

На правах рукописи

Кузалис Алексис

**МЕТАКОГНИЦИИ В СТРУКТУРЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПОЗНАНИЯ:
КОГНИТИВНЫЙ И НЕЙРОСЕТЕВОЙ АНАЛИЗ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата психологических наук

Научная специальность: 5.3.1. Общая психология, психология личности,
история психологии (психологические науки)

Москва
2026

Работа выполнена на кафедре психологии и педагогики филологического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН)

Научный руководитель:

доктор психологических наук (19.00.01), профессор **Ершова Регина Вячеславовна**, профессор кафедры психологии и педагогики филологического факультета ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы».

Официальные оппоненты:

доктор психологических наук (19.00.05), доцент **Микляева Анастасия Владимировна**, профессор кафедры общей и социальной психологии Института психологии ФБГОУ ВО «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена»;

доктор психологических наук (19.00.07), доцент **Фомин Андрей Евгеньевич**, профессор кафедры психологии развития и образования ФГБОУ ВО «Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского»;

доктор психологических наук (19.00.01), доцент **Карпов Александр Анатольевич**, профессор кафедры психологии труда и организационной психологии ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет имени П.Г. Демидова».

Защита диссертации состоится «19» июня 2026 года в 12.00 часов на заседании постоянно действующего диссертационного совета ПДС 0500.008 при ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в Учебно-научном информационном библиотечном центре (Научной библиотеке) при ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Объявление о защите и автореферат диссертации размещены на сайтах <https://www.rudn.ru/science/dissovet/dissertacionnye-sovety/pds-0500004> и <https://vak.minobrnauki.gov.ru>

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор педагогических наук, доцент

И.И. Просвиркина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Современные исследования в области когнитивной психологии показывают, что успешность познавательной деятельности определяется не только уровнем развития базовых когнитивных функций, но и способностью субъекта осуществлять мониторинг и регуляцию собственных мыслительных процессов. Данные функции реализуются в системе метакогнитивных процессов, включающих осознание хода мышления, оценку сложности задач, контроль правильности решения и регуляцию распределения когнитивных ресурсов. Теоретические основания изучения метакогниции были заложены в работах J. Flavell (1979), а в дальнейшем получили развитие в моделях метакогнитивного контроля и мониторинга, предложенных Nelson и Narens (1996), а также в современных когнитивных и нейрокогнитивных исследованиях (Fleming & Lau, 2014).

Особую роль метакогниции играют в сфере математического познания, которое относится к числу наиболее сложных форм интеллектуальной деятельности. Решение математических задач требует интеграции различных когнитивных процессов: операций с символической информацией, количественного анализа, рабочей памяти, исполнительного контроля, а также выбора стратегии решения. В этих условиях метакогнитивный мониторинг позволяет субъекту оценивать степень трудности задачи, корректировать стратегии решения и регулировать затраты умственного усилия. Как показывают исследования Garofalo и Lester (1985), а также Mevarech (1995), метакогнитивные процессы оказывают существенное влияние на успешность математической деятельности учащихся и выступают важным фактором развития математического мышления.

Поведенческие исследования убедительно демонстрируют, что уровень развития метакогнитивных навыков является одним из наиболее значимых факторов успешности обучения математике. Метакогнитивные интервенции позволяют учащимся осознавать структуру задачи, контролировать ход рассуждений и своевременно обнаруживать ошибки, что существенно повышает эффективность решения математических задач (Desoete и др., 2003; Rennequin и др., 2010). Более того, метакогнитивная регуляция рассматривается как ключевой механизм формирования самостоятельной познавательной деятельности и развития стратегий решения задач.

Несмотря на значительное количество работ, посвящённых метакогниции и математическому мышлению, данные направления исследований в значительной степени развивались независимо друг от друга. В рамках когнитивной психологии метакогниция традиционно изучалась преимущественно в контексте процессов восприятия, памяти и принятия решений (Fleming & Lau, 2014; Valk и др., 2016), тогда как исследования математического познания фокусировались на механизмах числовой обработки, количественных представлений и символических операций (Dehaene & Cohen; Gross, 2006; Li & Kim, 2025). В результате проблема взаимодействия метакогнитивного мониторинга и процессов математического мышления остается недостаточно изученной.

Особый интерес представляет феномен субъективного умственного усилия, который может рассматриваться как один из ключевых индикаторов метакогнитивного мониторинга. Оценка затраченных усилий отражает субъективное восприятие сложности задачи и текущего состояния когнитивных ресурсов, а также служит сигналом для регуляции дальнейшей познавательной деятельности. Современные исследования показывают, что субъективная оценка усилия связана с процессами когнитивного контроля, мониторинга неопределенности и распределения ресурсов (Khachouf и др., 2017; Schnaubert & Schneider, 2022).

Развитие методов нейровизуализации значительно расширило возможности изучения функциональной организации когнитивных процессов. Использование функциональной магнитно-резонансной томографии позволяет исследовать динамику мозговой активности в

процессе выполнения познавательных задач и сопоставлять её с различными аспектами когнитивной деятельности. Исследования показывают, что метакогнитивные процессы опираются на взаимодействие распределенных систем когнитивного контроля и самореферентной обработки (Valk и др., 2016; Jiang и др., 2022), тогда как математическое мышление связано с активацией лобно-теменных сетей, обеспечивающих числовую обработку и решение задач (Gross, 2006; Li & Kim, 2025). Однако основное значение подобных исследований заключается не в описании отдельных нейронных структур, а в уточнении функциональной организации когнитивных процессов и механизмов их взаимодействия.

Несмотря на значительный прогресс в изучении метакогниции и математического познания, до настоящего времени отсутствуют исследования, в которых данные процессы рассматривались бы в рамках единой экспериментальной парадигмы. В частности, недостаточно изучено, каким образом метакогнитивная оценка субъективного умственного усилия соотносится с процессами математической обработки и какие функциональные механизмы обеспечивают их взаимодействие.

Таким образом, актуальность настоящего исследования определяется необходимостью комплексного анализа взаимодействия метакогнитивных процессов мониторинга и контроля с когнитивными механизмами математического мышления. Изучение данной проблемы позволяет углубить понимание структуры познавательной деятельности человека, уточнить роль метакогниции в регуляции мышления и внести вклад в развитие современных когнитивно-психологических моделей математического познания.

Степень научной разработанности проблемы. Проблема взаимодействия метакогниции и математического познания активно обсуждается в современной когнитивной психологии и когнитивной нейронауке. Однако существующие исследования преимущественно развиваются в рамках двух относительно самостоятельных направлений: изучения когнитивных механизмов математического мышления и анализа процессов метакогнитивного мониторинга и контроля.

В исследованиях математического познания показано, что обработка числовой информации и решение арифметических задач опираются на функционирование распределенной лобно-теменной сети мозга, ключевую роль в которой играет внутритеменная борозда (IPS), связанная с представлением количественных величин и выполнением вычислительных операций (Gross, 2006; Li & Kim, 2025). Ряд исследований также демонстрирует участие латеральных лобных областей и височных отделов коры, обеспечивающих символическую переработку числовой информации и извлечение арифметических фактов из долговременной памяти (Özcan & Gümüş, 2019; Jia и др., 2021).

В рамках исследований метакогниции особое внимание уделяется процессам мониторинга неопределенности, оценке правильности решений и формированию субъективной уверенности. Работы Jiang и др. (2022) и Li и др. (2022) показывают, что ключевую роль в метакогнитивном мониторинге играют медиальные и латеральные отделы префронтальной коры, включая дорсальную переднюю поясную кору, дорсомедиальную префронтальную кору и латеральную фронтальнополярную область. Эти структуры рассматриваются как важные элементы системы когнитивного контроля, обеспечивающей оценку собственных когнитивных процессов и регуляцию поведения.

Современные нейровизуализационные исследования демонстрируют, что при включении метакогнитивных оценок (например, уверенности или вероятности ошибки) в математические и логические задачи наблюдается дополнительная активация метакогнитивных систем, что указывает на функциональное взаимодействие процессов вычисления и мониторинга (Jiang и др., 2022; Li & Kim, 2025). Однако данные процессы чаще всего анализируются отдельно, что затрудняет выявление их системной взаимосвязи.

Для изучения метакогнитивных процессов используются различные методологические подходы. Один из наиболее распространённых заключается в применении заданий с последующей оценкой уверенности или вероятности ошибки, что позволяет анализировать изменения когнитивной активности в зависимости от точности решения и субъективной оценки результата (Gross, 2006; Jiang и др., 2022). Другой подход связан с использованием вычислительных моделей метакогнитивной чувствительности и эффективности, основанных на теории обнаружения сигнала и динамических моделях накопления доказательств (Bellon и др., 2020). Кроме того, активно развиваются исследования, объединяющие данные различных методов нейровизуализации для анализа структурной и функциональной организации когнитивных процессов (Jia и др., 2021; Li & Kim, 2025).

