

ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ (КОГНИТИВНОЙ)
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

УДК: 612.821.2

НЕЙРОННЫЕ КОРРЕЛЯТЫ
РЕШЕНИЯ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ У ВЗРОСЛЫХ

© 2025 г. А. В. Истомина^{1,*}, А. Ю. Фабер¹, А. В. Манжуров²,
М. В. Ублинский², М. Арсалиду^{3,4}

¹Научно-учебная лаборатория когнитивных исследований,

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

²ГБУЗ «НИИ неотложной детской хирургии и травматологии»

Департамента здравоохранения города Москвы, Россия

³Департамент психологии Йоркского университета, Торонто, Канада

⁴NeuroPsyLab, Торонто, Канада

*e-mail: avistomina@hse.ru

Поступила в редакцию 13.08.2024 г.

После доработки 22.09.2024 г.

Принята к публикации 11.12.2024 г.

Была проведена функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) во время устного вычисления задач на арифметические операции с тремя уровнями сложности. Во время решения задач с использованием вычитания, умножения и деления на легком уровне была обнаружена активность мозга в левой нижней теменной дольке и левой угловой извилине, которая может отражать извлечение информации из долговременной памяти; также в левой нижней лобной извилине – для задач с использованием деления, что является признаком применения процедурной стратегии. С повышением уровня сложности задачи активность мозга в левой нижней теменной дольке и левой угловой извилине становилась билатеральной и более интенсивной, дополнительно стали вовлечены такие структуры, как верхняя лобная извилина, дополнительная двигательная зона, нижняя средняя и височная извилины, а также мозжечок, что свидетельствует о необходимости увеличения нейронных ресурсов для решения более сложных задач. При решении задач на трехзначное деление выявлена билатеральная активность в островковой коре, которую связывают со всеми видами аффективных и когнитивных процессов. Выявленные области активаций мозга подчеркивают различные системы, задействованные в решении арифметических задач разной степени сложности. Несмотря на сходства в паттернах активации мозга, поведенческие результаты показали статистически значимые различия между арифметическими операциями. Данное исследование способствовало нейрокартированию математических процессов у здоровых взрослых в стереотаксических координатах.

Ключевые слова: фМРТ, нейровизуализация, арифметика, сложение, вычитание, умножение, деление

DOI: 10.31857/S0044467725010047

1. ВВЕДЕНИЕ

Математическое познание является сложным когнитивным навыком, имеющим огромное значение для последующего академического и жизненного успеха (Ritchie, Bates, 2013; Moustafa et al., 2017). Любая математическая задача включает в себя арифметические операции: сложение, вычитание, умножение и деление (Gliksman et al., 2022). Поведенческие исследования показывают, что одни арифметические операции могут быть решены с применением других. Например, вычитание является обратной операцией к сложению (Peters et al., 2010; Zueegman, Wildes, 2021; Van Der Auwera et al., 2023),

умножение можно рассматривать как повторяющееся сложение ($6 * 3 = 6 + 6 + 6$) (Byers, 2010; Chin, Pierce, 2019), а задачу на деление можно решить с помощью умножения (Mauro et al., 2003). Результаты метаанализов фМРТ (Arsalidou, Taylor, 2011; Pollack, Ashby, 2018; Hawes et al., 2019; Sokolowski et al., 2023; Istomina, Arsalidou, 2024), а также эмпирических исследований с использованием технологий визуализации мозга, таких как спектроскопия в окколоинфракрасном диапазоне (БИК-спектроскопия) (Soltanlou et al., 2022; Sitnikova et al., 2023), электроэнцефалография (ЭЭГ) (Molina del Rio et al., 2019; Mikheev et al., 2024), выявили, что при выполнении арифметических операций у взрослых

задействованы обширные сети различных областей мозга. Тем не менее большинство исследований акцентируют внимание на сложении (Harada et al., 2013; Matejko, Ansari, 2019), в то время как исследования, посвященные вычитанию (Pletzer, 2016; Göbel et al., 2022) и умножению (Bloechle et al., 2016; De Visscher et al., 2018), менее многочисленны. Важно отметить малое количество исследований, изучающих операцию деления в качестве независимой арифметической операции (Fehr et al., 2007; Wood et al., 2008; Ischebeck et al., 2009; Rosenberg-Lee et al., 2011). Кроме того, недостаток исследований данных фМРТ также очевиден в области решения более сложных (двухзначных и трехзначных) арифметических задач, поскольку большинство статей посвящено операциям с однозначными числами, несмотря на то что согласно российской школьной программе дети начинают работать с многозначными числами уже после первого класса обучения в школе, а взрослые продолжают использовать многозначные вычисления на протяжении всей своей жизни (Nuerk et al., 2015; Lemaire, 2023).

Многочисленные поведенческие исследования изучали механизмы, необходимые для решения многозначных арифметических задач. В частности, для решения задач с двумя или более операндами решающие должны выполнить последовательность шагов, включающих стратегии: использование долговременной памяти (знание ответа на задачу без вычислений) или процедурная стратегия, к которой относится выполнение заимствования или переноса, перегруппировка, разбиение задачи на более мелкие компоненты, переход между разными арифметическими операциями и одновременный контроль промежуточных результатов при манипуляции дополнительной информацией (Moore et al., 2015). Арифметическая сложность сложения двухзначных и трехзначных чисел возрастает, когда необходим шаг переноса (например, «65 + 17»; процесс перегруппировки, при котором цифра (единицы) должна быть перенесена из одного разряда (столбца) в более высокий разряд). Это явление демонстрируется в поведенческих исследованиях (Deschuyteneer et al., 2005; Göbel et al., 2014), которые документируют более длительное время реакции и большее количество ошибок для задач сложения, требующих процессов переноса или перегруппировки. Увеличенная сложность объясняется возросшей нагрузкой на рабочую память (Caviola et al., 2012; Sekeris et al., 2021).

Вычитание является обратной операцией к сложению, и эффект заимствования в двухзначном вычитании служит аналогом процесса переноса в сложении (Imbo, LeFevre, 2010; Artemenko, 2021) (например при решении задачи «65 – 17», так как из разряда единиц (5) нельзя вычесть 7 без перехода в отрицательную числовую ось, проводится заимствование из разряда десятков, поэтому

7 вычитается из 15). Первичные данные указывают на то, что заимствование при решении задач на однозначное вычитание может быть основано на исполнительных и вербальных процессах рабочей памяти. Тем не менее вклад процедуры заимствования из более высокого разряда при решении задач на многозначное вычитание остается областью, требующей дальнейших, более детальных исследований (Imbo et al., 2007).

Исследования предполагают, что стратегия с использованием долговременной памяти становится основной при решении задач однозначного умножения (таблицы умножения) (Verguts, Fias, 2005; De Smedt, Boets, 2010; De Visscher et al., 2018). Однако для решения более сложных задач на умножение применяются и другие стратегии, например разбиение задачи на более мелкие компоненты, комбинирование частичных результатов (McCloskey et al., 2005; Huber et al., 2013).

Деление рассматривается как самая сложная арифметическая операция (Safati, Prastiti, 2021). В сравнении с остальными арифметическими операциями деление сравнительно слабо представлено как в поведенческих исследованиях, так и в исследованиях с использованием метода функциональной нейровизуализации (Burns, 2000; Szkudlarek et al., 2022). Тем не менее деление и умножение являются взаимно обратными операциями, то есть посредством перестановки операндов любую задачу на деление (например, $42 \div 6 = 7$) можно переформулировать как задачу на умножение (например, $6 \times 7 = 42$) и наоборот. В российских школах решение задач с делением трехзначных чисел происходит исключительно в письменной форме, с использованием метода «деление столбиком». В отличие от трехзначного умножения, которое некоторые взрослые пытаются выполнять устно в повседневной жизни, понимая, что результат будет целым числом (например, $103 \times 6 = 618$), решение задачи на деление может привести к получению дробного результата (например, $618 \div 7 = 88.2857143$). Таким образом, задача на трехзначное деление требует высокого когнитивного напряжения независимо от возраста, знаний и навыков (Fagginger Auer, Hickendorff, 2018).

Нейронные корреляты арифметических операций у взрослых отражаются в устойчивых паттернах активации в префронтальной, теменной, поясной и островковой областях мозга (Arsalidou, Taylor, 2011; Pollack, Ashby, 2018; Hawes et al., 2019; Sokolowski et al., 2023; Istominina, Arsalidou, 2024). Однако мозговые корреляты операции решения задач на деление остаются слабо изученными. В целом, существует заметный недостаток исследований фМРТ, посвященных активации областей мозга при решении как легких, так и сложных задач на арифметические операции; и ни одно исследование на сегодняшний день не изучало все

четыре арифметические операции у одних и тех же участников. Основная цель данного исследования – внести вклад в картирование областей мозга, связанных с решением четырех арифметических операций различной сложности у взрослых испытуемых. Настоящее фМРТ-исследование является первым, изучающим четыре арифметические операции (сложение, вычитание, умножение и деление) с тремя уровнями сложности у здоровых взрослых.

Опираясь на результаты предыдущих исследований, мы ожидаем, что: (а) однозначные задачи будут решены более точно и быстро, чем более сложные двузначные и трехзначные задачи, а также что задачи на деление будут решены менее точно и быстро в каждом из трех уровней сложности; (б) лобно-теменные области мозга будут задействованы следующим образом: решение однозначных задач активирует нижнюю левую извилину и нижнюю теменную дольку; с увеличением сложности задачи активность лобно-теменных отделов мозга будет интенсивнее, дополнительно вовлекаются такие структуры, как верхняя, средняя и нижняя лобные извилины, верхняя теменная долька и дополнительная двигательная зона; (в) возможно, будут получены данные об активации других, не описанных ранее при решении арифметических задач областей мозга.

2. МЕТОДИКА

2.1. Участники

Всего в исследовании приняли добровольное участие 21 взрослый мужчина и женщина. Один из участников не завершил сеанс сканирования МРТ, поэтому окончательная выборка включала 20 взрослых участников (11 женщин, 9 мужчин от 18 до 30 лет, средний возраст 23 ± 4 года). Все участники были русскоговорящими, с нормальным или скорректированным до нормального зрением. Ни у кого из участников не было противопоказаний к МРТ (клаустрофобия или металлические предметы в теле), психиатрических или неврологических заболеваний в анамнезе, черепно-мозговых травм и злоупотребления наркотиками или алкоголем. Все участники подписали письменное информированное согласие на участие в эксперименте. После сеанса сканирования МРТ участники получили структурные изображения своего мозга (T1-взвешенное изображение на диске) и денежное вознаграждение (800 рублей). Добровольцы набирались через объявления, которые распространялись среди высших учебных заведений города Москвы. Сбор данных проводился в период с июля 2021 по январь 2022 года. Перед тем как пригласить испытуемых на МРТ-сканирование, их анкеты были

проанализированы, чтобы убедиться в академической успеваемости по математике (итоговая оценка «4» или «5» по пятибалльной шкале в школе и/или ВУЗе). Исследование соответствовало этическим принципам Хельсинкской декларации, и эксперимент был одобрен Этическим комитетом НИУ ВШЭ, Москва.

2.2. Параметрическая математическая задача (ПМЗ)

Параметрическая математическая задача (ПМЗ) (Koporkina, Arsalidou, 2019) включала в себя три уровня сложности с однозначными, двузначными и трехзначными числами, а также четыре вида арифметических операций: сложение, вычитание, умножение и деление. Участникам предлагалось решать арифметические задачи, написанные черными цифрами и символами «+», «-», «*», «/» в верхней части экрана, которые появлялись на белом фоне, вместе с четырьмя потенциальными ответами, написанными красными цифрами в нижней части экрана. Среди предложенных ответов были один правильный и три альтернативных ответа, которые были близки по значению к правильному (рис. 1 (а)). Участникам предлагалось выбрать ответ с помощью кнопок «1», «2», «3» и «4».

Всего было 15 условий, которые повторялись три раза. Эти условия включали четыре арифметические операции (сложение, вычитание, умножение, деление) с тремя уровнями сложности для каждой (4 операции * 3 уровня сложности = 12 условий). Также были три контрольных условия; таким образом, в общей сложности получалось 15 условий. Уровень сложности варьировался с помощью количества цифр в числах, предлагавшихся в условиях ПМЗ (рис. 1 (а)): легкий уровень: задачи на сложение и умножение содержали два однозначных числа, сумма варьировалась от 2 до 18, а произведение – от 4 до 81, согласно таблице умножения; средний уровень: задачи на сложение содержали два двузначных числа и сумма варьировалась от 21 до 198; задачи на умножение содержали одно однозначное и одно двузначное число, произведение варьировалось от 22 до 891; сложный уровень: задачи на сложение содержали два трехзначных числа и сумма варьировалась от 201 до 1998; задачи на умножение содержали одно однозначное и одно трехзначное число, произведение варьировалось от 301 до 8991.

