed and overlapping cerebral representations of number, size, and luminance during comparative judgments. *Neuron, 41*(6), 983–993. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(04\)00107-2](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(04)00107-2)
- Pitt, B., Gibson, E., & Piantadosi, S. T. (2022). Exact number concepts are limited to the verbal count range. *Psychological Science, 33*(3), 371–381. <https://doi.org/10.1177/09567976211034502>
- Prado, J., Mutreja, R., & Booth, J. R. (2014). Developmental dissociation in the neural responses to simple multiplication and subtraction problems. *Developmental Science, 17*(4), 537–552. <https://doi.org/10.1111/desc.12140>
- Qin, S., Cho, S., Chen, T., Rosenberg-Lee, M., Geary, D. C., & Menon, V. (2014). Hippocampal-neocortical functional reorganization underlies children's cognitive development. *Nature Neuroscience, 17*, 1263–1269. <https://doi.org/10.1038/nn.3788>

- Richter, M. M., Zierhut, K. C., Dresler, T., Plichta, M. M., Ehlis, A.-C., Reiss, K., ... Fallgatter, A. J. (2009). Changes in cortical blood oxygenation during arithmetical tasks measured by near-infrared spectroscopy. *Journal of Neural Transmission*, 116, 267–273. <https://doi.org/10.1007/s00702-008-0168-7>
- Rivera, S. M., Reiss, A., Eckert, M. A., & Menon, V. (2005). Developmental changes in mental arithmetic: Evidence for increased functional specialization in the left inferior parietal cortex. *Cerebral Cortex*, 15(11), 1779–1790. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhi055>
- Rykhlevskaia, E., Uddin, L. Q., Kondos, L., & Menon, V. (2009). Neuroanatomical correlates of developmental dyscalculia: combined evidence from morphometry and tractography. *Frontiers in Human Neuroscience*, 3, 51. <https://doi.org/10.3389/neuro.09.051.2009>
- Sasanguie, D., De Smedt, B., Defever, E., & Reynvoet, B. (2012). Association between basic numerical abilities and mathematics achievement. *British Journal of Developmental Psychology*, 30(2), 344–357. <https://doi.org/10.1111/j.2044-835X.2011.02048.x>
- Sasanguie, D., Göbel, S. M., Moll, K., Smets, K., & Reynvoet, B. (2013). Approximate number sense, symbolic number processing, or number-space mappings: What underlies mathematics achievement? *Journal of Experimental Child Psychology*, 114(3), 418–431. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.10.012>
- Skagenholt, M., Träff, U., Västfjäll, D., & Skagerlund, K. (2018). Examining the Triple Code Model in numerical cognition: An fMRI study. *PLoS ONE*, 13(6), e0199247. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199247>
- Smets, K., Gebuis, T., & Reynvoet, B. (2013). Comparing the neural distance effect derived from the non-symbolic comparison and the same-different task. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 28. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00028>
- Soltanlou, M., Artemenko, C., Dresler, T., Haeussinger, F. B., Fallgatter, A. J., Ehlis, A.-C., & Nuerk, H.-Ch. (2017). Increased arithmetic complexity is associated with domain-general but not domain-specific magnitude processing in children: A simultaneous fNIRS-EEG study. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 17, 724–736. <https://doi.org/10.3758/s13415-017-0508-x>
- Soltanlou, M., Sitnikova, M. A., Nuerk, H. C., & Dresler, T. (2018). Applications of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) in studying cognitive development: The case of mathematics and language. *Frontiers in Psychology*, 9, 277. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00277>
- Supekar, K., Swigart, A. G., Tenison, C., Jolles, D. D., Rosenberg-Lee, M., Fuchs, L., & Menon, V. (2013). Neural predictors of individual differences in response to math tutoring in primary-grade school children. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(20), 8230–8235. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222154110>
- Temple, E., & Posner, M. I. (1998). Brain mechanisms of quantity are similar in 5-year-old children and adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(13), 7836–7841. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.13.7836>
- Venkatraman, V., Ansari, D., & Chee, M. W. L. (2005). Neural correlates of symbolic and non-symbolic arithmetic. *Neuropsychologia*, 43(5), 744–753. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.08.005>
- Verguts, T., & Fias, W. (2004) Representation of number in animals and humans: A neural model. *Journal of Cognitive Neurosciences*, 16(9), 1493–1504. <https://doi.org/10.1162/0898929042568497>

- Verguts, T., & Opstal, F. van. (2005). Dissociation of the distance effect and size effect in one-digit numbers. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(5), 925–930. <https://doi.org/10.3758/BF03196787>
- Wilkey, E. D., & Ansari, D. (2020). Challenging the neurobiological link between number sense and symbolic numerical abilities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1464(1), 76–98. <https://doi.org/10.1111/nyas.14225>
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358(6389), 749–750. <https://doi.org/10.1038/358749a0>
- Xu, F., & Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74(1), B1–B11. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(99\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(99)00066-9)
- Zago, L., Pesenti, M., Mellet, E., Crivello, F., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Neural correlates of simple and complex mental calculation. *Neuroimage*, 13(2), 314–327. <https://doi.org/10.1006/nimg.2000.0697>
- Zhang, H., Chen, C., & Zhou, X. (2012). Neural correlates of numbers and mathematical terms. *NeuroImage*, 60(1), 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.12.006>

Оригинал статьи получен 10 ноября 2023

Исправленная статья принята 01 декабря 2023

Первая публикация онлайн 11 декабря 2023

#### Об авторах:

**Маракшина Юлия Александровна**, кандидат психологических наук, научный сотрудник, Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-7559-9148>; [retalika@yandex.ru](mailto:retalika@yandex.ru)

**Ситникова Мария Александровна**, кандидат психологических наук, доцент, кафедра психологии, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия; старший научный сотрудник, Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-3545-2149>; [furmanchuk@bsu.edu.ru](mailto:furmanchuk@bsu.edu.ru)

**Адамович Тимофей Валерьевич**, младший научный сотрудник, Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-1571-9192>; [tadamovich11@gmail.com](mailto:tadamovich11@gmail.com)

#### About the authors:

**Marakshina Julia A.**, PhD in Psychology, Researcher, Federal Research Centre of Psychological and Interdisciplinary Studies, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-7559-9148>; [retalika@yandex.ru](mailto:retalika@yandex.ru)

**Sitnikova Maria A.**, PhD in Psychology, Associate Professor, Department of Psychology, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia; Researcher, Federal Research Centre of Psychological and Interdisciplinary Studies, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3545-2149>; [furmanchuk@bsu.edu.ru](mailto:furmanchuk@bsu.edu.ru)

**Adamovich Timofey V.**, Researcher, Federal Research Centre of Psychological and Interdisciplinary Studies, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-1571-9192>; [tadamovich11@gmail.com](mailto:tadamovich11@gmail.com)