В последние годы значительное внимание уделяется также междуменным исследованиям метакогниции. Сравнительные исследования показывают, что метакогнитивный мониторинг может обладать как доменно-общими, так и доменно-специфическими характеристиками. Так, Bellon и др. (2020) демонстрируют, что в процессе развития метакогнитивные способности постепенно приобретают более универсальный характер и начинают распространяться на различные когнитивные области. В то же время исследования Jiang и др. (2022) и Li и др. (2022) показывают существование различий между процессами саморефлексивного метапознания и механизмами понимания психических состояний других людей (mentalizing), что подчеркивает сложную иерархическую организацию метакогнитивных процессов.

Отдельное направление исследований связано с анализом индивидуальных различий в метакогнитивной точности и их связи с эмоциональными и когнитивными факторами, такими как математическая тревожность и особенности когнитивного контроля (WeolAe и др., 2007; Özcan & Gümüş, 2019; Jia и др., 2021).

Несмотря на значительный объем накопленных данных, современное состояние исследований характеризуется рядом ограничений. Во-первых, большинство существующих работ анализируют метакогнитивные процессы преимущественно в перцептивных задачах или задачах памяти, тогда как их роль в сложных формах интеллектуальной деятельности, таких как математическое мышление, остается недостаточно изученной. Во-вторых, используемые в исследованиях показатели метакогниции существенно различаются (оценки уверенности, показатели калибровки, метрики теории обнаружения сигнала), что затрудняет сопоставление результатов различных исследований (Özcan & Gümüş, 2019; Bellon и др., 2020). Наконец, значительная часть существующих данных носит корреляционный характер, что ограничивает возможности интерпретации причинно-следственных механизмов взаимодействия метакогнитивных и когнитивных процессов (Jia и др., 2021; Jiang и др., 2022).

Таким образом, несмотря на убедительные данные о роли метакогнитивных процессов в регуляции познавательной деятельности и значительный прогресс в изучении нейронных основ математического мышления, взаимодействие метакогнитивного мониторинга и процессов математического познания остается недостаточно исследованным. На сегодняшний день отсутствуют эмпирические исследования, в которых данные процессы систематически анализировались бы в рамках единой экспериментальной парадигмы, позволяющей сопоставить механизмы математической обработки и метакогнитивной оценки.

Выявленный теоретический и эмпирический пробел определяет научную проблему настоящего исследования, направленного на изучение взаимодействия метакогнитивного мониторинга умственного усилия и процессов математического познания.

Цель исследования – выявить и эмпирически обосновать характер взаимодействия метакогнитивных процессов мониторинга и контроля с процессами математического мышления, а также определить их функциональную организацию с использованием методов нейровизуализации.

Объект исследования – метапознание и математическое познание.

Предмет исследования - когнитивные механизмы взаимодействия метакогнитивного мониторинга (оценки умственного усилия) и процессов математического познания при решении арифметических задач различной сложности.

Гипотезы исследования:

Общая гипотеза:

1. Метакогнитивный мониторинг умственного усилия и процессы математического познания представляют собой взаимосвязанные, но функционально различимые уровни когнитивной организации деятельности. Математические вычисления реализуются на уровне объектных когнитивных процессов, тогда как метакогнитивные механизмы обеспечивают мониторинг, оценку сложности и регуляцию выполнения задачи.

Частные гипотезы:

1. Метакогнитивный мониторинг и математическое познание опираются на частично перекрывающиеся механизмы когнитивного контроля. Предполагается, что процессы оценки умственного усилия и решения математических задач вовлекают общие системы мониторинга и регуляции когнитивной деятельности.

2. Математическое познание характеризуется наличием доменно-специфических механизмов обработки информации. Решение математических задач, помимо вовлечения систем когнитивного контроля, требует активации специализированных механизмов обработки количественной и символической информации.

3. Уровень сложности математических задач оказывает параметрическое влияние на вовлеченность метакогнитивных механизмов мониторинга. Предполагается, что увеличение объективной сложности задач сопровождается усилением активности систем когнитивного контроля и субъективной оценки умственного усилия.

4. Различные типы арифметических операций характеризуются различными когнитивными стратегиями обработки информации. Это должно проявляться в различиях функциональной организации процессов математического познания при выполнении операций сложения, вычитания, умножения и деления.

5. Математическое познание и метакогнитивная оценка умственного усилия характеризуются различной межполушарной организацией. Предполагается, что математическая обработка будет демонстрировать более выраженную левополушарную специализацию, тогда как метакогнитивный мониторинг будет носить более билатеральный характер.

Достижение поставленной цели требует решения **следующих задач:**

1. Провести теоретический анализ современных психологических и нейрокогнитивных моделей метакогниции и математического познания, выявив основные подходы к изучению их функциональной организации и взаимосвязи.

2. Систематизировать представления о роли метакогнитивного мониторинга в структуре познавательной деятельности, уточнив значение субъективной оценки умственного усилия как механизма когнитивной регуляции.

3. Разработать и реализовать экспериментальную парадигму исследования, позволяющую в рамках единого дизайна сопоставить процессы решения математических задач различной сложности и последующей метакогнитивной оценки затраченных усилий.

4. Эмпирически исследовать особенности функциональной организации математического познания, включая влияние типа арифметической операции и уровня сложности задач на параметры когнитивной активности.

5. Выявить когнитивные и нейронные корреляты метакогнитивного мониторинга умственного усилия, а также определить степень функционального перекрытия и различий между процессами математической обработки и метакогнитивной оценки.

6. Интерпретировать полученные результаты в контексте современных теорий метакогниции, саморегуляции и математического мышления, уточнив характер взаимодействия метакогнитивных и математических процессов.

Теоретико-методологическая основой работы выступают следующие научные принципы: 1) принцип системности (Б. Ф. Ломов, Э. Г. Юдин, В. Н. Садовский и др.), на основе которого был проведён анализ взаимосвязи между метакогнициями и математическими когнициями; 2) принцип единства сознания и деятельности (А. Н. Леонтьев, С. Л. Рубинштейн и др.), который позволил рассмотреть нейронные корреляты когнитивных процессов при выполнении математических и метакогнитивных задач; 3) принцип детерминизма, который послужил основанием для исследования нейрологических основ когнитивных процессов; 4) принцип психофизического единства, на основе которого рассматривались неразрывные связи метакогнитивных и когнитивных процессов со своими нейрокоррелятами. В качестве теоретической основы исследования использовались следующие метакогнитивные теории: модель Флавелла (1979), в которой метакогниции рассматриваются как «когниции о когнициях», включающие мониторинг и контроль собственных когнитивных процессов; модель Нельсона и Наренса (1996), различающая объектный уровень (выполнение задачи) и мета-уровень самооценки, отвечающий за мониторинг и контроль объектного уровня; теория обнаружения сигналов и метакогнитивной эффективности, в которой уверенность и оценка эффективности моделируются как метакогнитивная чувствительность (*meta-d'*), что позволяет отделить точность мониторинга от выполнения задач; байесовские и вероятностные рамки, которые обеспечивают возможность рассмотрения метакогнитивных суждений в качестве выводов второго порядка о надёжности решений первого порядка, связанных с вычислительными моделями неопределённости; теория управления, согласно которой было принято допущение о том, что метакогниции встроены в замкнутую систему регуляции, где мониторинговые сигналы (например, усилия, неопределённость) влияют на решения о контроле (распределении усилий, выборе стратегии). В диссертационном исследовании мы также опирались на теории математического познания: модель математического познания, предполагающую существование трёх различных, но взаимодействующих нейронных систем обработки числовой информации: аналоговой величины, визуально-арабского и вербального кодов (модель тройного кодирования (Dehaene & Cohen, 1995); общую модель ресурсов, согласно которой математическая производительность опирается на рабочую память, исполнительные функции, контроль внимания и когнитивную нагрузку. Таким образом, исследование основано на интегративной теоретической концепции, объединяющей когнитивную нейронауку, общую психологию и вычислительное моделирование.

Методы и методики исследования. В соответствии с целью исследования и выдвинутыми гипотезами использовался комплекс исследовательских методов:

1) *Метод теоретического анализа литературных источников по различным аспектам рассматриваемой проблемы;*

2) *Экспериментальный метод.* В процессе экспериментального исследования участникам, находящимся внутри сканера, последовательно предъявлялись блоки математических задач различной сложности и типа арифметических операций (сложение, вычитание, деление, умножение) и контрольных заданий, предполагающих сравнение шрифтов визуально предъявляемых чисел, что позволяло контролировать базовые процессы зрительного восприятия и процесс принятия решений. Каждый блок включал в себя 12 математических и 3 контрольных задания, варьирующихся по трем уровням сложности, определяемым количеством цифр в операндах (однозначные, двузначные и трёхзначные числа). Всего было предъявлено 36 математических и 9 контрольных заданий. После каждого математического блока представлялась метакогнитивная задача. Участников просили оценить субъективные умственные усилия или трудности, с которыми они столкнулись в предыдущем

блоке задач. После каждого периода оценки следовал 10-секундный интервал отдыха (фиксации). Полный экспериментальный блок состоял из математического блока со встроенными контрольными заданиями → метакогнитивной оценки → фиксации.