Задачи на вычитание и деление для каждого уровня были сформированы как обратные задачи к задачам на сложение и умножение соответственно. Например для задачи на однозначное сложение «8 + 4» с потенциальными ответами: «12», «14», «13», «11» – был создан обратный стимул на вычитание «12 – 4» с потенциальными ответами «8»,

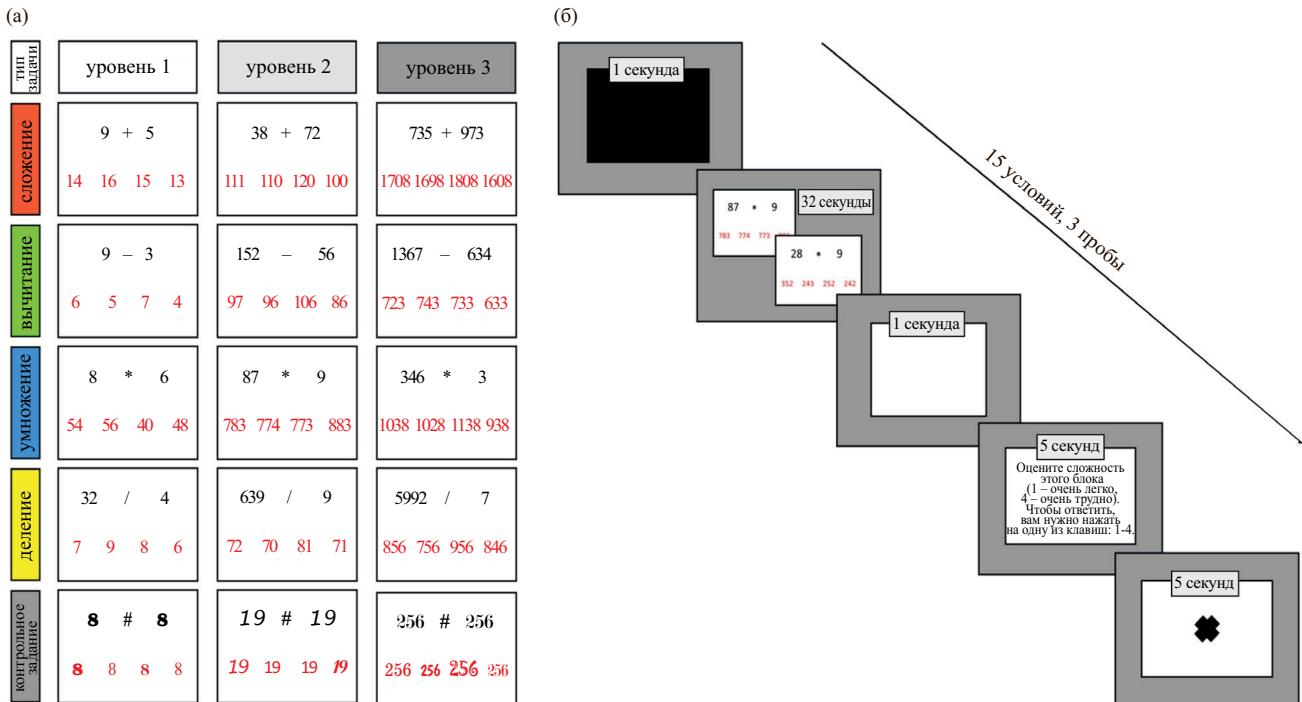


Рис. 1. (а) – типы задач и уровни сложности в параметрической математической задаче (ПМЗ); (б) – последовательность событий и их длительность в параметрической математической задаче (ПМЗ).

Fig. 1. (a) – types of problems and levels of difficulty in the Parametric Math Task (PMT); (b) – sequence of events and their duration in the Parametric Math Task (PMT)

«9», «7», «6». Контрольные задачи отображали написанные черным пары однозначных, двузначных или трехзначных чисел, разделенных символом «#» в верхней части экрана. Аналогично арифметическим задачам, контрольные задачи содержали 4 варианта ответа, написанные красным цветом. Целью задачи было идентифицировать число, написанное тем же шрифтом, что и пара в верхней части экрана. Для каждого условия было создано 100 стимулов, которые появлялись на экране в случайном порядке. Блоки с различными условиями также были перемешаны и расположены случайным образом. Таким образом, каждый участник получал уникальный порядок блоков и различающийся набор арифметических или контрольных задач для каждого условия.

Последовательность событий в ПМЗ выглядела так: проба начиналась с 1 с демонстрации черного экрана. После этого следовал блок с одним из условий (12 арифметических и 3 контрольных), продолжительность которого составляла 32 с; в течение этого времени участникам предлагалось дать как можно больше правильных ответов. Как только участник выбирал ответ нажатием на кнопку, стимул исчезал и, независимо от корректности ответа, на экране появлялся следующий стимул, и так далее до окончания 32 с. Последний

предъявляемый перед окончанием 32 с стимул, на который не был дан ответ, не учитывался при вычислении точности и времени реакции. После окончания блока на 1 с включалась демонстрация белого экрана как переход к следующему типу задания – оценке субъективной сложности блока по шкале от 1 (очень легко) до 4 (очень трудно) в течение 5 с (если участник давал ответ раньше чем за 5 с, происходило переключение на демонстрацию белого экрана на оставшееся до 5 с время); последним в цепочке событий следовал фиксационный крест, разделявший блоки с разными типами вопросов. Эксперимент состоит из трех отдельных проб с идентичной структурой, между которыми участники не отдыхали. Таким образом, продолжительность одной пробы составляла 11 минут и общее время сканирования для получения функциональных данных составляло 33 минуты (рис. 1 (б)).

2.3. Получение структурных и функциональных изображений

Исследование проводили с использованием МРТ-сканера Philips Achieva dStream 3.0 Тл, оснащенного 32-канальной головной катушкой, в НИИ неотложной детской хирургии и травматологии.

Для получения T1-взвешенного анатомического изображения использовалась последовательность со следующими характеристиками: TR = 2300 мс; матрица = 240×222 ; размер вокселя = $1.0 \times 1.0 \times 1.0$ мм; FOV = $240 \times 240 \times 170$ мм; TE = 3.9 мс; FA = 8° . Для получения фМРТ-изображений использовалась EPI-последовательность со следующими характеристиками: TR = 2500 мс; TE = 35 мс; FOV = $230 \times 230 \times 150$ мм; размер вокселя = $3.0 \times 3.0 \times 3.0$ мм. Функциональные данные были получены в трех итерациях по 11 минут каждая. Для демонстрации стимулов и записи поведенческих результатов (ответ участника и время реакции) эксперимент был написан в программе Presentation (Neurobehavioral Systems Inc.), синхронизированной с МР-томографом. Поведенческие ответы на ПМЗ давались с помощью двух кнопочных пультов с двумя клавишами на каждом для левой и правой руки; участники отвечали нажатием кнопок «1», «2» на пульте в левой руке, «3» и «4» на пульте в правой руке. Кнопки были помечены наклейками. Перед началом сканирования участники были проинструктированы о правилах нажатия кнопок на пультах. Для сведения к минимальному уровню движения головы во время сканирования производились ее позиционирование и фиксация с помощью подушки.

2.4. Анализ поведенческих и фМРТ-данных

2.4.1. Анализ поведенческих данных

Статистический анализ проводился с использованием Python версии 3.11, визуализация – с помощью пакета ggplot в RStudio версии 2023.06. Прежде всего, используя данные описательной статистики, был проведен анализ ANOVA с повторными измерениями с целью оценки влияния типа арифметической операции и сложности на выполнение задания (точность – отношение количества правильных ответов к количеству продемонстрированных задач, время реакции). Далее были проведены попарные сравнения для оценки точности выполнения различных задач на каждом уровне сложности (1, 2, 3), а также точности выполнения задач на разных уровнях сложности для каждой операции (сложение, вычитание, умножение, деление, контрольные задачи) с корректировкой значений p с помощью поправки на множественные сравнения Бонферрони.

2.4.2. Анализ данных фМРТ

Предобработка, а также анализ данных на индивидуальном (первый уровень анализа) и групповом (второй уровень анализа) уровнях проводились с помощью пакета статистической обработки AFNI (версия 23.2.04; <http://afni.nimh.nih.gov/>) (Cox, 1996; Saad et al., 2006). После преобразования исходных изображений в формат NIfTI (Froeling, 2019) на индивидуальном уровне два первых функциональных объема исключались из анализа, оставшиеся изображения выравнивались относительно первого объема для коррекции движений с использованием 6 регрессоров движения: трех поступательных и трех вращательных. Затем мы применили нелинейную деформацию ко всем функциональным изображениям для их выравнивания по структурному изображению участников (Glen et al., 2020). Далее проводилось наложение усредненного функционального изображения со структурным для процедуры нормализации к модельному мозгу в пространстве MNI (Монреальского неврологического института), что в дальнейшем позволило провести анализ на групповом уровне. Предварительная обработка фМРТ-данных была выполнена для минимизации воздействия как артефактов, связанных со сбоями данных, так и физиологических артефактов, а также для стандартизации расположения областей мозга среди участников с целью достижения валидности и чувствительности в групповом анализе (Caballero-Gaudes, Reynolds, 2017; Power et al., 2017). В качестве дополнительного шага контроля качества из временного ряда фМРТ-сигнала были исключены объемы, для которых сдвиг, вызванный движением головы участника, превышал установленный порог в 0.5 мм. Амплитуда фМРТ-сигнала во временном ряде была нормирована к среднему значению 100. Последним этапом предобработки данных являлось сглаживание изображения с помощью фильтра Гаусса с диаметром ядра фильтра 8 мм (Mikl et al., 2008). Для построения индивидуальных карт активации были использованы 12 ипов контрастов для арифметических операций и контрольных заданий: 1-й УРОВЕНЬ: СЛОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, ВЫЧИТАНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, УМНОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, ДЕЛЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ; 2-й УРОВЕНЬ: СЛОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, ВЫЧИТАНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, УМНОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, ДЕЛЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ; 3-й УРОВЕНЬ: СЛОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, ВЫЧИТАНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, УМНОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, ДЕЛЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ. Индивидуальные параметрические карты затем были объединены в обобщенную линейную модель (GLM) с помощью модели смешанных эффектов (3dMEMA) в AFNI (Chen et al., 2012). Статистические карты были скорректированы с учетом поправки на множественные сравнения с использованием контроля средней доли ложных отклонений гипотез (FDR) и порогового значения размеров

gov/) (Cox, 1996; Saad et al., 2006). После преобразования исходных изображений в формат NIfTI (Froeling, 2019) на индивидуальном уровне два первых функциональных объема исключались из анализа, оставшиеся изображения выравнивались относительно первого объема для коррекции движений с использованием 6 регрессоров движения: трех поступательных и трех вращательных. Затем мы применили нелинейную деформацию ко всем функциональным изображениям для их выравнивания по структурному изображению участников (Glen et al., 2020). Далее проводилось наложение усредненного функционального изображения со структурным для процедуры нормализации к модельному мозгу в пространстве MNI (Монреальского неврологического института), что в дальнейшем позволило провести анализ на групповом уровне. Предварительная обработка фМРТ-данных была выполнена для минимизации воздействия как артефактов, связанных со сбоями данных, так и физиологических артефактов, а также для стандартизации расположения областей мозга среди участников с целью достижения валидности и чувствительности в групповом анализе (Caballero-Gaudes, Reynolds, 2017; Power et al., 2017). В качестве дополнительного шага контроля качества из временного ряда фМРТ-сигнала были исключены объемы, для которых сдвиг, вызванный движением головы участника, превышал установленный порог в 0.5 мм. Амплитуда фМРТ-сигнала во временном ряде была нормирована к среднему значению 100. Последним этапом предобработки данных являлось сглаживание изображения с помощью фильтра Гаусса с диаметром ядра фильтра 8 мм (Mikl et al., 2008). Для построения индивидуальных карт активации были использованы 12 ипов контрастов для арифметических операций и контрольных заданий: 1-й УРОВЕНЬ: СЛОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, ВЫЧИТАНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, УМНОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, ДЕЛЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ; 2-й УРОВЕНЬ: СЛОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, ВЫЧИТАНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, УМНОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, ДЕЛЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ; 3-й УРОВЕНЬ: СЛОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, ВЫЧИТАНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, УМНОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ, ДЕЛЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ. Индивидуальные параметрические карты затем были объединены в обобщенную линейную модель (GLM) с помощью модели смешанных эффектов (3dMEMA) в AFNI (Chen et al., 2012). Статистические карты были скорректированы с учетом поправки на множественные сравнения с использованием контроля средней доли ложных отклонений гипотез (FDR) и порогового значения размеров

кластеров. Результаты группового анализа были получены для тех же контрастов, что и для анализа на индивидуальном уровне: арифметические операции (сложение, вычитание, умножение и деление) по сравнению с контрольным заданием.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Результаты поведенческого анализа

Описательная статистика поведенческих результатов по точности (т.е. доле правильных ответов) и времени реакции, усредненных по трем блокам, сведена в таблицы с1 и с2, расположенные в Дополнительных материалах. Среднее значение, стандартное отклонение и соответствующие различия между задачами ПМЗ внутри каждого из уровней сложности (1, 2, 3) показаны на рисунках 2 (а) и 2 (б) соответственно.

3.1.2. Точность

Средние показатели точности решения арифметических задач варьировались от 0.944–0.967 для уровня 1; 0.857–0.902 для уровня 2 и 0.684–0.833 для уровня 3 (рис. 2 (а)). ANOVA с повторными измерениями выявил значительное влияние основных факторов – типа задачи ($F(4, 76) = 17.68, p < 0.001, \eta^2 = 0.16$) и уровня сложности ($F(2, 38) = 46.53, p < 0.001, \eta^2 = 0.32$) – на точность выполнения, а также значительное взаимодействие между типом задачи и уровнем сложности ($F(8, 152) = 6.17, p < 0.001, \eta^2 = 0.10$). Эти результаты указывают на то, что как тип арифметической задачи, так и ее уровень сложности значительно влияют на точность выполнения, при этом их эффекты взаимозависимы. Попарные сравнения с поправкой Бонферрони на множественные сравнения не показали статистически значимых отличий в точности решения арифметических операций ($p < 0.05$) для уровня сложности 1. Для более сложных задач уровня 2 достоверные отличия ($p < 0.05$) были обнаружены между контрольным заданием и тремя арифметическими задачами (сложение, вычитание, умножение), которые были решены менее точно, чем контрольное задание. Для самых сложных задач уровня 3 значимые отличия в точности ($p < 0.05$) наблюдались между контрольным заданием и всеми четырьмя арифметическими задачами, контрольное задание было решено более точно, чем арифметические задачи; а также между сложением и тремя другими задачами (вычитание, умножение, деление), где сложение было выполнено точнее. Попарные сравнения точности внутри каждой арифметической операции между уровнями сложности с поправкой Бонферрони обнаружили статистически значимые отличия между уровнем 1 и 2 для

вычитания и умножения, задачи 1-го уровня были решены точнее, чем задачи уровня 2; а также отличия для всех четырех арифметических операций между уровнем 2 и 3, 1 и 3, где задачи 1-го уровня решены точнее задач уровней 2 и 3, а задачи уровня 3 решены менее точно в сравнении с уровнями 1 и 2.

3.1.3. Время реакции

Среднее время реакции при решении арифметических задач варьировало в пределах 1.275–1.609 с для уровня 1, 3.756–6.341 с для уровня 2 и 6.833–10.742 с для уровня 3 (рис. 2 (б)). Проведенный дисперсионный анализ для повторных измерений времени реакции среди взрослых выявил значительные основные эффекты как для задачи ($F(4, 76) = 124.70, p < 0.001$), так и для уровня сложности ($F(2, 38) = 329.16, p < 0.001$), а также значимое взаимодействие «задание * уровень» (TASK * LEVEL) ($F(8, 152) = 50.99, p < 0.001$). Попарные сравнения времени реакции с поправкой Бонферрони на множественные сравнения для уровней сложности 1 и 3 выявили значительные различия ($p < 0.05$) между большинством пар заданий, за исключением пар: деление и умножение, деление и вычитание, умножение и вычитание. Для уровня сложности 2 значимые различия ($p < 0.05$) были отмечены также между большинством пар заданий, за исключением пар: деление и умножение, умножение и вычитание, – показывая, что время реакции существенно различается для большинства заданий на этом уровне следующим образом: контрольная задача была решена быстрее всех арифметических задач (1.494 с), двузначное сложение было выполнено медленнее (3.756 с), затем по возрастанию следует время решения задач на двузначное вычитание (5.102 с), двузначное умножение (5.440 с), и дольше всего решались задачи на двузначное деление (6.341 с). Анализ времени реакции при выполнении каждой арифметической операции с возрастанием сложности показал статистически значимую разницу ($p < 0.05$) между уровнями 1 и 2, 2 и 3, 1 и 3 для всех четырех арифметических операций между собой: однозначные задачи были решены быстрее, а трехзначные задачи медленнее.

3.2. Результаты фМРТ-анализа

Таблицы значимых кластеров для контрастов между арифметическими операциями и контрольной задачей для трех уровней сложности сведены в таблицы 1, 2, 3.

Статистические карты, полученные на основе группового анализа на основании модели смешанных эффектов, были пороговыми при уровне значимости $p < 0.05$ с поправкой на множественные сравнения на уровне кластеров, при пороговом уровне формирования кластеров $p < 0.005$. При решении

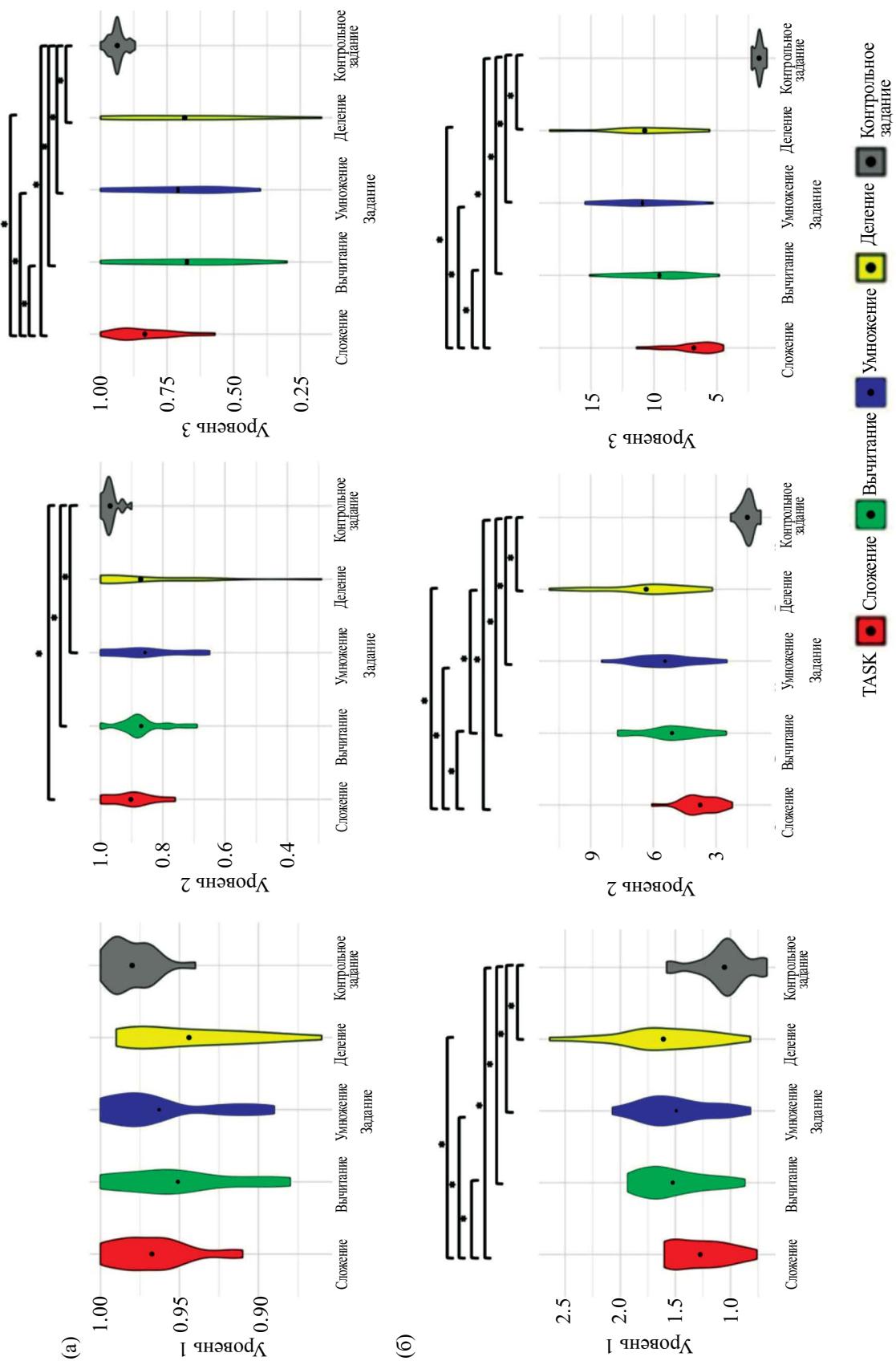


Рис. 2. (а) – гравиции точности при решении задач на сложение, вычитание, умножение и деление, а также при решении контрольного задания в трех уровнях сложности (1, 2, 3). Статистически значимые различия между заданиями внутри каждого из трех уровней: * – $p < 0.05$; (б) – гравиции времени реакции при решении задач на сложение, вычитание, умножение и деление, а также при решении контрольного задания в трех уровнях сложности (1, 2, 3). Статистически значимые различия между заданиями внутри каждого из трех уровней: * – $p < 0.05$.

Fig. 2 (a) – accuracy on addition, subtraction, multiplication and division plus control task in adults at three levels of difficulty (1, 2, 3). Statistically significant differences between tasks within each of the three levels: * – $p < 0.05$; (б) – reaction time on addition, subtraction, multiplication and division plus control task in adults at three levels of difficulty (1, 2, 3). Statistically significant differences between tasks within each of the three levels: * – $p < 0.05$.

Таблица 1. Значимые кластеры с пиковыми координатами активности мозга у взрослых при расчете контрастов задач однозначного сложения, вычитания, умножения и деления – контрольное задание. Минимальный размер кластера составляет 50 вокселей при $p < 0.005$ (с поправкой на множественные сравнения FDR).

Table 1. Significant clusters with peak brain activity coordinates in adults when calculating contrasts for single-digit addition, subtraction, multiplication, and division tasks compared to the control task. The minimum cluster size is 50 voxels at $p < 0.005$ (with FDR correction for multiple comparisons).

Контраст/номер кластера в порядке убывания размера	Объем, мм	MNI Координаты (мм ³)			Области мозга – полушарие – (поля по Бродману)
		x	y	z	
СЛОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ*					
ВЫЧИТАНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ*					
1. t-критерий 4.89	51	–43	–49	43	Нижняя теменная долька L (BA 39, BA40)
УМНОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ*					
2. t-критерий 4.40	114	–31	–71	41	Угловая извилина L (BA 39, BA40)
3. t-критерий 4.23	66	–47	37	13	Нижняя теменная долька L Нижняя лобная извилина L (BA 9, BA46)
ДЕЛЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ*					Островковая кора L
1. t-критерий 4.29	710	–31	–75	49	Нижняя теменная долька L (BA 39, BA40)
					Угловая извилина L
					Средняя затылочная извилина L
2. t-критерий 4.43	418	–57	19	33	Нижняя лобная извилина L (BA 8, BA46)
3. t-критерий 4.40	85	–1	15	51	Средняя лобная извилина L Дополнительная двигательная зона L/R (BA 6, BA8)
4. t-критерий 4.67	79	37	–75	–53	Мозжечок R

Примечание. L – левое, R – правое, L/R – билатеральное, BA – поле по Бродману, * – $p < 0.005$ (с поправкой на множественные сравнения FDR).

Note. L – left, R – right, L/R – bilateral, BA – Brodmann area, * – $p < 0.005$ (FDR corrected).

задач на однозначное сложение в сравнении с контрольным заданием не обнаружено статистически достоверной разницы в активности мозга, что может быть связано с простотой задач на сложение и контрольного задания, которые решались очень быстро (время реакции решения задач на однозначное сложение составляет 1.275 с, контрольной задачи – 1.055 с). Был обнаружен единственный кластер в левом полушарии, охватывающий угловую извилину (BA 39) вместе с нижней теменной долькой (BA 40), активирующийся только для задачи однозначного вычитания в сравнении с контрольной задачей ($p < 0.05$). Кластер, расположенный в этой области, был самым крупным из оставшихся контрастов однозначного умножения и деления в сравнении с контрольной задачей. При решении

однозначных задач на умножение и деление дополнительно наблюдалась активность в нижней лобной извилине с левой стороны (BA 9, 46).