Исследование проводилось с использованием магнитно-резонансного томографа Siemens Magnetom Verio (Syngo MR B17) с напряженностью магнитного поля 3 Тл, установленного в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (Москва). Для регистрации функциональных изображений использовалась градиентная эхо-планарная последовательность (EPI — echo-planar imaging), чувствительная к изменениям уровня оксигенации крови (BOLD — blood-oxygen-level-dependent), что обеспечивает получение T2*-взвешенных изображений. Параметры сканирования: время повторения (TR), время эхо (TE), толщина срезов, размер матрицы и др., задавались в соответствии со стандартными протоколами для функциональной МРТ (фМРТ) когнитивных нагрузок, принятыми в данном центре. Выбор данных параметров обусловлен необходимостью достижения оптимального баланса между пространственным и временным разрешением, а также контрастом, чувствительным к BOLD-сигналу.

Предобработка функциональных и анатомических изображений выполнялась с использованием пакета программ AFNI (Analysis of Functional NeuroImages). На первом этапе проводилась коррекция временного сдвига срезов (slice timing) с помощью функции 3dTshift, что необходимо для учета разновременности получения срезов в пределах одного объема (TR). Далее с помощью функции 3dvolreg осуществлялась коррекция артефактов движения головы: все изображения совмещались с первым объемом временного ряда посредством жесткого преобразования по шести параметрам (три трансляции и три ротации).

Анатомическое изображение высокого разрешения каждого участника совмещалось (coregistration) с функциональным изображением с использованием скрипта align_epi_anat.py. Затем все данные были подвергнуты пространственной нормализации в стереотаксическое пространство MNI (Montreal Neurological Institute) с применением функции @auto_tlrc. После нормализации для улучшения отношения сигнал/шум и компенсации межиндивидуальных анатомических различий выполнялось пространственное сглаживание гауссовым ядром с полной шириной на полувысоте (FWHM) 4 мм с помощью функции 3dmerge. Выбор данного параметра сглаживания согласуется с рядом предыдущих исследований когнитивных функций (Baird и др., Boldt и Gilbert, Kowalski и др., Muñoz-Moldes и др). Заключительным этапом предобработки было удаление сигнала от тканей вне мозга (маскирование) с помощью автоматической функции 3dAutomask.

Статистическая обработка данных фМРТ выполнялась с использованием методов общей линейной модели (general linear model, GLM). Для построения карт активации на индивидуальном уровне применялась функция 3dDeconvolve, реализующая обычный метод наименьших квадратов (ordinary least squares, OLSQ). На основе этой модели оценивались параметры регрессии (вектор *b*) для каждого вокселя в соответствии с уравнением линейной модели $z = Xb$, где *z* — вектор интенсивности сигнала во временном ряду, а X — матрица регрессоров (дизайн-матрица).

3) *Методы статистического анализа.* Для статистического анализа был реализован двухуровневый подход на основе общей линейной модели (GLM).

На первом (индивидуальном) уровне для каждого участника была построена общая линейная модель с использованием команд «3dDeconvolve» и «3dREMLfit» пакета AFNI. Модель включала регрессоры для каждого условия: математическая операция × уровень сложности, метакогнитивная оценка, контрольное задание и базовое состояние фиксации. В анализ также были включены регрессоры помех, отражающие параметры движения головы.

На индивидуальном уровне были рассчитаны контрасты, представляющие интерес, с целью выделения активности, связанной с: а) метакогнитивными задачами по сравнению с

базовым состоянием (фиксация) и с контрольным заданием; б) математическими задачами по сравнению с базовым состоянием (фиксация) и с контрольным заданием; в) сравнением различных математических операций и уровней сложности.

На втором (групповом) уровне был проведён анализ со случайными эффектами (random-effects analysis), в ходе которого индивидуальные карты контрастов подвергались усреднению и статистической оценке. Для коррекции множественных сравнений применялся комбинированный порог: воксельный уровень значимости устанавливался на уровне $p < .01$ с поправкой на ложные обнаружения (FDR, False Discovery Rate) в сочетании с кластерным порогом $p < .001$, как рекомендовано для данных fMRI (Woo, и др., 2014). На завершающем этапе был проведен анализ областей интереса (ROI, regions of interest). Для кластеров, демонстрирующих статистически значимую активацию, была проанализирована динамика BOLD-сигнала, а также выполнена анатомическая привязка выявленных областей. Локализация активированных кластеров осуществлялась с помощью атласа Даэмона (TTAtlas), реализованного в пакете AFNI.

Эмпирическая выборка.

В исследовании приняли участие двадцать молодых, здоровых взрослых (10 женщин, 10 мужчин, средний возраст 23,85 года). Все участники были правшами. Критериями исключения из выборки была леворукость, невыполнение задачи по подбору чисел перед скринингом и экстремальная производительность (очень высокая или очень низкая) при решении математической задачи во время контрольной пробы. Все участники дали добровольное согласие на участие в исследовании.

Достоверность и надёжность основных положений, результатов и выводов исследования обеспечиваются: тщательной теоретической и методологической проработкой проблемы; соблюдением фундаментальных методологических и логико-научных принципов; соблюдением принятых стандартов теоретических и эмпирических психологических исследований; репрезентативностью выборки; а также использованием проверенных методов обработки данных, соответствующих целям, предмету и задачам исследования. Значительный объём проанализированного и систематизированного теоретического материала, а также высокая степень обобщения, лежащая в основе логики построения эмпирического исследования, свидетельствуют о надёжности и научной достоверности его результатов и выводов.

Наиболее существенные и новые результаты исследования, полученные лично соискателем, и их научная новизна заключаются в следующем:

1. *Разработана* интегративная когнитивная модель взаимодействия метакогнитивного мониторинга и математического познания, в которой субъективная оценка умственного усилия рассматривается как ключевой механизм регуляции познавательной деятельности. В модели умственное усилие выступает одновременно как результат мониторинга текущих когнитивных процессов и как регуляторный сигнал, влияющий на распределение ресурсов и выбор стратегии решения задачи.

2. *Эмпирически доказано*, что метакогнитивные и математические процессы опираются на частично перекрывающиеся когнитивные механизмы, реализующие функции мониторинга, оценки сложности и когнитивного контроля, что позволяет рассматривать метакогницию как интегративный компонент математической деятельности.

3. *Установлено* существование функциональной дифференциации между метакогнитивным мониторингом и математической обработкой, проявляющейся в вовлечении доменно-специфических механизмов обработки символической и количественной информации при решении арифметических задач.

4. *Установлено*, что субъективная оценка умственного усилия выступает валидным метакогнитивным индикатором когнитивной нагрузки, систематически связанным с

изменениями функциональной активности систем когнитивного контроля при решении математических задач различной сложности.

5. *Выявлена* параметрическая зависимость между объективной сложностью математических задач и вовлеченностью метакогнитивных механизмов мониторинга, что свидетельствует о включенности метакогнитивных процессов в структуру математического мышления и их роли в регуляции познавательной деятельности.

6. *Получены* новые данные о функциональной организации математического познания, демонстрирующие, что различные типы арифметических операций характеризуются специфическими когнитивными стратегиями и различными профилями активации внутри общей системы математической обработки.

7. *Выявлены* различия в межполушарной организации метакогнитивных и математических процессов, проявляющихся преимущественно в левополушарной специализации математического познания и более билатеральной организации метакогнитивного мониторинга.

Таким образом, полученные результаты расширяют представления о структуре познавательной деятельности и уточняют роль метакогниции как механизма регуляции математического мышления.

Теоретическая значимость работы определяется вкладом полученных результатов в развитие когнитивно-психологических представлений о структуре и регуляции познавательной деятельности человека.

Прежде всего, работа способствует *интеграции двух направлений современных психологических исследований* — *метакогниции и математического познания*, которые традиционно изучались преимущественно независимо друг от друга. Полученные результаты доказывают, что метакогнитивный мониторинг не является внешним по отношению к процессам математического мышления, а представляет собой внутренний механизм регуляции когнитивной деятельности, обеспечивающий оценку сложности задачи, распределение когнитивных ресурсов и корректировку стратегий решения.

Исследование вносит вклад в развитие теоретических моделей метакогнитивного контроля, уточняя роль субъективного умственного усилия как одного из центральных индикаторов метакогнитивного мониторинга. Установлено, что субъективная оценка усилия отражает не только переживание сложности задачи, но и выполняет функцию сигнала регуляции познавательной деятельности, интегрируя информацию о текущей когнитивной нагрузке и доступных ресурсах.

Полученные результаты также способствуют развитию представлений о функциональной организации математического мышления. Подтверждено, что математическое познание включает не только специализированные механизмы обработки числовой и символической информации, но и тесно связано с процессами метакогнитивного мониторинга и когнитивного контроля. Тем самым математическая деятельность рассматривается как многоуровневая система познавательной регуляции, включающая как объектный уровень решения задачи, так и мета-уровень оценки и контроля.

Особое значение имеет предложенная в работе двухуровневая модель организации когнитивной деятельности, в рамках которой математическое познание рассматривается как объектный уровень обработки информации, а метакогнитивный мониторинг — как мета-уровень регуляции. Данная модель уточняет представления о механизмах взаимодействия процессов мышления и саморефлексии и может быть использована для дальнейшего развития теорий саморегуляции познавательной деятельности.