Изменения точности и времени реакции для решения двузначных задач по сравнению с однозначными показывают наличие эффекта уровня сложности задачи на поведенческом уровне. Как и ожидалось, двузначные задачи продемонстрировали более низкую точность решения и более длительное время реакции в сравнении с однозначными задачами. Эффект уровня сложности задачи также проявился и на уровне нейронных коррелятов. Решение более сложных задач сопровождалось более интенсивной и обширной активацией мозга, в первую очередь включающей лобно-теменную сеть корковых областей.

Таблица 2. Значимые кластеры с пиковыми координатами активности мозга у взрослых при расчете контрастов задач двузначного сложения, вычитания, умножения и деления – контрольное задание. Минимальный размер кластера составляет 50 вокселей при $p < 0.005$ (с поправкой на множественные сравнения FDR)

Table 2. Significant clusters with peak brain activity coordinates in adults when calculating contrasts for two-digit addition, subtraction, multiplication, and division tasks compared to the control task. The minimum cluster size is 50 voxels at $p < 0.005$ (with FDR correction for multiple comparisons)

Контраст/ номер кластера в порядке убывания размера	Объем, мм ³	MNI Координаты (мм ³)			Области мозга – полушарие – (поля по Бродману)
		x	y	z	
СЛОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ*					
1. t-критерий 4.81	261	−39	−57	55	Нижняя теменная долька L (BA 39)
					Угловая извилина
2. t-критерий 5.02	91	41	−47	47	Нижняя теменная долька R (BA 40)
					Угловая извилина
3. t-критерий 4.79	87	27	9	65	Верхняя лобная извилина R (BA 6)
					Средняя лобная извилина
4. t-критерий 4.67	60	37	−75	−53	Мозжечок R
ВЫЧИТАНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ*					
1. t-критерий 4.73	742	−27	−75	53	Нижняя теменная долька L (BA 7)
					Угловая извилина
2. t-критерий 6.19	381	49	−47	59	Нижняя теменная долька R (BA 7)
					Верхняя теменная долька
3. t-критерий 5.26	192	−27	11	67	Средняя лобная извилина L (BA 6)
					Верхняя лобная извилина
4. t-критерий 5.63	189	35	−71	−27	Мозжечок R
5. t-критерий 5.23	171	29	9	65	Верхняя лобная извилина R (BA 6)
					Средняя лобная извилина
6. t-критерий 5.75	113	−41	−43	−41	Мозжечок L
7. t-критерий 4.95	87	37	−79	−51	Мозжечок R
8. t-критерий 4.81	69	−59	−57	−9	Нижняя височная извилина L (BA 37)
					Средняя височная извилина
9. t-критерий 4.99	53	5	23	45	Верхняя медиальная извилина L/R (BA 8)
					Средняя поясная извилина
					Дополнительная двигательная зона
УМНОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ*					
1. t-критерий 4.07	593	−29	−77	49	Нижняя теменная долька L (BA 7)
					Средняя затылочная извилина
					Угловая извилина
2. t-критерий 4.21	572	−53	39	17	Нижняя лобная извилина L (BA 9, 46)
3. t-критерий 4.66	405	29	−81	−53	Мозжечок R

Окончание таблицы 2

Контраст/ номер кластера в порядке убывания размера	Объем, мм	MNI Координаты (мм ³)			Области мозга – полушарие – (поля по Бродману)
		x	y	z	
4. t-критерий 5.92	81	39	-47	43	Нижняя теменная долька R L (BA 40)
ДЕЛЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ*					
1. t-критерий 4.71	987	-29	-77	53	Нижняя теменная долька L (BA 7)
					Угловая извилина
2. t-критерий 5.85	216	37	-77	-51	Верхняя теменная долька
3. t-критерий 4.44	214	29	11	65	Мозжечок R
					Средняя лобная извилина R (BA 6)
4. t-критерий 4.26	138	47	-51	55	Верхняя лобная извилина
					Нижняя теменная долька R (BA 40)
5. t-критерий 4.39	91	-69	-43	19	Угловая извилина
					Средняя височная извилина L (BA 37, 39)
6. t-критерий 4.10	79	-27	13	55	Нижняя височная извилина
					Средняя лобная извилина L (BA 6)

Примечание. L – левое, R – правое, L/R – билатеральное, BA – поле по Бродману, * – $p < 0.005$ (с поправкой на множественные сравнения FDR).

Note. L – left, R – right, L/R – bilateral, BA – Brodmann area, * – $p < 0.005$ (FDR corrected).

Кластеры, зарегистрированные при решении однозначных задач, расположенные в левой угловой извилине, левой нижней теменной дольке, левой нижней лобной извилине, и стали более крупными и билатеральными. Наше исследование показывает, что в решение задач на двузначное вычитание и деление вовлечены левая нижняя и средняя височные извилины (BA 37). При решении трехзначных задач на вычитание, умножение и деление также обнаружены левосторонние кластеры в левой нижней и средней височной извилине (BA 37). Также для задач двузначного вычитания наблюдалась активность в дополнительной двигательной зоне, верхней медиальной и средней поясной извилинах (BA 6, 8).

С увеличением сложности задач время реакции увеличивается, точность падает и статистическая значимость разницы в точности между операциями становится выше. Кластеры, свойственные двузначным арифметическим задачам, в случае трехзначных задач становились более крупными, при этом самыми крупными для сложения и вычитания были кластеры в теменной коре, а для умножения и деления – в лобной коре. Дополнительная двигательная кора была вовлечена в решение всех четырех видов трехзначных арифметических задач. Нижняя и верхняя височные извилины были

активны при решении всех трехзначных арифметических задач, кроме сложения. Билатеральная островковая кора (BA 13) была вовлечена в решение самых сложных задач – трехзначных задач на деление. При решении всех двузначных и трехзначных арифметических задач, а также при решении задач однозначного деления наблюдалась активность в мозжечке, причем правосторонние кластеры во всех контрастах были более крупными.

Статистические карты выбранных контрастов в аксиальном, коронарном и сагиттальном срезах представлены на рис. 3 (а, б, в).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Контраст однозначных задач с контрольным заданием

Чувствительность метода фМРТ ограничена времененным разрешением 2–5 секунд (Glover, 2011), и даже при блочном дизайне с учетом свойств стимульного материала могло не хватить интенсивности нагрузки для выявления различий между задачами на однозначное сложение и контрольным заданием.

Таблица 3. Значимые кластеры с пиковыми координатами активности мозга у взрослых при расчете контрастов задач трехзначного сложения, вычитания, умножения и деления – контрольное задание. Минимальный размер кластера составляет 50 вокселей при $p < 0.005$ (с поправкой на множественные сравнения FDR)

Table 3. Significant clusters with peak brain activity coordinates in adults when calculating contrasts for three-digit addition, subtraction, multiplication, and division tasks compared to the control task. The minimum cluster size is 50 voxels at $p < 0.005$ (with FDR correction for multiple comparisons)

Контраст/номер кластера в порядке убывания размера	Объем, мм	MNI Координаты (мм ³)			Области мозга – полушарие – (поля по Бродману)
		x	y	z	
СЛОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ*					
1. t-критерий 4.21	605	−39	−59	57	Нижняя теменная долька L (BA 39)
					Угловая извилина
					Средняя затылочная извилина
2. 3. t-критерий 4.41	449	−53	37	23	Нижняя лобная извилина L (BA 9, 46)
t-критерий 4.22	339	47	−51	57	Нижняя теменная долька R (BA 7)
					Супрамаргинальная извилина
4. t-критерий 5.42	251	33	−79	−53	Мозжечок R
5. t-критерий 4.38	210	−1	23	45	Дополнительная двигательная зона L/R (BA 8)
					Верхняя медиальная извилина
6. t-критерий 4.31	206	29	9	65	Верхняя лобная извилина R (BA 6)
					Средняя лобная извилина
7. t-критерий 4.29	162	−27	9	67	Средняя лобная извилина L (BA 6)
					Верхняя лобная извилина
8. t-критерий 4.33	91	43	37	33	Средняя лобная извилина R (BA 9)
					Нижняя лобная извилина
9. t-критерий 4.32	76	−61	−43	49	Нижняя теменная долька L (BA 40)
10. t-критерий 4.67	51	49	−59	−33	Мозжечок R
ВЫЧИТАНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ*					
1. t-критерий 4.21	1297	−41	−61	57	Нижняя теменная долька L (BA 39)
					Угловая извилина
2. t-критерий 4.02	689	−47	53	7	Нижняя лобная извилина L (BA 9, 46)
					Средняя лобная извилина
3. t-критерий 3.88	650	−27	15	67	Средняя лобная извилина L (BA 6)
					Верхняя лобная извилина
					Прецентральная извилина
4. t-критерий 4.00	421	43	−55	59	Нижняя теменная долька R (BA 7)
					Угловая извилина
5. t-критерий 5.43	406	27	−81	−53	Мозжечок R
6. t-критерий 3.94	300	33	11	65	Верхняя лобная извилина R (BA 6)
					Средняя лобная извилина

Продолжение таблицы 3

Контраст/номер кластера в порядке убывания размера	Объ- ем, мм	MNI Координаты (мм ³)			Области мозга – полуше- рие – (поля по Бродману)
		x	y	z	
7. t-критерий 4.24	270	−1	23	47	Дополнительная двигательная зона L/R (BA 8)
					Верхняя медиальная извилина
					Верхняя лобная извилина
8. t-критерий 4.46	149	41	−73	−27	Мозжечок R
9. t-критерий 4.32	64	−41	−73	−29	Мозжечок L
10. t-критерий 3.94	64	5	−69	53	Предклинье R (BA 7)
					Верхняя теменная долька
11. t-критерий 3.90	62	−61	−59	−9	Нижняя височная извилина L (BA 37)
					Средняя височная извилина
УМНОЖЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ*					
1. t-критерий 4.01	1904	−51	45	13	Нижняя лобная извилина L (BA 9, 46)
					Прецентральная извилина
2. t-критерий 3.93	1592	−41	−61	59	Нижняя теменная долька L (BA 7, 39)
					Угловая извилина
					Средняя затылочная извилина
3. t-критерий 5.52	763	27	−81	−53	Мозжечок R
4. t-критерий 5.00	562	−1	21	49	Дополнительная двигательная зона L/R (BA 6, 8)
					Верхняя медиальная извилина
					Верхняя лобная извилина
5. t-критерий 4.09	469	−27	13	67	Средняя лобная извилина L (BA 6)
					Верхняя лобная извилина
6. t-критерий 3.83	443	45	−55	59	Нижняя теменная долька R (BA 7)
					Угловая извилина
7. t-критерий 3.91	399	31	13	65	Верхняя лобная извилина R (BA 6)
					Средняя лобная извилина
8. t-критерий 4.78	289	45	35	35	Средняя лобная извилина R (BA 9)
					Нижняя лобная извилина
9. t-критерий 4.37	278	−65	−59	−9	Нижняя височная извилина L (BA 37)
					Средняя височная извилина
10. t-критерий 4.69	101	−51	7	51	Прецентральная извилина L (BA 6)
11. t-критерий 3.92	96	5	−69	49	Предклинье R (BA 7)
12. t-критерий 4.14	95	−41	−77	−51	Мозжечок L
13. t-критерий 4.50	88	−35	−73	−29	Мозжечок L

Окончание таблицы 3

Контраст/номер кластера в порядке убывания размера	Объ- ем, мм	MNI Координаты (мм ³)			Области мозга – полуше- рие – (поля по Бродману)
		x	y	z	
ДЕЛЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ*					
1. t-критерий 5.13	1373	−1	27	43	Средняя лобная извилина L/R (BA 8)
					Дополнительная двигательная зона
					Верхняя медиальная извилина
					Верхняя лобная извилина
2. t-критерий 3.94	1371	−41	−63	59	Нижняя теменная долька L (BA 7)
					Угловая извилина
					Средняя затылочная извилина
3. t-критерий 4.72	1216	−53	25	37	Нижняя лобная извилина L (BA 8, 9)
					Средняя лобная извилина
4. t-критерий 4.73	634	37	−79	−51	Мозжечок R
5. t-критерий 4.43	567	45	−55	59	Нижняя теменная долька R (BA 7)
					Угловая извилина
					Верхняя теменная долька
6. t-критерий 4.43	410	−41	−77	−51	Мозжечок L
7. t-критерий 4.89	298	−65	−57	−9	Средняя височная извилина L (BA 37)
					Нижняя височная извилина
8. t-критерий 4.83	206	31	11	65	Верхняя лобная извилина R (BA 6)
					Средняя лобная извилина
9. t-критерий 3.86	131	45	41	33	Средняя лобная извилина R (BA 9)
10. t-критерий 4.02	130	−1	−69	49	Предклиниче L (BA 7)
11. t-критерий 4.81	125	−33	25	−5	Нижняя лобная извилина L (BA 47)
					Островковая кора
12. t-критерий 5.70	115	−33	−71	−29	Мозжечок L
13. t-критерий 4.52	96	33	25	−5	Островковая кора R (BA 13)
					Нижняя лобная извилина

Примечание. L – левое, R – правое, L/R – билатеральное, BA – поле по Бродману, * – $p < 0.005$ (с поправкой на множественные сравнения FDR).

Note. L – left, R – right, L/R – bilateral, BA – Brodmann area, * – $p < 0.005$ (FDR corrected).

Угловая извилина (BA 39) – область мозга, активность которой была ранее задокументирована в широком спектре исследований когнитивных доменов, включая математическое мышление (Seghier, 2013). Первые ассоциации между угловой извилиной и математическим познанием были выявлены в исследованиях пациентов с поражениями мозга более ста лет назад (Henschen, 1919),

когда было показано, что у людей с повреждениями теменной коры слева наблюдается дефицит арифметических навыков. С развитием методик визуализации мозга эмпирические исследования подтвердили, что угловая извилина связана с вычислениями у здоровых взрослых (Dehaene et al., 1996; Gruber et al., 2001). После этого некоторые исследования изучали точную роль угловой

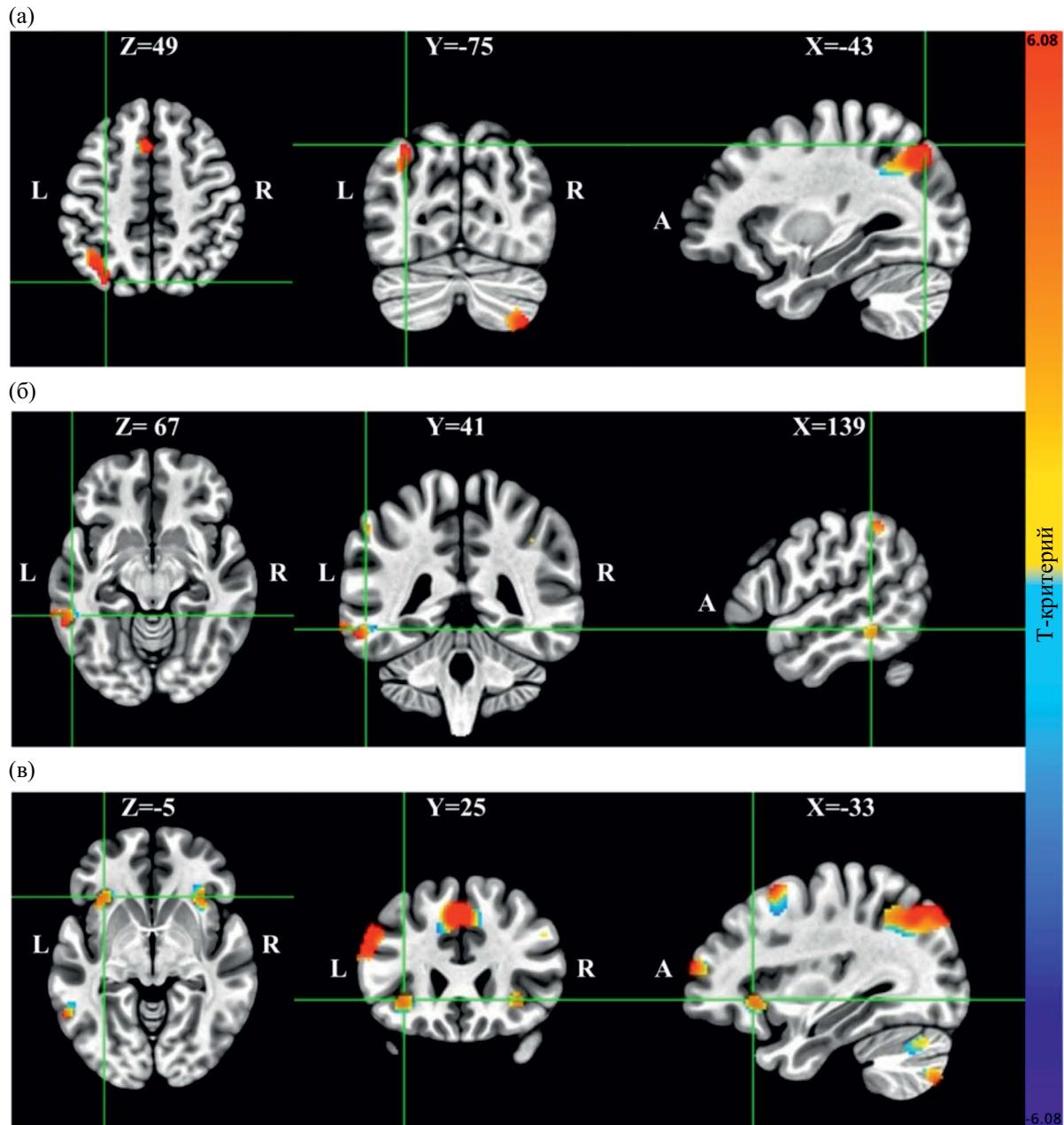


Рис. 3. Выбранные срезы в координатах (X, Y, Z) в пространстве MNI иллюстрируют активность при расчете контрастов: (а) – УРОВЕНЬ 1: ДЕЛЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ: левой нижней теменной дольки и угловой извилины (пик кластера на пересечении зеленых линий), дополнительной двигательной зоны слева и мозжечка справа; (б) – УРОВЕНЬ 2: ДЕЛЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ: левая (91voxелей – пик кластера на пересечении зеленых линий), средняя и нижняя височные извилины; (в) – УРОВЕНЬ 3: ДЕЛЕНИЕ > КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ: левая (125 voxелей – пик кластера на пересечении зеленых линий) и правая (115 voxелей) островковая кора и нижняя лобная извилина; $p < 0.005$ (с поправкой на множественные сравнения). Минимальный размер кластера составляет 50 voxелей при $p < 0.005$ (с поправкой на множественные сравнения). Примечание: L – левое, R – правое, A – переднее, P – заднее.

Fig. 3. Selected slices in (X, Y, Z) coordinates in MNI space illustrate activity when calculating contrasts: (a) LEVEL 1: DIVISION > CONTROL TASK: left inferior parietal lobule and angular gyrus (cluster peak at the intersection of the green lines), left supplementary motor area, and right cerebellum; (b) – LEVEL 2: DIVISION > CONTROL TASK: left (91 voxels – cluster peak at the intersection of the green lines), middle and inferior temporal gyri; (c) – LEVEL 3: DIVISION > CONTROL TASK: left (125 voxels – cluster peak at the intersection of the green lines) and right (115 voxels) insular cortex and inferior frontal gyrus; $p < 0.005$ (with correction for multiple comparisons). The minimum cluster size is 50 voxels at $p < 0.005$ (with correction for multiple comparisons). Note: L – left, R – right, A – anterior, P – posterior.

извилины в различных аспектах математического познания, таких как обработка числовых символов (Holloway et al., 2010; Sokolowski et al., 2023), понимание числовой оси (Göbel et al., 2014), арифметика (Zamarian et al., 2009) и сложные математические задачи (Liu et al., 2019). Хотя угловая извилина связана с широким спектром базовых и продвинутых математических навыков, только ее связь с решением арифметических задач имеет последовательные, воспроизведимые и хорошо документированные доказательства. Объяснением этих расхождений в интерпретациях роли угловой извилины в арифметике является латерализация ее функций: левая угловая извилина важна для вербальной памяти (Grabner et al., 2013), в то время как правая угловая извилина поддерживает визуально-пространственную память во время решения задач на арифметические операции (Arsalidou, Taylor, 2011).

Билатеральные верхняя и нижняя теменные доли (BA 7, 40) последовательно связаны с базовой обработкой чисел и величин, что было показано как в отдельных эмпирических исследованиях, так и на метааналитическом уровне (например, Cohen Kadosh, Walsh, 2009; Fias et al., 2003; Holloway et al., 2010; Sokolowski et al., 2017). Более того, активация билатеральных теменных долек ассоциируется с обработкой величин даже при отсутствии задач, что предполагает, что эти области могут быть связаны с представлением величин, а не с принятием решений или моторной обработкой (Sokolowski et al., 2021).

Активность в нижней лобной извилине с левой стороны (BA 9, 46) связывается с когнитивными функциями высокого уровня, включая исполнительные функции, рабочую память, умственные манипуляции (Gabrieli et al., 1998; Owen et al., 2005), ингибиторный (интерференционный) контроль (Brown et al., 2023) и когнитивную гибкость (Sundby et al., 2021).

4.2. Конtrast двузначных задач с контролльным заданием

Лобно-теменная сеть включает в себя области мозга, главным образом действующие латеральную лобную и заднюю теменную кору, включая дорсолатеральную префронтальную кору и нижнюю теменную доли. Эта сеть участвует в различных когнитивных процессах, таких как рабочая память и принятие решений (Vincent et al., 2008; Yaple et al., 2021).

В решение задач на двузначное вычитание и деление вовлечены левая нижняя и средняя височные извилины (BA 37), которые являются центром так называемой семантической сети. Предположение о том, что средняя височная извилина слева может быть вовлечена в запоминание именно арифметических данных, согласуется с ее известной ролью

в представлении лексико-семантической информации (Li et al., 2003; Blumenfeld et al., 2006). С возрастом, когда люди активнее применяют семантические суждения о словах, активность этой области становится более заметна (Chou et al., 2006). Таким образом, увеличение активности в левой средней височной извилине может отражать усиление семантических ассоциаций между арифметическими задачами на вычитание и деление и их решениями. Это согласуется с исследованиями, показывающими, что концептуальное понимание математики (например, математические рассуждения и решение задач) в значительной степени зависит от семантической сети (Cheng et al., 2022). Например, было показано, что повреждение семантической сети влияет на то, как люди обрабатывают математические вычисления, а пациенты с височной эпилепсией, у которых были трудности с пониманием значений слов, могли легко выполнять простые арифметические задачи (например, однозначное сложение и вычитание), но не могли применять математические правила к более сложным символическим задачам (Delazer et al., 2004). Это говорит о том, что семантическая сеть может помочь в понимании и использовании математических концепций (Li et al., 2003). Многочисленные поведенческие исследования показывают, что стратегия, используемая для решения арифметических задач, зависит от типа операции (Lemaire, Arnaud, 2008; Metcalfe, Campbell, 2011). Хотя полученные результаты противоречат связи между левой нижней и средней височными извилинями (BA 37) и решением только легких задач (Sokolowski et al., 2023), они, по-видимому, соответствуют результатам исследований типичных взрослых, которые с большей вероятностью решают более сложные задачи на вычитание, манипулируя отношениями между числами, что требует доступа к семантическому значению количеств, стоящих за числами (Threlfall, 2009). Необходимы дальнейшие исследования для расшифровки повлиявшим на результаты факторов, которые могут быть чем угодно, от выбора стратегии решения сложных арифметических задач до генетики.

Дополнительная двигательная зона (BA 6) представляет собой область, расположенную в задней трети верхней лобной извилины, на медиальной поверхности передней двигательной коры. Дополнительная двигательная зона обычно ассоциируется с планированием последовательности движений, моторным обучением, визуальным восприятием движения. Эта зона расположена в медиальной части лобной доли, поэтому чаще всего кластеры в этой области являются билатеральными. Недавние исследования показали, что дополнительная двигательная зона также связана с когнитивными функциями (Ruan et al., 2018; Obayashi, 2022; Elmers et al., 2024). Исследования повреждений, затрагивающих эту область,

сообщали о наблюдаемых дефицитах рабочей памяти (Canas et al., 2018). Некоторые исследования сообщают, что дополнительная двигательная зона является частью сети, поддерживающей рабочую память (Rottschy et al., 2012; Rempel et al., 2021) и когнитивную гибкость (Dibbets et al., 2010; Rodríguez-Nieto et al., 2022). В исследованиях арифметических операций активность в дополнительной двигательной зоне была зарегистрирована при решении задач на вычитание в сравнении с умножением и, наоборот (Zarnhofer et al., 2012), вычитанием в сравнении со сложением и вычитанием в сравнении с контрольным заданием (Yang et al., 2017), а также других арифметических задач (Skagenholt et al., 2018; Wang et al., 2022).