Результаты исследования также вносят вклад в дискуссию о доменно-общем и доменно-специфическом характере метакогниции. Показано, что метакогнитивные процессы опираются на универсальные механизмы когнитивного контроля, однако их

функционирование параметрически зависит от особенностей конкретной когнитивной деятельности. Таким образом, метакогниция может рассматриваться как домен-общий механизм регуляции, адаптирующийся к требованиям конкретного познавательного домена.

Кроме того, полученные данные расширяют теоретические представления о структуре познавательной саморегуляции, демонстрируя, что субъективная оценка усилия является важным компонентом системы когнитивного контроля, обеспечивающим динамическую адаптацию познавательной деятельности к изменяющимся требованиям задачи.

В целом результаты исследования способствуют развитию современных когнитивно-психологических моделей мышления, саморегуляции и метакогниции, уточняя механизмы их взаимодействия в структуре сложной интеллектуальной деятельности.

Практическая значимость диссертации определяется возможностью применения полученных результатов в образовательной, диагностической и научно-методической практике.

Полученные данные о роли метакогнитивного мониторинга умственного усилия в структуре математического познания могут быть использованы при разработке программ развития метакогнитивных навыков, направленных на формирование у обучающихся способности к осознанному контролю собственных когнитивных процессов, оценке сложности задач и оптимальному распределению познавательных ресурсов.

Результаты исследования могут применяться в педагогической психологии и психологии образования при создании методик обучения математике, ориентированных на развитие стратегий саморегуляции мышления. Учет субъективной оценки когнитивной нагрузки позволяет совершенствовать методы преподавания, направленные на повышение эффективности решения математических задач и формирование рефлексивных навыков у обучающихся.

Выявленные закономерности взаимосвязи между метакогнитивной оценкой усилия и процессами математического мышления могут быть использованы при разработке адаптивных образовательных технологий и цифровых обучающих систем, учитывающих не только объективную сложность заданий, но и субъективное состояние учащегося. Это особенно важно при работе с обучающимися, испытывающими трудности в математике или повышенную математическую тревожность.

Практическое значение результаты исследования имеют и для психологической диагностики когнитивных и метакогнитивных процессов. Полученные данные могут использоваться при разработке диагностических методик, направленных на оценку особенностей метакогнитивного мониторинга и когнитивного контроля в учебной и профессиональной деятельности.

Кроме того, результаты исследования могут быть использованы в научно-исследовательской и методической работе, связанной с изучением когнитивных процессов, метакогниции и саморегуляции познавательной деятельности, а также при разработке междисциплинарных исследований на стыке когнитивной психологии, педагогики и нейронауки.

В целом полученные результаты расширяют возможности применения современных когнитивно-психологических подходов в образовательной практике, психологической диагностике и разработке технологий обучения, ориентированных на развитие саморегуляции познавательной деятельности.

Исследования проводилось поэтапно.

1. Теоретико-методологический этап включал систематический обзор научной литературы, посвященной проблемам метакогниции, умственного усилия, математического познания, а также их нейрокоррелятов, выявляемых с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ). На основе проведенного анализа были сформулированы

гипотезы относительно общих и специфических нейронных субстратов метакогнитивных и математических процессов. Параллельно разрабатывалась экспериментальная парадигма исследования, осуществлено программирование процедуры предъявления стимулов и регистрации поведенческих ответов. Получено одобрение этического комитета и сформирована выборка испытуемых.

2. На экспериментальном этапе был проведен поведенческий скрининг для верификации соответствия участников критериям включения в исследование, а также реализовано собственно экспериментальное исследование в соответствии с разработанным ранее дизайном. Основной сбор данных осуществлялся на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Москва) с использованием магнитно-резонансного томографа Siemens Magnetom Verio.

3. Этап обработки и анализа данных включал предобработку функциональных данных с использованием пакета AFNI (Analysis of Functional NeuroImages) и статистический анализ полученных результатов в рамках общей линейной модели (GLM), включающий индивидуальный и групповой уровни обработки.

4. На заключительном интерпретационно-обобщающем этапе осуществлялась интерпретация выявленных паттернов нейронной активности в контексте проверяемых гипотез и существующих теоретических моделей. На основе полученных результатов были подготовлены главы диссертационной работы, а материалы исследования нашли отражение в научных статьях, а также были представлены в виде докладов на международных научных конференциях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метакогнитивный мониторинг и математическое познание представляют собой взаимосвязанные, но функционально различимые уровни когнитивной организации деятельности. Математическое решение задач реализуется на объектном уровне обработки информации, тогда как метакогнитивные процессы обеспечивают мониторинг, оценку сложности и регуляцию выполнения когнитивных операций.

2. Метакогнитивный мониторинг умственного усилия опирается на доменно-общие механизмы когнитивного контроля, которые вовлекаются как при метакогнитивной оценке, так и при решении математических задач, что свидетельствует о системной интеграции регуляторных и вычислительных компонентов познавательной деятельности.

3. Математическое познание характеризуется наличием доменно-специфических когнитивных механизмов, обеспечивающих обработку количественной и символической информации и дополняющих работу доменно-общих систем когнитивного контроля.

4. Субъективная оценка умственного усилия является значимым метакогнитивным сигналом, отражающим уровень когнитивной нагрузки и участвующим в регуляции распределения познавательных ресурсов при решении задач различной сложности.

5. Увеличение сложности математических задач сопровождается усилением вовлеченности метакогнитивных механизмов мониторинга, что указывает на функциональную интеграцию процессов контроля и математической обработки.

6. Различные арифметические операции реализуются с использованием различных когнитивных стратегий, что проявляется в дифференцированных паттернах активности внутри общей системы математического познания.

7. Математическое познание и метакогнитивная оценка характеризуются различной межполушарной организацией, отражающей различия между языково-символической переработкой математической информации и интегративными механизмами саморефлективного мониторинга.

Апробация результатов исследования. Основные положения и эмпирические результаты исследования обсуждались на методологических семинарах на кафедре

психологии и педагогики филологического факультета Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы, на научных конференциях различного уровня: международной научно-практической конференции «Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке», (Москва, 2026); XIX Международной научно-практической конференции «Высшая школа: опыт, проблемы, перспективы. Личность в образовательном пространстве» (Москва, РУДН, 2026); XIII Международная научно-практическая конференция «Society, science, practice» (КРСУ, Бишкек, 2026).

Содержание исследования отражено в 5 опубликованных научных работах автора, из них 2 – в ведущих научных рецензируемых изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования РФ и Ученым советом Российского университета дружбы народов («Положение о присуждении ученых степеней» ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», утв. 19.02.2018), 1 статья – в журналах, индексируемых в наукометрической базе Scopus.

Соответствие диссертации с паспортом исследовательской области. Отраженные в диссертации положения и выводы соответствуют паспорту научной специальности 5.3.1 Общая психология, психология личности, история психологии по следующим пунктам:

п.7. Психофизическая проблема;

п.8. Сознание и познавательные процессы. Когнитивная психология;

п.9. Мышление, воображение. Эмоционально-смысловая регуляция мышления. Практическое мышление в сложных системах. Метакогниции, их роль в регуляции поведения и деятельности человека;

п.17. Сознание. Состояния сознания. Рефлексивные процессы. Мышление и мыслительные процессы, структура, виды, методы исследования.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, двух глав, Заключения, Списка использованной литературы (205 источников, из которых 165 на английском языке). Основной текст диссертации представлен на 121 странице. Диссертация содержит 114 таблиц и 21 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, разработанность проблемы диссертационного исследования, определены объект, предмет, цель, задачи; сформулированы гипотезы; представлена теоретико-методологическая основа, методы, эмпирическая база исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследования; положения, выносимые на защиту; апробация и внедрение результатов исследования, соответствие диссертации паспорту научной специальности, а также структура диссертации.

Первая глава «Структурные, функциональные и нейронные характеристики метакогниций и математического познания» посвящена теоретическому анализу и систематизации существующих подходов к изучению метапознания и математического познания как самостоятельных, но взаимосвязанных когнитивных доменов. Особое внимание уделяется нейробиологическим основам этих процессов, что создает теоретический фундамент для эмпирического исследования их взаимодействия.

В разделе 1.1 рассматривается эволюция понятия «метапознание» — от философских истоков (Платон, Аристотель, Монтень, Декарт) до современных психологических моделей. Проведен сравнительный анализ основных теоретических подходов:

Интроспекционистские теории высшего порядка (Fleming, 2024), рассматривающие метапознание как результат формирования репрезентации более высокого уровня о состоянии первого порядка (например, уверенность в правильности перцептивного решения).

Теории «считывания собственного сознания» (Carruthers, 2021), постулирующие, что метапознание человека рекрутирует механизмы, эволюционно предназначенные для

понимания ментальных состояний других людей.

Информационно-вероятностные модели, включая теорию обнаружения сигнала (SDT) с ключевым понятием, трактующие уверенность как вывод метакогнитивной эффективности (meta-d') (Fleming & Lau, 2014), а также байесовские подходы второго порядка о надежности собственных решений.

Модели динамического накопления доказательств (например, модель диффузного дрейфа), которые рассматривают уверенность и осознание ошибки как процессы, разворачивающиеся во времени.

Кибернетический (контрольно-регуляторный) подход, в рамках которого метапознание встраивается в замкнутый контур регуляции: мониторинг (оценка неопределенности, трудности) информирует систему контроля (выбор стратегии, распределение усилий).