4.3. Контраст трехзначных задач с контрольным заданием

Мы обнаружили вовлечение билатеральной островковой коры (BA 13) в решение трехзначных задач на деление, что может быть связано с повышенными усилиями, прилагаемыми участниками во время этих действительно сложных задач (Hawes et al., 2019), или одновременно с эмоциональными переживаниями (высокая мотивация, стресс) при рискованном принятии решений (Uddin et al., 2017). Некоторые эмпирические исследования документируют участие островковой коры в своих результатах (Soylu et al., 2018). Представленный в исследовании (Uddin et al., 2017) анализ структуры и функций островковой коры указывает на включение этой области в разные процессы: сенсомоторные (например, восприятие звуковых сигналов), социоэмоциональные (принятие рискованных решений, эмоциональное переживание), а также процессы когнитивной обработки информации (внимание, речь). На сегодняшний день неспецифичная для математического познания роль островковой коры была также подтверждена (Zhang et al., 2024).

4.4. Мозжечок

Мозжечок участвует в широком спектре когнитивных функций, значительно выходящих за пределы его традиционной связи с сенсомоторным контролем (Ivry, Baldo, 1992; Middleton, Strick, 1994; King et al., 2019; Prati et al., 2024). Исследования пациентов с поражением мозжечка и базальных ганглиев выявили нарушения, распространяющиеся на различные когнитивные функции (Knowlton et al., 1996; Middleton, Strick, 2000). В настоящее время имеется множество данных визуализации мозга, показывающих участие мозжечка в создании мысленных образов (Lotze et al., 1999), сенсорной дискриминации (Doya, 2000; Narayanan, Thirumalai, 2019), внимании (Mannarelli et al.,

2023), рабочей памяти (Emch et al., 2019), исполнительных функциях (Saarikivi et al., 2023) и речи (Leiner et al., 1993; Van Overwalle et al., 2023). Также существуют свидетельства вовлечения мозжечка в переживание эмоциональных процессов, таких как счастье, гнев, страх, печаль и отвращение (Baumann, Mattingley, 2012; Klaus, Schutter, 2021), а недавний метаанализ подтвердил участие различных долек мозжечка в аффективных функциях (Pierce et al., 2023). Активность мозжечка во время решения как однозначных, так и более сложных арифметических операций у взрослых была зафиксирована на метааналитическом уровне (Arsalidou, Taylor, 2011). Мы можем предположить, что мозжечок может играть роль в установлении последовательности действий при решении арифметических задач повышенной сложности, поэтому размер кластеров увеличивался с увеличением сложности задачи. Действительно, серия ПЭТ- и фМРТ-исследований показала вовлечение мозжечка в планирование действий (Kim et al., 1994; Shipman, Green, 2020). Несколько метаанализов (Stoodley, Schmahmann, 2009; Emch et al., 2019) выявили наличие латерализации в функциональной организации мозжечка: доли правого полушария участвуют в вербальной обработке, а доли левого полушария – в визуально-пространственной обработке. Более того, Emch и др. (2019) установили, что активация правых долек мозжечка зависит от сложности задач рабочей памяти у взрослых, что может быть объяснено связями между дольками мозжечка и лобными областями. Таким образом, различия в активации долек мозжечка могут частично объясняться различными стратегиями удержания промежуточных результатов (Ivanitskii et al., 2013).

Суммируя полученные результаты, можно отметить следующее. Различные области мозга связаны с решением математических задач разного типа и разного уровня сложности у взрослых: (а) в целом арифметические операции активируют схожие области мозга, что согласуется с предыдущими исследованиями; (б) при решении однозначных задач на вычитание, умножение и деление наблюдалось вовлечение левой нижней теменной дольки (BA 40), левой угловой извилины (BA 39); дополнительно при решении легких задач на деление обнаружена активность в нижней лобной извилине (BA 46); (в) при решении более сложных задач на все четыре арифметические операции активность в левой нижней теменной дольке (BA 40) и левой угловой извилине (BA 39) становилась билатеральной и более интенсивной, дополнительно стали вовлечены такие билатеральные структуры, как нижняя лобная извилина (BA 46), верхняя лобная извилина (BA 6), дополнительная двигательная зона (BA 8), нижняя средняя и височная извилины (BA 37); (г) билатеральное вовлечение островковой коры (BA 13)

головного мозга обнаруживается исключительно при решении самых сложных задач на трехзначное деление; (д) наблюдалось вовлечение мозжечка при решении всех типов двузначных и трехзначных задач, причем правосторонние кластеры более крупные, чем левосторонние, для всех контрастов.

5. ВЫВОДЫ

В настоящем исследовании определялась активность мозга, связанная с базовыми математическими операциями различного уровня сложности. Насколько нам известно, это первое исследование, показывающее активность мозга во время устного счета (без использования письменных принадлежностей) задач на четыре арифметические операции (сложение, вычитание, умножение и деление) с тремя уровнями сложности у здоровых взрослых. В целом результаты свидетельствуют о том, что для выполнения сложения, вычитания, умножения и деления в уме требуется участие множества областей мозга, и их степень вовлечения модулируется больше сложностью задачи, нежели типом арифметической операции (Arsalidou et al., 2019). Это указывает на то, что решение задач на различные арифметические операции требует применения как схожих стратегий зрительного восприятия и использования долговременной памяти, так и отличающихся стратегий, связанных с процедурным решением задач, таких как планирование последовательности действий, вербальная репетиция при решении когнитивных задач, выполнение заимствования или переноса, разбиение задачи на более мелкие компоненты, переход между разными арифметическими операциями и одновременный контроль промежуточных результатов при манипуляции дополнительной информацией. Результаты исследования дополняют существующие знания о нейрокартировании математического мышления взрослых.

6. ОГРАНИЧЕНИЯ

Данное исследование имеет несколько потенциальных ограничений. Окончательный размер выборки в 20 человек после предобработки данных является нижней границей для фМРТ-исследований – это может влиять как на количество ложноотрицательных активаций, так и на уровень статистической значимости для контроля ложноположительных результатов. Еще одним значительным ограничением является движение головы испытуемых во время сбора данных, что создает артефакты в изображениях мозга и может влиять на достоверность результатов. Для контроля эффекта этих артефактов были применены строгие критерии исключения испытуемых на этапе предобработки данных. Испытуемые,

у которых амплитуда движения превышала размер вокселя более чем в 5% точек временного ряда BOLD-сигнала, были исключены из последующего анализа (в среднем 7 из 260 объемов).

ВКЛАД АВТОРОВ

А.В. Истомина, М. Арсалиду – концептуализация, методология; А.В. Истомина – сбор и курирование данных; А.В. Истомина, А.Ю. Фабер – проведение анализа данных; А.В. Манжурцев, М.В. Ублинский – техническая помощь в настройке МРТ-протокола и сборе данных; А.В. Истомина – обсуждение результатов исследования; А.В. Истомина, А.Ю. Фабер – написание текста статьи и редактирование; М. Арсалиду – администрирование и руководство работой. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы выражаем благодарность взрослым, которые добровольно приняли участие в исследовании. Мы также признательны Ирине Сергеевне Буяновой и Жанне Владимировне Чуйковой за помощь в сборе данных МРТ. Мы благодарим Ксению Витальевну Конопкину за создание стимулов для ПМЗ. Мы признательны Толибжону Абдулаевичу Ахадову за предоставление нам возможностей проведения МРТ-сканирований в ГБУЗ «НИИ неотложной детской хирургии и травматологии» Департамента здравоохранения города Москвы. Мы благодарим Ольгу Владимировну Мартынову за ценные рекомендации по улучшению манускрипта.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Исследование соответствовало Этическим принципам Хельсинкской декларации, эксперимент был одобрен Этическим комитетом НИУ ВШЭ, Москва.

УКАЗАНИЕ НА ДОСТУПНОСТЬ ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ

Первичные данные ранее не располагались в репозитории, могут быть предоставлены по запросу.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Дополнительные материалы см.: <https://jvnd.ru/supplemental-materials/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Arsalidou M., Pascual-Leone J., Johnson J., Kotova T.* The constructive operators of the working mind: a developmental account of mental-attentional capacity. *Russ. J. Cogn. Sci.* 2019. 6 (44–55): 3061–3079.
- Arsalidou M., Taylor M.J.* Is $2 + 2 = 4$? Meta-analyses of brain areas needed for numbers and calculations. *Neuroimage.* 2011. 54 (3): 2382–2393. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.10.009>
- Artemenko C.* Developmental fronto-parietal shift of brain activation during mental arithmetic across the lifespan: A registered report protocol. *Plos One.* 2021. 16 (8):e0256232. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256232>
- Baumann O., Mattingley J.B.* Scaling of neural responses to visual and auditory motion in the human cerebellum. *Journal of Neuroscience.* 2010. 30(12):4489–95. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5661-09.2010>
- Bloechle J., Huber S., Bahnmueller J., Rennig J., Willmes K., Cavdaroglu S., Moeller K., Klein E.* Fact learning in complex arithmetic – the role of the angular gyrus revisited. *Human Brain Mapping.* 2016. 37 (9):3061–79. <https://doi.org/10.1002/hbm.23226>
- Blumenfeld H.K., Booth J.R., Burman D.D.* Differential prefrontal-temporal neural correlates of semantic processing in children. *Brain and language.* 2006. 99 (3):226–35. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2005.07.004>
- Brown A.A., Upton S., Craig S., Froeliger B.* Associations between right inferior frontal gyrus morphometry and inhibitory control in individuals with nicotine dependence. *Drug and alcohol dependence.* 2023. 244:109766. <https://doi.org/10.1016/j.drugalcdep.2023.109766>
- Burns M.* About teaching mathematics: A K-8 resource. Math Solutions Publications, Marilyn Burns Education Associates. 2000.
- Byers W.* How mathematicians think: Using ambiguity, contradiction, and paradox to create mathematics. Princeton University Press. 2010.
- Caballero-Gaudes C., Reynolds R.C.* Methods for cleaning the BOLD fMRI signal. *Neuroimage.* 2017. 154:128–49. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.12.018>
- Cañas A., Juncadella M., Lau R., Gabarrós A., Hernández M.* Working memory deficits after lesions involving the supplementary motor area. *Frontiers in psychology.* 2018. 9:765. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00765>
- Caviola S., Mammarella I.C., Cornoldi C., Lucangeli D.* The involvement of working memory in children's exact and approximate mental addition. *Journal of experimental child psychology.* 2012. 112 (2):141–60. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.02.005>
- Chen G., Saad Z.S., Nath A.R., Beauchamp M.S., Cox R.W.* FMRI group analysis combining effect estimates and their variances. *Neuroimage.* 2012. 60(1):747–65. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.12.060>
- Cheng D., Li M., Cui J., Wang L., Wang N., Ouyang L., Wang X., Bai X., Zhou X.* Algebra dissociates from arithmetic in the brain semantic network. *Behavioral and Brain Functions.* 2022. 18(1): 1. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-806057/v1>
- Chin K.E., Pierce R.* University students' conceptions of mathematical symbols and expressions. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education.* 2019. 15 (9). <https://doi.org/10.29333/ejmste/103736>
- Chou T.L., Booth J.R., Bitan T., Burman D.D., Bigio J.D., Cone N.E., Lu D., Cao F.* Developmental and skill effects on the neural correlates of semantic processing to visually presented words. *Human brain mapping.* 2006. 27 (11):915–24. doi: 10.1002/hbm.20231
- Cox R.W.* AFNI: software for analysis and visualization of functional magnetic resonance neuroimages. *Computers and Biomedical research.* 1996. 29 (3):162–73. <https://doi.org/10.1006/cbmr.1996.0014>
- De Smedt B., Boets B.* Phonological processing and arithmetic fact retrieval: Evidence from developmental dyslexia. *Neuropsychologia.* 2010. 48 (14):3973–81. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.10.018>
- De Visscher A., Vogel S.E., Reishofer G., Hassler E., Koschutnig K., De Smedt B., Grabner R.H.* Interference and problem size effect in multiplication fact solving: Individual differences in brain activations and arithmetic performance. *NeuroImage.* 2018. 172:718–27. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.01.060>
- Dehaene S., Tzourio N., Frak V., Raynaud L., Cohen L., Mehler J., Mazoyer B.* Cerebral activations during number multiplication and comparison: a PET study. *Neuropsychologia.* 1996. 34 (11):1097–106. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(96\)00027-9](https://doi.org/10.1016/0028-3932(96)00027-9)
- Delazer M., Domahs F., Lochy A., Karner E., Benke T., Poewe W.* Number processing and basal ganglia dysfunction: a single case study. *Neuropsychologia.* 2004. 42(8):1050–62. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.12.009>
- Deschuyteneer M., de Rammelaere S., Fias W.* The addition of two-digit numbers: Exploring carry versus no-carry problems. *Psychology Science.* 2005. 47(1):74–83.

- Dibbets P., Evers E.A., Hurks P.P., Bakker K., Jolles J. Differential brain activation patterns in adult attention-deficit hyperactivity disorder (ADHD) associated with task switching. *Neuropsychology*. 2010. 24 (4):732–9. <https://doi.org/10.1037/a0018997>
- Doya K. Complementary roles of basal ganglia and cerebellum in learning and motor control. *Current opinion in neurobiology*. 2000. 10 (6):732–9. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(00\)00153-7](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(00)00153-7)
- Elmers J., Yu S., Talebi N., Prochnow A., Beste C. Neurophysiological effective network connectivity supports a threshold-dependent management of dynamic working memory gating. *Iscience*. 2024. 27 (4). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109521>
- Emch M., von Bastian C.C., Koch K. Neural correlates of verbal working memory: An fMRI meta-analysis. *Frontiers in human neuroscience*. 2019. 13:180. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00180>
- Fagginger Auer M.F., Hickendorff M., Putten C.M. V. Training can increase students' choices for written solution strategies and performance in solving multi-digit division problems. *Frontiers in Psychology*. 2018. 9: 1644. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01644>
- Fehr T., Code C., Herrmann M. Common brain regions underlying different arithmetic operations as revealed by conjunct fMRI-BOLD activation. *Brain research*. 2007. 1172:93–102. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2007.07.043>
- Fias W., Lammertyn J., Reynvoet B., Dupont P., Orban G.A. Parietal representation of symbolic and nonsymbolic magnitude. *Journal of cognitive neuroscience*. 2003. 15 (1):906–13. <https://doi.org/10.1162/089892903321107819>
- Froeling M. QMRTTools: a Mathematica toolbox for quantitative MRI analysis. *Journal of Open Source Software*. 2019. 4 (38):1204. DOI:10.21105/JOSS.01204
- Gabrieli J.D., Poldrack R.A., Desmond J.E. The role of left prefrontal cortex in language and memory. *Proceedings of the national Academy of Sciences*. 1998. 95 (3):906–13. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.3.906>
- Göbel S.M., Terry R., Klein E., Hymers M., Kaufmann L. Impaired arithmetic fact retrieval in an adult with developmental dyscalculia: evidence from behavioral and functional brain imaging data. *Brain Sciences*. 2022. 12 (6). <https://doi.org/10.3390/brainsci12060735>
- Göbel S.M., Watson S.E., Lervag A., Hulme C. Children's arithmetic development: It is number knowledge, not the approximate number sense, that counts. *Psychological science*. 2014. 25 (3):789–98. <https://doi.org/10.1177/0956797613516471>
- Glen D.R., Taylor P.A., Buchsbaum B.R., Cox R.W., Reynolds R.C. Beware (surprisingly common) left-right flips in your MRI data: an efficient and robust method to check MRI dataset consistency using AFNI. *Frontiers in neuroinformatics*. 2020. 505994. <https://doi.org/10.3389/fninf.2020.00018>
- Glikzman Y., Berebbi S., Henik A. Math fluency during primary school. *Brain Sciences*. 2022. 12 (3). <https://doi.org/10.3390/brainsci12030371>
- Glover G.H. Overview of functional magnetic resonance imaging. *Neurosurgery Clinics*. 2011. 22 (2):133–9. <https://doi.org/10.1016/j.nec.2010.11.001>
- Grabner R.H., Ansari D., Koschutnig K., Reishofer G., Ebner F. The function of the left angular gyrus in mental arithmetic: evidence from the associative confusion effect. *Human brain mapping*. 2013. 34 (5):1013–24. <https://doi.org/10.1002/hbm.21489>
- Gruber O., Indefrey P., Steinmetz H., Kleinschmidt A. Dissociating neural correlates of cognitive components in mental calculation. *Cerebral cortex*. 2001. 11 (4):350–9. <https://doi.org/10.1093/cercor/11.4.350>
- Harada T., Bridge D.J., Chiao J.Y. Dynamic social power modulates neural basis of math calculation. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2013. 6:350. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00350>
- Hawes Z., Sokolowski H.M., Ononye C.B., Ansari D. 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*. 2019. 103:316–36. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.05.007>
- Henschen S.E. Über sprach-, musik- und rechenmechanismen und ihre lokalisierungen im großhirn. *Zeitschrift für die gesamte Neurologie und Psychiatrie*. 1919. 52:273–98. <https://doi.org/10.1007/BF02872428>
- Holloway I.D., Price G.R., Ansari D. Common and segregated neural pathways for the processing of symbolic and nonsymbolic numerical magnitude: An fMRI study. *Neuroimage*. 2010. 49 (1):1006–17. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.07.071>
- Huber S., Fischer U., Moeller K., Nuerk H.C. On the interrelation of multiplication and division in secondary school children. *Frontiers in psychology*. 2013. 4:740. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00740>
- Imbo I., LeFevre J. A. The role of phonological and visual working memory in complex arithmetic for Chinese and Canadian educated adults. *Memory, Cognition*. 2010. 38(2):176–85. <https://doi.org/10.3758/MC.38.2.176>
- Imbo I., Vandierendonck A., Vergauwe E. The role of working memory in carrying and borrowing. *Psychological research*. 2007. 71 (4):467–83. <https://doi.org/10.1007/s00426-006-0044-8>
- Ischebeck A., Zamarian L., Schocke M., Delazer M. Flexible transfer of knowledge in mental arithmetic. An fMRI study. *Neuroimage*. 2009. 44 (3):1103–12. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.10.025>
- Istomina A., Arsalidou M. Add, subtract and multiply: Meta-analyses of brain correlates of arithmetic operations in children and adults. *Developmental Cognitive Neuroscience*. 2024. 101419. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2024.101419>

- Ivanitskiĭ A.M., Portnova G.V., Martynova O.V., Maiorescu L.A., Fedina O.N., Petrushevskii A.G. Ivanitskiĭ A.M., Portnova G.V., Martynova O.V., Maiorescu L.A., Fedina O.N., Petrushevskii A.G.* Brain mapping in verbal and spatial thinking. *Zhurnal Vyshei Nervnoi Deiatelnosti Imeni I.P. Pavlova.* 2013. 63 (6):677–86.
<https://doi.org/10.7868/s0044467713060075>
- Ivry R.B., Baldo J.V.* Is the cerebellum involved in learning and cognition? *Current opinion in neurobiology.* 1992. 2 (2):212–6.
[https://doi.org/10.1016/0959-4388\(92\)90015-D](https://doi.org/10.1016/0959-4388(92)90015-D)
- Kadosh R.C., Walsh V.* Numerical representation in the parietal lobes: Abstract or not abstract? *Behavioral and brain sciences.* 2009. 32 (3–4):313–28.
<https://doi.org/10.1017/S0140525X09990938>
- Kim S.G., Uğurbil K., Strick P.L.* Activation of a cerebellar output nucleus during cognitive processing. *Science.* 1994. 265 (5174):949–51.
doi: 10.1126/science.8052851
- King M., Hernandez-Castillo C. R., Poldrack R.A., Ivry R.B., Diedrichsen J.* Functional boundaries in the human cerebellum revealed by a multi-domain task battery. *Nature neuroscience.* 2019. 22 (8):1371–8.
<https://doi.org/10.1038/s41593-019-0436-x>
- Klaus J., Schutter D.J.* Functional topography of anger and aggression in the human cerebellum. *NeuroImage.* 2021. 226. 117582.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117582>
- Knowlton B.J., Mangels J.A., Squire L.R.* A neostriatal habit learning system in humans. *Science.* 1996. 273(5280):1399–402.
doi: 10.1126/science.273.5280.1399
- Konopkina K., Arsalidou M.* Brain areas associated with basic mathematical operations. *Organization for Human Brain Mapping, Annual Conference.* 2019.
- Leiner H.C., Leiner A.L., Dow R.S.* Cognitive and language functions of the human cerebellum. *Trends in neurosciences.* 1993. 16 (11):444–7.
[https://doi.org/10.1016/0166-2236\(93\)90072-T](https://doi.org/10.1016/0166-2236(93)90072-T)
- Lemaire P., Arnaud L.* Young and older adults' strategies in complex arithmetic. *The American journal of psychology.* 2008. 121 (1):1–6.
<https://doi.org/10.2307/20445440>
- Lemaire P.* How Distracting Events Influence Young and Older adults' Arithmetic Performance? *Experimental Aging Research.* 2023. 1–20.
<https://doi.org/10.1080/0361073X.2023.2250224>
- Li M., Lu Y., Zhou X.* The involvement of the semantic neural network in rule identification of mathematical processing. *Cortex.* 2023. 164:11–20.
<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2023.03.010>
- Liu J., Yuan L., Chen C., Cui J., Zhang H., Zhou X.* The semantic system supports the processing of mathematical principles. *Neuroscience.* 2019. 404:491–501.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2019.01.043>
- Lotze M., Montoya P., Erb M., Hülsmann E., Flor H., Klose U., Birbaumer N., Grodd W.* Activation of cortical and cerebellar motor areas during executed and imagined hand movements: an fMRI study. *Journal of cognitive neuroscience.* 1999. 11(5):491–501.
<https://doi.org/10.1162/089892999563553>
- Mannarelli D., Pauletti C., Missori P., Trompetto C., Cotellessa F., Fattapposta F., Currà A.* Cerebellum's Contribution to Attention, Executive Functions and Timing: Psychophysiological Evidence from Event-Related Potentials. *Brain Sciences.* 2023. 13 (12):1683.
<https://doi.org/10.3390/brainsci13121683>
- Matejko A.A., Ansari D.* The neural association between arithmetic and basic numerical processing depends on arithmetic problem size and not chronological age. *Developmental Cognitive Neuroscience.* 2019. 37:100653.
<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100653>
- Mauro D.G., Le Feuvre J.A., Morris J.* Effects of problem format on division and multiplication performance: division facts are mediated via multiplication-based representations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition.* 2003. 29 (2):163.
<https://doi.org/10.1037/0278-7393.29.2.163>
- McCloskey M., Caramazza A., Basili A.* Cognitive mechanisms in number processing and calculation: Evidence from dyscalculia. *Brain and cognition.* 1985. 4(2):171–196.
[https://doi.org/10.1016/0278-2626\(85\)90069-7](https://doi.org/10.1016/0278-2626(85)90069-7)
- Metcalfe A.W., Campbell J.I.* Adults' strategies for simple addition and multiplication: Verbal self-reports and the operand recognition paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition.* 2011. 37(3):661.
- Middleton F.A., Strick P.L.* Anatomical evidence for cerebellar and basal ganglia involvement in higher cognitive function. *Science.* 1994. 266 (5184):458–61.
doi: 10.1126/science.7939688
- Middleton F.A., Strick P.L.* Basal ganglia and cerebellar loops: motor and cognitive circuits. *Brain research reviews.* 2000. 31 (2–3):236–50.
[https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(99\)00040-5](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(99)00040-5)
- Moore A.M., Rudig N.O., Ashcraft M.H.* Affect, motivation, working memory, and mathematics. 2014.
<https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199642342.013.004>
- Narayanan S., Thirumalai V.* Contributions of the cerebellum for predictive and instructional control of movement. *Current opinion in physiology.* 2019. 8:146–151.
<https://doi.org/10.1016/j.cophys.2019.01.011>
- Nuerk H.C., Willmes K., Fischer M.H.* Multi-digit number processing. *Zeitschrift für Psychologie.* 2015.
<https://doi.org/10.1027/2151-2604/a000040>
- Mikheev I., Steiner H., Martynova O.* Detecting cognitive traits and occupational proficiency using EEG and statistical inference. *Scientific Reports.* 2024. 14 (1):5605.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-55163-w>
- Mikl M., Mareček R., Hluštík P., Pavlicová M., Drastich A., Chlebus P., Brázdil M., Krupa P.* Effects of spatial smoothing on fMRI group inferences. *Magnetic resonance imaging.* 2008. 26 (4):490–503.
<https://doi.org/10.1016/j.mri.2007.08.006>