Особое место в параграфе уделено концептуализации ментального усилия как метакогнитивного сигнала. На основе анализа работ (Jae-Man, 2016; Khachouf и др., 2017; Schnaubert & Schneider, 2022; Barakat и др., 2025) обосновывается двойственная природа ментального усилия: оно выступает и как продукт метакогнитивного контроля (результат решения о степени вовлеченности в задачу), и как обратная связь (сигнал о субъективной трудности, конфликте или исчерпании ресурсов), которая используется для корректировки дальнейших стратегий. Это положение интегрируется в модель Expected Value of Control (EVC), где дорсальная часть передней поясной коры (dACC) оценивает стоимость усилий, а латеральная префронтальная кора реализует выбранный уровень контроля.

В разделе 1.2 представлен обзор нейровизуализационных коррелятов метапознания и ментального усилия. Систематизированы данные о ключевых мозговых сетях. Префронтальная кора (ПФК): латеральная и фронтополярная области обеспечивают формирование эксплицитных метакогнитивных суждений и реализацию контролируемых стратегий (Saccenti и др., 2024; Kapetaniou и др., 2025). Медиальные отделы (dmPFC) вовлечены в процессы мониторинга и ментализации (Jiang и др., 2022). Поясная кора (ACC/dACC) рассматривается как центральный узел кодирования неопределенности и конфликта, возникающих в процессе принятия решений, а также антиципации и переживания усилия (Jiang и др., 2022; Aben и др., 2020).

Островковая доля (Insula) интегрирует interoцептивную и аффективную информацию, обеспечивая феноменологическое переживание «чувства усилия». Показана ее роль в оценке сложности задачи, переживании когнитивной усталости и точности метапамяти (Walsh и др., 2023; Cosentino и др., 2015).

Предклинье (Preccuneus) и задняя поясная кора (PCC) участвуют в самореферентных процессах и извлечении эпизодической памяти, что необходимо для контекстуализации текущего опыта усилия в рамках «модели себя» (Ye и др., 2018; Bader & Wiener, 2024).

В разделе 1.3 анализируются концептуальные и нейронные основы математического познания. Рассматривается его историческое развитие и ключевые современные модели. Модель тройного кода (Triple Code Model) Деана (Dehaene & Cohen, 1995; Skagenholt и др., 2018) постулирует существование трех форматов репрезентации чисел: аналоговый, арабско-зрительный, вербальный, реализуемых частично диссоциированными, но взаимодействующими нейронными сетями.

Модель доменно-общих ресурсов подчеркивает вклад рабочей памяти, исполнительных функций и внимания в успешность математической деятельности (Menon, 2016; Panaoura, 2007).

Детально описаны нейровизуализационные корреляты математического познания. Внутритеменная борозда (IPS) – ключевая область для репрезентации величины числа и выполнения количественных операций (Faye и др., 2019; Gross, 2006).

Височные отделы коры: левые височные области вовлечены в извлечение табличных

фактов (умножение) и семантическую обработку символьной информации (Daitch и др., 2016; Amalric & Dehaene, 2018).

Лобно-теменная сеть обеспечивает сложные вычисления, стратегическое планирование и контроль.

Отдельное внимание уделено анализу влияния сложности и типа арифметической операции на паттерны мозговой активности (Allen и др., 1992; Brunner и др., 2021; Pletzer, 2016), а также индивидуальным различиям, связанным с полом, уровнем компетентности и математической тревожностью.

В разделе 1.4 синтезируются данные двух предыдущих разделов и формулируется проблема взаимодействия метапознания и математического познания. Анализ работ (Muncer и др., 2021; Valk и др., 2016; Jiang и др., 2022) показывает, что, несмотря на наличие многочисленных поведенческих данных о связи метакогнитивных навыков с успешностью в математике и хорошо разработанных нейрокогнитивных моделей каждого домена в отдельности, их интегративное исследование с помощью фМРТ остается критически не изученным.

На основе проведенного анализа автором делаются следующие ключевые выводы:

1) Метапознание и математическое познание опираются на устоявшиеся, но преимущественно изучаемые раздельно нейронные сети: фронто-оперкулярную (для мониторинга) и лобно-теменно-височную (для вычислений).

2) Ментальное усилие теоретически обосновано как валидный метакогнитивный сигнал, который может быть операционализирован и исследован с помощью фМРТ.

3) Существует неразрешенный теоретический спор о доменно-общем или доменно-специфичном характере метакогнитивного мониторинга в контексте математической деятельности.

4) Отсутствуют эмпирические исследования, непосредственно сравнивающие нейронные корреляты метакогнитивной оценки усилия и собственно математических вычислений в рамках одного экспериментального дизайна.

Таким образом, первая глава завершается обоснованием основного исследовательского пробела, который и определяет цель и задачи диссертационной работы: эмпирическая проверка гипотезы о перекрывающихся и диссоциируемых нейронных субстратах метапознания и математического познания.

Вторая глава «Эмпирическое исследование соотношения метакогниций и математического познания» посвящена разработке экспериментальной парадигмы и анализу результатов исследования, направленного на выявление когнитивных механизмов взаимодействия метакогнитивного мониторинга и процессов математического мышления.

Исследование было построено в соответствии с теоретической моделью, разработанной в первой главе, согласно которой математическое познание рассматривается как объектный уровень обработки информации, а метакогнитивная оценка умственного усилия - как мета-уровень мониторинга и регуляции познавательной деятельности.

Экспериментальная парадигма включала чередование следующих типов задач: решение арифметических задач (сложение, вычитание, умножение, деление); контрольное задание (сравнение шрифтов чисел); метакогнитивную оценку субъективного умственного усилия; период фиксации (rest) (Табл.1).

Сложность математических задач варьировалась по трем уровням (однозначные, двузначные и трехзначные числа), что позволило исследовать параметрическое влияние когнитивной нагрузки на процессы математического решения и метакогнитивного мониторинга.

Примеры математических операций, контрольных и метакогнитивных заданий, использованных в эксперименте

	Легкий уровень	Средний уровень	Высокий уровень
Сложение	5+9	32+36	859+213
	13 15 16 14	78 69 67 68	1062 972 1172 1072
Вычитание	9-3	101-54	1563-531
	5 7 4 6	37 57 48 47	832 922 942 932
Умножение	5x7	28x8	453x8
	42 40 30 35	216 214 324 224	3524 3724 3614 3624
Деление	30/5	228/3	2472/4
	8 5 7 6	86 77 75 76	518 718 608 618
Контроль	5#5	82#82	540#540
	5 5 5 5	82 82 82 82	540 540 540 540
Метакогнитивное задание	Пожалуйста, оцените уровень усилия, затраченного на задание		
	1 2 3 4		

На этом этапе исследования осуществлялся систематический анализ полученных фМРТ-данных с целью выявления: общих (домен-общих) нейронных сетей; домен-специфических областей математической обработки; параметрической модуляции активации сложностью задачи; операционно-специфических различий; особенностей межполушарной латерализации. В разделах 2.1 и 2.2 главы подробно описан экспериментальный дизайн и процедура статистической обработки полученных данных.

Раздел 2.3 посвящен анализу результатов эмпирического исследования, направленного на выявление когнитивных и нейронных механизмов взаимодействия метакогнитивного мониторинга и математического познания. Анализ полученных данных проводился с целью проверки выдвинутых гипотез и решения задач исследования, связанных с выявлением общих и специфических механизмов обработки информации при выполнении математических и метакогнитивных задач.

В первую очередь был проведен анализ нейронных коррелятов метакогнитивной оценки субъективного умственного усилия. Было установлено, что выполнение метакогнитивной задачи, требующей оценки затраченных усилий при решении предыдущего блока математических задач, сопровождается активацией ряда областей мозга, традиционно связываемых с процессами когнитивного мониторинга и контроля. Наиболее устойчивые активации наблюдаются в дорсальной передней поясной коре, латеральных отделах префронтальной коры, островковой доле и предклинье.

Указанные области формируют функциональную сеть, связанную с оценкой неопределенности, мониторингом когнитивных конфликтов, интероцептивной осведомленностью и самореферентной переработкой информации. Полученные данные позволяют рассматривать субъективную оценку умственного усилия как метакогнитивный сигнал, возникающий в результате интеграции информации о текущем состоянии когнитивных

ресурсов, уровне сложности выполняемой задачи и успешности решения. Результаты анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2

Активации при метакогнитивной оценке

Область	Полушарие	Функция
Префронтальная кора	Левое и правое	Эксплицитная самооценка, контроль
Дорсальная передняя поясная кора	Билатерально	Мониторинг конфликта
Передняя островковая доля	Билатерально	Переживание усилия
Предклинье	Билатерально	Самореферентная обработка

Таким образом, полученные данные подтверждают гипотезу о том, что метакогнитивный мониторинг опирается на доменно-общие механизмы когнитивного контроля, обеспечивающие оценку состояния познавательной деятельности и регуляцию распределения когнитивных ресурсов.

Следующим этапом анализа стало исследование функциональной организации процессов математического познания. Было показано, что решение арифметических задач сопровождается активацией распределенной лобно-теменно-височной сети, включающей внутритеменную борозду, нижнюю и среднюю лобные извилины, дорсальную переднюю поясную кору, островковую долю и височные области коры.

Особую роль в обработке количественной информации играет внутритеменная борозда, которая рассматривается как ключевая структура нейронной системы представления числовых величин и выполнения арифметических операций. Активация нижней лобной извилины связана с процессами символической переработки числовой информации и участием вербально-опосредованных стратегий вычисления. Височные области коры вовлечены в извлечение арифметических фактов из долговременной памяти, что особенно характерно для операций умножения и деления.

Основные результаты анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3

Активации при математическом познании

Область	Полушарие	Функция
Внутритеменная борозда (IPS)	Левое и правое	Количественная обработка
Нижняя лобная извилина (IFG)	Преимущественно левое	Символическая переработка
Височная кора	Преимущественно левое	Извлечение арифметических фактов
Дорсальная передняя поясная кора (dACC)	Билатерально	Контроль сложности

Полученные данные подтверждают существование специализированной системы математической обработки, включающей как доменно-специфические области обработки количественной информации, так и структуры когнитивного контроля, обеспечивающие планирование и регуляцию вычислительных операций.

Особое внимание в исследовании уделялось анализу влияния сложности математических задач на функциональную организацию когнитивной активности. Было установлено, что увеличение сложности арифметических задач сопровождается усилением активации внутритеменной борозды, ростом активности дорсальной передней поясной коры и

островковой доли, а также увеличением вовлеченности латеральных отделов префронтальной коры.

Данные результаты свидетельствуют о том, что при возрастании вычислительной нагрузки усиливается участие механизмов когнитивного контроля, обеспечивающих поддержание внимания, регуляцию стратегий решения и распределение когнитивных ресурсов. В то же время усиление активности областей, связанных с метакогнитивным мониторингом, указывает на то, что субъективная оценка умственного усилия параметрически зависит от объективной сложности выполняемых задач.

Таким образом, результаты анализа подтверждают гипотезу о том, что процессы метакогнитивного мониторинга интегрированы в структуру математического познания и участвуют в регуляции познавательной деятельности при решении задач различной сложности.

Отдельный анализ был посвящен сравнению нейронных паттернов, возникающих при выполнении различных типов арифметических операций. Было обнаружено, что, несмотря на наличие общей сети математической обработки, отдельные арифметические операции характеризуются различными профилями активации.

Так, операции умножения и деления демонстрировали более выраженную активацию височных областей коры, что связано с использованием стратегий извлечения арифметических фактов из долговременной памяти. В то же время операции сложения и вычитания сопровождались более выраженной активацией теменных областей, отражающей использование процедурных стратегий количественного вычисления.

Полученные результаты свидетельствуют о существовании функциональной дифференциации когнитивных стратегий внутри общей системы математического познания.

Сопоставление паттернов мозговой активности при выполнении математических задач и при метакогнитивной оценке умственного усилия позволило выявить частичное перекрытие активированных областей. Перекрытие наблюдалось прежде всего в префронтальной коре, дорсальной передней поясной коре, островковой доле и предклинье.

Данный результат указывает на существование общих механизмов когнитивного контроля, вовлекаемых как при выполнении вычислительных операций, так и при метакогнитивной оценке собственной познавательной деятельности. Результаты сопоставительного анализа представлены на рисунке 1.

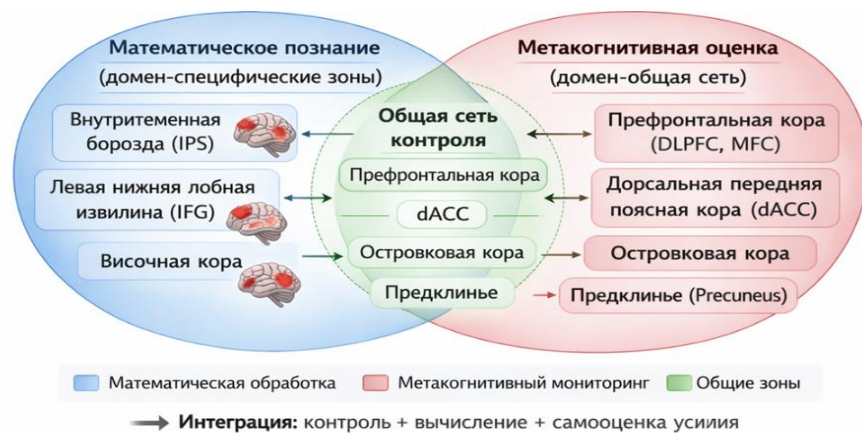


Рисунок 1. Перекрытие нейронных сетей метакогниции и математического познания

Обнаруженное частичное перекрытие нейронных сетей при сохранении специализированных областей математической обработки позволяет интерпретировать

полученные результаты в рамках двухуровневой модели когнитивной организации деятельности.

Согласно данной модели, математическое познание реализуется на уровне объектных когнитивных процессов, связанных с обработкой количественной и символической информации, тогда как метакогнитивные процессы функционируют на мета-уровне, обеспечивая мониторинг, оценку сложности и регуляцию выполнения когнитивных операций. Концептуальная схема данной модели представлена на рисунке 2.



Рисунок 2. Двухуровневая архитектура когнитивной организации

Отдельный интерес представляет анализ межполушарной организации исследуемых процессов. Было установлено, что математическое познание характеризуется преимущественно левополушарной специализацией, особенно в областях нижней лобной извилины и височной коры, что отражает участие языково-символических механизмов обработки информации.

В отличие от этого метакогнитивная оценка умственного усилия демонстрирует более выраженную билатеральную организацию и вовлекает медиальные структуры мозга, связанные с процессами саморефлексии и внутреннего мониторинга. Данные результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4

Особенности латерализации при решении математических и метакогнитивных задач

Домен	Характер латерализации
Математическое познание	Преимущественно левополушарная (IFG, височная кора)
Метакогнитивная оценка	Билатеральная фронто-цингуло-инсулярная сеть

Таким образом, результаты проведенного эмпирического исследования позволяют сделать вывод о том, что метакогнитивный мониторинг и математическое познание образуют функционально взаимосвязанную систему когнитивной организации деятельности. Полученные данные свидетельствуют о том, что решение математических задач опирается на специализированные механизмы обработки количественной и символической информации, тогда как метакогнитивная оценка субъективного умственного усилия реализуется в рамках доменно-общих систем когнитивного мониторинга и контроля. Обнаруженное частичное перекрытие нейронных сетей при сохранении доменно-специфических компонентов

математической обработки подтверждает предположение о двухуровневой архитектуре когнитивной деятельности, в которой объектный уровень решения задач дополняется мета-уровнем оценки и регуляции познавательных процессов. Установленные зависимости между объективной сложностью математических задач, вовлеченностью систем когнитивного контроля и субъективной оценкой умственного усилия подтверждают гипотезу о регуляторной роли метакогнитивного мониторинга в структуре математического мышления. Тем самым результаты исследования эмпирически подтверждают выдвинутые гипотезы и демонстрируют, что метакогнитивные процессы выступают важным механизмом организации и саморегуляции математической познавательной деятельности.

В Заключении обобщаются результаты исследования, излагаются основные выводы, подтверждающие гипотезы и положения, выносимые на защиту, освещаются перспективы дальнейших исследований.

Проведенное исследование было направлено на выявление когнитивных механизмов взаимодействия метакогнитивного мониторинга и процессов математического познания.

В ходе работы была реализована интегративная исследовательская стратегия, объединяющая теоретический анализ современных когнитивно-психологических моделей метакогниции и математического мышления с эмпирическим исследованием их функциональной организации с использованием методов нейровизуализации.

Полученные результаты позволяют сделать ряд обобщающих выводов.

Во-первых, установлено, что метакогнитивный мониторинг умственного усилия и процессы математического познания образуют взаимосвязанную систему когнитивной организации деятельности, в которой математическая обработка реализуется на объектном уровне решения задачи, а метакогнитивные процессы обеспечивают мониторинг, оценку сложности и регуляцию когнитивных операций.

Во-вторых, показано, что метакогнитивный мониторинг опирается на доменно-общие механизмы когнитивного контроля, которые вовлекаются как при оценке умственного усилия, так и при решении математических задач. Это подтверждает предположение о том, что метакогниция выполняет интегративную регуляторную функцию в структуре познавательной деятельности.

В-третьих, выявлено, что математическое познание характеризуется наличием доменно-специфических механизмов обработки количественной и символической информации, что проявляется в активации специализированных областей лобно-теменно-височной сети.

В-четвертых, установлено, что увеличение сложности математических задач сопровождается усилением вовлеченности метакогнитивных механизмов мониторинга, что свидетельствует о включенности процессов оценки усилия в систему регуляции математического мышления.

В-пятых, показано, что различные арифметические операции реализуются с использованием различных когнитивных стратегий, что отражается в дифференцированных паттернах активности внутри общей системы математической обработки.

Наконец, выявлены различия в межполушарной организации исследуемых процессов: математическое познание характеризуется преимущественно левополушарной специализацией, тогда как метакогнитивный мониторинг демонстрирует более билатеральную функциональную организацию.