- Molina del Río J., Guevara M.A., Hernández González M., Hidalgo Aguirre R.M., Cruz Aguilar M.A.* EEG correlation during the solving of simple and complex logical-mathematical problems. *Cognitive, Affective, Behavioral Neuroscience*. 2019. 19:1036–46.
<https://doi.org/10.3758/s13415-019-00703-5>
- Moustafa A.A., Tindle R., Ansari Z., Doyle M.J., Hewedi D.H., Eissa A.* Mathematics, anxiety, and the brain. *Reviews in the Neurosciences*. 2017. 28 (4):417–29.
<https://doi.org/10.1515/revneuro-2016-0065>
- Obayashi S.* Cognitive and linguistic dysfunction after thalamic stroke and recovery process: possible mechanism. *AIMS neuroscience*. 2022. 9 (1). 10.3934/Neuroscience.2022001
- Owen A.M., McMillan K. M., Laird A.R., Bullmore E.* N-back working memory paradigm: A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human brain mapping*. 2005. 25 (1):46–59.
- Peters G., De Smedt B., Torbeyns J., Ghesquière P., Verschaffel L.* Adults' use of subtraction by addition. *Acta Psychologica*. 2010. 135 (3):323–9.
<https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.08.007>
- Pierce J.E., Thomasson M., Voruz P., Selosse G., Peron J.* Explicit and implicit emotion processing in the cerebellum: a meta-analysis and systematic review. *The Cerebellum*. 2023. 22 (5):852–64.
<https://doi.org/10.1007/s12311-022-01459-4>
- Pletzer B.* Sex differences in number processing: differential systems for subtraction and multiplication were confirmed in men, but not in women. *Scientific reports*. 2016. 6 (1):39064.
<https://doi.org/10.1038/srep39064>
- Pollack C., Ashby N.C.* Where arithmetic and phonology meet: the meta-analytic convergence of arithmetic and phonological processing in the brain. *Developmental cognitive neuroscience*. 2018. 30:251–64.
<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.05.003>
- Power J.D., Plitt M., Laumann T.O., Martin A.* Sources and implications of whole-brain fMRI signals in humans. *Neuroimage*. 2017. 146:136–208.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.09.038>
- Prati J.M., Pontes-Silva A., Gianlorenço A.C.* The cerebellum and its connections to other brain structures involved in motor and non-motor functions: a comprehensive review. *Behavioural Brain Research*. 2024. 114933.
<https://doi.org/10.1016/j.bbr.2024.114933>
- Rempel S., Colzato L., Zhang W., Wolff N., Mückschel M., Beste C.* Distinguishing multiple coding levels in theta band activity during working memory gating processes. *Neuroscience*. 2021. 478:11–23.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2021.09.025>
- Ritchie S.J., Bates T.C.* Enduring links from childhood mathematics and reading achievement to adult socioeconomic status. *Psychological science*. 2013. 24 (7):1301–8.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2021.09.025>
- Rodríguez-Nieto G., Seer C., Sidlauskaitė J., Vleugels L., Van Roy A., Hardwick R., Swinnen S.* Inhibition, shifting and updating: Inter and intra-domain commonalities and differences from an executive functions activation likelihood estimation meta-analysis. *NeuroImage*. 2022. 264. 119665.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119665>
- Rosenberg-Lee M., Barth M., Menon V.* What difference does a year of schooling make? Maturation of brain response and connectivity between 2nd and 3rd grades during arithmetic problem solving. *Neuroimage*. 2011. 57 (3):796–808.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.05.013>
- Rottschy C., Langner R., Dogan I., Reetz K., Laird A.R., Schulz J.B., Eickhoff S.B.* Modelling neural correlates of working memory: A coordinate based meta-analysis. *NeuroImage*. 2012. 60. 830–846.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.05.013>
- Ruan J., Bludau S., Palomero-Gallagher N., Caspers S., Mohlberg H., Eickhoff S.B., Seitz R.J., Amunts K.* Cytarchitectural, probability maps, and functions of the human supplementary and pre-supplementary motor areas. *Brain structure, function*. 2018. 223 (9): 4169–4186.
<https://doi.org/10.1007/s00429-018-1738-6>
- Saad Z.S., Chen G., Reynolds R.C., Christidis P.P., Hammert K.R., Bellgowan P.S., Cox R.W.* Functional imaging analysis contest (FIAC) analysis according to AFNI and SUMA. *Human brain mapping*. 2006. 27 (5): 417–424.
doi: 10.1002/hbm.20247
- Saarikivi K., Chan T.M., Huotilainen M., Tervaniemi M., Putkinen V.* Enhanced neural mechanisms of set shifting in musically trained adolescents and young adults: converging fMRI, EEG, and behavioral evidence. *Cerebral Cortex*. 2023. 33 (11):7237–49.
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhad034>
- Safiatu O.A., Prastiti T.D.* On division operation of any numbers: introducing a new technique. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1836. № 1. P. 012055). IOP Publishing. 2011. 7237–49.
doi: 10.1088/1742-6596/1836/1/012055
- Seghier M.L.* The angular gyrus: multiple functions and multiple subdivisions. *The Neuroscientist*. 2013. 19 (1):43–61.
<https://doi.org/10.1177/1073858412440596>
- Sekeris E., Verschaffel L., Luwel K.* Exact arithmetic, computational estimation and approximate arithmetic are different skills: Evidence from a study with 5 year olds. *Infant and Child Development*. 2021. 30 (5).
<https://doi.org/10.1002/icd.2248>
- Shipman M.L., Green J.T.* Cerebellum and cognition: does the rodent cerebellum participate in cognitive functions? *Neurobiology of learning and memory*. 2020. 170:106996.
<https://doi.org/10.1016/j.nlm.2019.02.006>
- Sitnikova M., Marakshina J.A., Adamovich T.V., Pronin G.O., Asadullaev R.G.* The neural correlates of exact calculation in word and numerical formats in low and high math performers: a fNIRS study. *International Journal of Cognitive Research in Science, Engineering and Education: (IJCSEE)*. 2023. 11 (1):93–114.

- Skagenholt M., Träff U., Västfjäll D., Skagerlund K.* Examining the Triple Code Model in numerical cognition: An fMRI study. *PLoS One*. 2018. 13 (6):e0199247. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199247>
- Sokolowski H.M., Fias W., Mousa A., Ansari D.* Common and distinct brain regions in both parietal and frontal cortex support symbolic and nonsymbolic number processing in humans: A functional neuroimaging meta-analysis. *Neuroimage*. 2017. 146:376–94. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.10.028>
- Sokolowski H.M., Hawes Z., Ansari D.* The neural correlates of retrieval and procedural strategies in mental arithmetic: A functional neuroimaging meta-analysis. *Human Brain Mapping*. 2023. 44 (1):222–44. <https://doi.org/10.1002/hbm.26082>
- Sokolowski H.M., Hawes Z., Peters L., Ansari D.* Symbols are special: An fMRI adaptation study of symbolic, nonsymbolic, and non-numerical magnitude processing in the human brain. *Cerebral Cortex Communications*. 2021. 2 (3). <https://doi.org/10.1093/texcom/tgab048>
- Soltanlou M., Dresler T., Artemenko C., Rosenbaum D., Ehli A.C., Nuerk H.C.* Training causes activation increase in temporo-parietal and parietal regions in children with mathematical disabilities. *Brain Structure and Function*. 2022. 227 (5):1757–71. <https://doi.org/10.1007/s00429-022-02470-5>
- Stoodley C.J., Schmahmann J.D.* Functional topography in the human cerebellum: a meta-analysis of neuroimaging studies. *Neuroimage*. 2009. 44 (2):12574–83. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.08.039>
- Soylu F., Raymond D., Gutierrez A., Newman S.D.* The differential relationship between finger gnosis, and addition and subtraction: An fMRI study. *Journal of Numerical Cognition*. 2018. 3 (3). <https://doi.org/10.5964/jnc.v3i3.102>
- Sundby K.K., Jana S., Aron A.R.* Double-blind disruption of right inferior frontal cortex with TMS reduces right frontal beta power for action stopping. *Journal of Neurophysiology*. 2021. 125 (1):140–53. <https://doi.org/10.1152/jn.00459.2020>
- Szkudlarek E., Zhang H., de Wind N.K., Brannon E.M.* Young children intuitively divide before they recognize the division symbol. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2022. 16:752190. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.752190>
- Threlfall J.* Strategies and flexibility in mental calculation. *ZDM*. 2009. 41:541–55. <https://doi.org/10.1007/s11858-009-0195-3>
- Uddin L.Q., Nomi J.S., HŽbert-Seropian B., Ghaziri J., Boucher O.* Structure and function of the human insula. *Journal of Clinical Neurophysiology*. 2017. 34 (4):300–6. doi: 10.1097/WNP.0000000000000377
- Van der Auwera S., de Smedt B., Torbeyns J., Verguts G., Verschaffel L.* Subtraction by addition in young multi-digit subtraction learners: A choice/no-choice study. *Journal of Experimental Child Psychology*. 2023. 226 (105544):1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2022.105544>
- Van Overwalle F., Ma Q., Haihambo N., Bylemans T., Ca-toira B., Firouzi M., Li M., Pu M., Heleven E., Baeken C., Baetens K.* A functional atlas of the cerebellum based on neurosynth task coordinates. *The Cerebellum*. 2024. 23 (3):993–1012. <https://doi.org/10.1007/s12311-023-01596-4>
- Verguts T., Fias W.* Interacting neighbors: A connectionist model of retrieval in single-digit multiplication. *Memory, cognition*. 2005. 33:1–6. <https://doi.org/10.3758/BF03195293>
- Vincent J.L., Kahn I., Snyder A.Z., Raichle M.E., Buckner R.L.* Evidence for a frontoparietal control system revealed by intrinsic functional connectivity. *Journal of neurophysiology*. 2008. 100 (6):3328–42. <https://doi.org/10.1152/jn.90355.2008>
- Wang L., Li M., Yang T., Wang L., Zhou X.* Mathematics meets science in the brain. *Cerebral Cortex*. 2022. 32 (1):123–36. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhab198>
- Wood G., Nuerk H.C., Moeller K., Geppert B., Schnitzer R., Weber J., Willmes K.* All for one but not one for all: How multiple number representations are recruited in one numerical task. *Brain research*. 2008. 1187:154–66. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2007.09.094>
- Yang Y., Zhong N., Friston K., Imamura K., Lu S., Li M., Zhou H., Wang H., Li K., Hu B.* The functional architectures of addition and subtraction: Network discovery using fMRI and DCM. *Human Brain Mapping*. 2017. 38 (6):3210–25. <https://doi.org/10.1002/hbm.23585>
- Yaple Z.A., Tolomeo S., Yu R.* Mapping working memory-specific dysfunction using a transdiagnostic approach. *NeuroImage: Clinical*. 2021. 31:102747. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2021.102747>
- Zamarian L., Ischebeck A., Delazer M.* Neuroscience of learning arithmetic. Evidence from brain imaging studies. *Neuroscience, Biobehavioral Reviews*. 2009. 33 (6):909–25. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.03.005>
- Zarnhofer S., Braunstein V., Ebner F., Koschutnig K., Neuper C., Reishofer G., Ischebeck A.* The influence of verbalization on the pattern of cortical activation during mental arithmetic. *Behavioral and Brain Functions*. 2012. 8:1–15. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-8-13>
- Zhang R., Deng H., Xiao X.* The Insular Cortex: An Interface between Sensation, Emotion and Cognition. *Neuroscience Bulletin*. 2024. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12264-024-01211-4>
- Zweegman S., Wildes T.M.* Addition by subtraction. *Blood, The Journal of the American Society of Hematology*. 2021. 137 (22):3005–6. <https://doi.org/10.1182/blood.2021011144>

NEURAL CORRELATES OF SOLVING ARITHMETIC PROBLEMS IN ADULTS

A. V. Istomina^{a, #}, A. Y. Faber^a, A. V. Manzhurtsev^b, M. V. Ublinskiy^b, M. Arsalidou^{c, d}

^a*Laboratory for Cognitive Research, HSE University; Moscow, Russian Federation*

^b*Clinical and Research Institute of Emergency Pediatric Surgery and Trauma, Moscow, Russian Federation*

^c*Department of Psychology, York University; Toronto, Canada*

NeuroPsyLab, Toronto, Canada

[#]*e-mail: avistomona@hse.ru*

Functional magnetic resonance imaging (fMRI) was conducted during the mental calculation of tasks involving basic arithmetic operations at three difficulty levels. During the solving of arithmetic problems involving subtraction, multiplication, and division at the easy level, brain activity was observed in the left inferior parietal lobule and left angular gyrus, which may reflect the memory retrieval from long-term memory. Additionally, activity was detected in the left inferior frontal gyrus during division, indicating using the procedural strategy. As the task difficulty increased, brain activity in the left inferior parietal lobule and left angular gyrus became bilateral and more intense, with additional involvement of structures such as the superior frontal gyrus, supplementary motor area, inferior middle and temporal gyri, as well as the cerebellum, indicating the need for increased neural resources to solve more difficult tasks. Bilateral activity was identified in the insular cortex during the solving of three-digit division tasks, which is associated with various affective and cognitive processes. Many areas underlie mathematical performance in adults which highlight the different systems involved in solving arithmetic problems of varying complexity. Despite similarities in brain activation patterns, behavioral results showed statistically significant differences between arithmetic operations. The results of the study add to existing knowledge on neuromaping of math cognition.

Keywords: fMRI, neuroimaging, arithmetic, addition, subtraction, multiplication, division