Полученные результаты позволили эмпирически подтвердить разработанную в диссертации двухуровневую модель когнитивной организации деятельности, в которой математическое познание рассматривается как объектный уровень обработки информации, а метакогнитивный мониторинг — как мета-уровень регуляции и контроля.

Таким образом, выдвинутые в работе гипотезы получили эмпирическое

подтверждение, а поставленные задачи исследования были решены.

Результаты исследования расширяют представления о роли метакогниции в структуре сложной интеллектуальной деятельности и уточняют механизмы регуляции математического мышления.

Полученные данные могут быть использованы при разработке теоретических моделей саморегуляции познавательной деятельности, а также в образовательной психологии при создании методов обучения, направленных на развитие метакогнитивных навыков и стратегий решения математических задач. Ограничения проведенного исследования связаны с относительно небольшим размером выборки, характерным для фМРТ-исследований, и ее гомогенностью (молодые здоровые добровольцы с высоким уровнем образования). Преодоление данных ограничений в будущем позволит расширить понимание выявленных закономерностей на другие возрастные и клинические группы.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на применение методов анализа эффективной связности (DCM, PPI) для изучения направленности влияний между выделенными уровнями, использование методов стимуляции мозга (ТМС/ТЭС) для установления причинно-следственных связей, а также на расширение исследовательской парадигмы за счет включения других когнитивных доменов и выборок с различным уровнем математической компетентности и метакогнитивных способностей. Развитие данной темы представляется перспективным для разработки нейробиологически обоснованных методов диагностики и коррекции учебных трудностей в математике, а также для создания адаптивных обучающих систем, учитывающих не только успешность, но и субъективную «стоимость» выполняемых заданий.

Основное содержание исследования отражено в следующих публикациях автора:

1. Kouzalis A. и др. Advanced technologies and mathematical metacognition: The present and future orientation //BioSystems. – 2024. – Т. 245. – С. 105312.
2. Kouzalis A. A Group level analysis of self-evaluations associated with cognitive load //Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Психология и педагогика. – 2023. – Т. 20. – №. 3. – С. 578 – 587.
3. Kouzalis A., Ershova R. V. A region of interest analysis focusing on the insular and cingulate cortices //Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Психология и педагогика. – 2024. – Т. 21. – №. 1. – С. 328 – 339.
4. Kouzalis A. The role of metacognition in healthcare: Shaping the future with artificial intelligence //IJPS. – 2026. – Т. 8. – №. 1. – С. 8 –11.
5. Kouzalis A., Ershova R. V. Neuroimaging of Mathematical Cognition: Regions of The Brain Associated with Mathematical Problem Solving// Сборник научных трудов СХХII Международной научно-практической конференции «Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке», М., 2026. – С.113-118

Кузалис Алексис (Республика Кипр)
«Метакогниции в структуре математического познания: когнитивный и нейросетевой анализ»

Данная диссертация посвящена исследованию нейронных взаимосвязей между математическим познанием и метакогницией с особым акцентом на умственном усилии как метакогнитивном сигнале. В работе рассматривается центральная теоретическая проблема: опирается ли метакогнитивный мониторинг в математике преимущественно на доменно-общие системы когнитивного контроля или же отражает доменно-специфическую специализацию внутри математических нейронных сетей. Основываясь на данных когнитивной нейронауки, педагогической психологии и вычислительного моделирования, исследование интегрирует двухуровневые теоретические модели, разграничивающие объектный уровень математической обработки и мета-уровень мониторинга и контроля.

Было проведено событийно-связанное фМРТ-исследование с участием двадцати здоровых молодых взрослых с использованием 3Т-сканера Siemens Magnetom Verio. Участники решали арифметические задачи (сложение, вычитание, умножение, деление) трёх уровней сложности, после чего давали субъективную оценку воспринимаемого умственного усилия. В качестве контрольного условия использовалось задание на различение шрифта. Нейровизуализационные данные были предварительно обработаны и проанализированы в программе AFNI с применением двухуровневой общей линейной модели и группового анализа со случайными эффектами (с FDR-коррекцией).

Результаты выявили перекрывающиеся, но функционально различимые нейронные системы. Решение математических задач активировало лобно-теменную сеть, включающую внутритеменную борозду и латеральную префронтальную кору, а также двусторонние височные области, связанные с символической и семантической переработкой. Метакогнитивная оценка умственного усилия стабильно активировала доменно-общую фронто-цингуло-инсулярную сеть, включающую дорсолатеральную префронтальную кору, дорсальную переднюю поясную кору, переднюю островковую кору и предклинье.

Kouzalis Alexios (Republic of Cyprus)
«Metacognition in the structure of mathematical cognition: a cognitive and neural network analysis»

This dissertation investigates the neural relationship between mathematical cognition and metacognition, with a particular focus on mental effort as a metacognitive signal. The study addresses a central theoretical debate concerning whether metacognitive monitoring in mathematics relies primarily on domain-general control systems or reflects domain-specific specialization within mathematical networks. Drawing on cognitive neuroscience, educational psychology, and computational modeling, the research integrates two-layer theoretical frameworks distinguishing object-level mathematical processing from meta-level monitoring and control.

An event-related fMRI experiment was conducted with twenty healthy young adults using a 3T Siemens Magnetom Verio scanner. Participants solved arithmetic problems (addition, subtraction, multiplication, division) at three levels of difficulty, followed by subjective ratings of perceived mental effort. A font-comparison task served as a control condition. Neuroimaging data were preprocessed and analyzed using AFNI with a two-level general linear model and random-effects group analysis (FDR-corrected).

Results revealed overlapping yet dissociable neural systems. Mathematical problem solving engaged a fronto-parietal network including the intraparietal sulcus and lateral prefrontal cortex, alongside bilateral temporal regions associated with symbolic and semantic processing. Metacognitive evaluation of effort consistently activated a domain-general fronto-cingulo-insular network, including the dorsolateral prefrontal cortex, dorsal anterior cingulate cortex, anterior insula, and the precuneus.

Task difficulty modulated both mathematical and metacognitive hubs, indicating that subjective effort appraisal scales with objective computational demand. Operation-specific activation patterns further demonstrated differentiated strategy and retrieval demands across arithmetic types.

The findings support a domain-general metacognitive architecture dynamically interacting with domain-specific mathematical circuits. The study refines neurocognitive models of mental effort as both a monitoring signal and regulatory mechanism within closed-loop control systems. The results have implications for educational practice, clinical assessment, adaptive learning technologies, and biologically informed computational models of self-regulated cognition.

Kouzalis Alexios

**METACOGNITION IN THE STRUCTURE OF MATHEMATICAL COGNITION:
COGNITIVE AND NEURAL NETWORK ANALYSIS**

Synopsis of the Dissertation
for the PhD degree in Psychology

Specialty - 5.3.1. General psychology, psychology of personality,
History of Psychology (Psychological Sciences)

Moscow
2026

The research has been implemented at the Department of Psychology and Pedagogy of the Faculty of Philology of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University).

Research Supervisor:

Dr. Sc. in Psychology (19.00.01), Full Professor

Ershova Regina Vyatcheslavovna, Professor of the Department of Psychology and Pedagogy of the Faculty of Philology of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

Official opponents:

Dr. Sc. in Psychology (19.00.05), Associate Professor

Miklyaeva Anastasia Vladimirovna, Professor of the Department of General and Social Psychology of the Institute of Psychology of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education, Russian State Pedagogical University named after A. I. Herzen

Dr. Sc. in Psychology (19.00.07), Associate Professor,

Fomin Andrey Evgenievich, Doctor of Psychological Sciences Professor of the Department of Developmental Psychology and Education of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovsky

Dr. Sc. in (19.00.01), Associate Professor,

Karpov Alexander Anatolievich, Professor of the Department of Labor Psychology and Organizational Psychology of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Yaroslavl State University named after P.G. Demidov

The dissertation defense will take place on June 19, 2026, at _____, at a meeting of the standing dissertation council 0500.008 at the Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, located at building 6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198.

The dissertation is available for review at the Educational and Scientific Information Library Centre (Scientific Library) of the Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, located at building 6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198.

The announcement of the defense and the dissertation abstract are available at <https://www.rudn.ru/science/dissovet/dissertacionnye-sovety/pds-0500008> and <https://vak.gisnauka.ru/>

The abstract was sent out on May __, 2026.

Academic Secretary of the Dissertation Council: Dr. Sc. in Pedagogy, Associate Professor I.I. Prosvirkina

GENERAL CHARACTERISTICS OF THE WORK

Relevance of the study. Modern research in the field of cognitive psychology shows that the success of cognitive activity is determined not only by the level of development of basic cognitive functions, but also by the ability of the subject to monitor and regulate his own thought processes. The foundations for the study of metacognition were laid down in the works of J. Flavell (1979), and were further developed in the models of metacognitive control and monitoring proposed by Nelson (1996), as well as in modern cognitive and neurocognitive research (Fleming & Lau, 2014).

Metacognition plays a special role in the field of mathematical cognition, which is one of the most complex forms of intellectual activity. Solving mathematical problems requires the integration of various cognitive processes: operations with symbolic information, quantitative analysis, working memory, executive control, as well as the choice of solution strategies. Under these conditions, metacognitive monitoring allows the subject to assess the degree of difficulty of the task, adjust the strategies for solving and regulate the cost of mental effort. As shown by the studies of Garofalo and Lester (1985), as well as Mevarech (1995), metacognitive processes have a significant impact on the success of mathematical activity of students and are an important factor in the development of mathematical thinking.

Behavioral research strongly demonstrates that the level of metacognitive skill development is one of the most significant factors in math learning success. Metacognitive interventions allow students to understand the structure of the problem, control the course of reasoning and detect errors in a timely manner, which significantly increases the efficiency of solving mathematical problems (Desoete et al., 2003; Pennequin et al., 2010). Moreover, metacognitive regulation is considered as a key mechanism for the formation of independent cognitive activity and the development of problem-solving strategies.

Despite a significant number of studies on metacognition and mathematical reasoning, these areas of research have largely developed independently of each other. Within cognitive psychology, metacognition has traditionally been studied primarily in the context of perception, memory, and decision-making processes (Fleming & Lau, 2014; Valk et al., 2016), while mathematical cognition research has focused on the mechanisms of numerical processing, quantitative representations, and symbolic operations (Dehaene & Cohen, 1995; Li & Kim, 2025). As a result, the problem of interaction between metacognitive monitoring and mathematical thinking processes remains insufficiently studied.

Of particular interest is the phenomenon of subjective mental effort, which can be considered as one of the key indicators of metacognitive monitoring. The assessment of the effort spent reflects the subjective perception of the complexity of the task and the current state of cognitive resources, and also serves as a signal for the regulation of further cognitive activity. Current research shows that subjective assessment of effort is related to the processes of cognitive control, uncertainty monitoring, and resource allocation (Khachouf et al., 2017; Schnaubert & Schneider, 2022).

The development of neuroimaging methods has significantly expanded the possibilities of studying the functional organization of cognitive processes. The use of functional magnetic resonance imaging makes it possible to study the dynamics of brain activity in the process of performing cognitive tasks and compare it with various aspects of cognitive activity. Research shows that metacognitive processes rely on the interaction of distributed cognitive control and self-referential processing systems (Valk et al., 2016; Jiang et al., 2022), while mathematical thinking is associated with the activation of the frontoparietal networks, which provide numerical processing and problem solving (Li & Kim, 2025). However, the main significance of such studies lies not in the description of individual neural structures, but in the clarification of the functional organization of cognitive processes and the mechanisms of their interaction.

Despite significant progress in the study of metacognition and mathematical cognition, there are still no studies in which these processes would be considered within the framework of a single

experimental paradigm. In particular, there is insufficient research on how the metacognitive assessment of subjective mental effort relates to the processes of mathematical processing and what functional mechanisms ensure their interaction.

Thus, the relevance of this study is determined by the need for a comprehensive analysis of the interaction of metacognitive processes of monitoring and control with the cognitive mechanisms of mathematical thinking. The study of this problem allows us to deepen the understanding of the structure of human cognitive activity, clarify the role of metacognition in the regulation of thinking and contribute to the development of modern cognitive and psychological models of mathematical cognition.

The degree of development of the scientific problem. The problem of the interaction of metacognition and mathematical cognition is actively discussed in modern cognitive psychology and cognitive neuroscience. However, existing research is mainly developed within the framework of two relatively independent areas: the study of the cognitive mechanisms of mathematical thinking and the analysis of the processes of metacognitive monitoring and control.

Studies of mathematical cognition have shown that the processing of numerical information and the solution of arithmetic problems rely on the functioning of the distributed frontoparietal network of the brain, in which the intraparietal sulcus (IPS) plays a key role in the representation of quantitative quantities and the performance of computational operations (Li & Kim, 2025). A number of studies also demonstrate the involvement of lateral frontal areas and temporal cortical regions, which provide symbolic processing of numerical information and the extraction of arithmetic facts from long-term memory (Özcan & Gümüş, 2019; Jia et al., 2021).

Within the framework of metacognition research, special attention is paid to the processes of monitoring uncertainty, assessing the correctness of decisions and the formation of subjective confidence. The work of Jiang et al. (2022) and Li et al. (2022) shows that the medial and lateral regions of the prefrontal cortex, including the dorsal anterior cingulate cortex, the dorsomedial prefrontal cortex, and the lateral frontopolar region, play a key role in metacognitive monitoring. These structures are considered as important elements of the cognitive control system, which provides an assessment of one's own cognitive processes and regulation of behavior.

Current neuroimaging studies demonstrate that when metacognitive assessments (e.g., confidence or probability of error) are incorporated into mathematical and logical tasks, there is an additional activation of metacognitive systems, indicating a functional interaction between computational and monitoring processes (Jiang et al., 2022; Li & Kim, 2025). However, these processes are most often analyzed separately, which makes it difficult to identify their systemic interconnection.

Various methodological approaches are used to study metacognitive processes. One of the most common is the use of tasks followed by an assessment of confidence or probability of error, which allows the analysis of changes in cognitive activity depending on the accuracy of the decision and the subjective assessment of the result (Jiang et al., 2022). Another approach involves the use of computational models of metacognitive sensitivity and efficiency based on signal detection theory and dynamic evidence accumulation models (Bellon et al., 2020). In addition, research is actively developing that combines data from various neuroimaging methods to analyze the structural and functional organization of cognitive processes (Jia et al., 2021; Li & Kim, 2025).

In recent years, considerable attention has also been paid to cross-domain studies of metacognition. Comparative studies show that metacognitive monitoring can have both domain-general and domain-specific characteristics. For example, Bellon et al. (2020) demonstrate that in the process of development, metacognitive abilities gradually become more universal and begin to spread to different cognitive areas. At the same time, studies by Jiang et al. (2022) and Li et al. (2022) show the existence of differences between the processes of self-reflective metacognition and the

mechanisms of understanding the mental states of other people (mentalizing), which highlights the complex hierarchical organization of metacognitive processes.

A separate line of research is related to the analysis of individual differences in metacognitive accuracy and their relationship to emotional and cognitive factors, such as mathematical anxiety and features of cognitive control (WeolAe et al., 2007; Özcan & Gümüş, 2019; Jia et al., 2021).

Despite the significant amount of accumulated data, the current state of research is characterized by a number of limitations. First, most existing work analyzes metacognitive processes primarily in perceptual or memory tasks, while their role in complex forms of intellectual activity, such as mathematical reasoning, remains poorly understood. Second, the metacognition measures used in studies vary significantly (confidence scores, calibration scores, signal detection theory metrics), making it difficult to compare the results of different studies (Özcan & Gümüş, 2019; Bellon et al., 2020). Finally, much of the existing data is correlational in nature, which limits the ability to interpret the causal mechanisms of interaction between metacognitive and cognitive processes (Jia et al., 2021; Jiang et al., 2022).

Thus, despite convincing data on the role of metacognitive processes in the regulation of cognitive activity and significant progress in the study of the neural foundations of mathematical thinking, the interaction of metacognitive monitoring and mathematical cognition processes remains insufficiently studied. To date, there are no empirical studies in which these processes would be systematically analyzed within the framework of a single experimental paradigm that makes it possible to compare the mechanisms of mathematical processing and metacognitive assessment.

The identified theoretical and empirical gap defines the scientific problem of this study aimed at studying the interaction of metacognitive monitoring of mental effort and the processes of mathematical cognition.

The purpose of the study is to identify and empirically substantiate the nature of the interaction of metacognitive processes of monitoring and control with the processes of mathematical thinking, as well as to determine their functional organization using neuroimaging methods.

The object of this research is metacognition and mathematical cognition.

The subject of this research is the cognitive mechanisms of interaction between metacognitive monitoring (assessment of mental effort) and the processes of mathematical cognition in solving arithmetic problems of varying complexity.

Research hypotheses.

General hypothesis:

1. Metacognitive monitoring of mental effort and the processes of mathematical cognition are interrelated but functionally distinguishable levels of cognitive organization of activity. Mathematical calculations are implemented at the level of object cognitive processes, while metacognitive mechanisms provide monitoring, difficulty estimation, and regulation of task execution.

Particular hypotheses:

1. Metacognitive monitoring and mathematical cognition rely on overlapping cognitive control mechanisms. It is assumed that the processes of assessing mental effort and solving mathematical problems involve general systems for monitoring and regulating cognitive activity.

2. Mathematical cognition is characterized by the presence of domain-specific mechanisms for processing information. Solving mathematical problems, in addition to involving cognitive control systems, requires the activation of specialized mechanisms for processing quantitative and symbolic information.

3. The level of complexity of mathematical problems has a parametric effect on the involvement of metacognitive monitoring mechanisms. It is assumed that the increase in the objective complexity of tasks is accompanied by an increase in the activity of cognitive control systems and subjective assessment of mental effort.

4. Different types of arithmetic operations are characterized by different cognitive strategies for processing information. This should be manifested in the differences in the functional organization of the processes of mathematical cognition when performing the operations of addition, subtraction, multiplication and division.

5. Mathematical cognition and metacognitive assessment of mental effort are characterized by different interhemispheric organization. It is assumed that mathematical processing will demonstrate a more pronounced left-hemispheric specialization, while metacognitive monitoring will be more bilateral.

Achieving this goal requires solving the **following tasks**:

1. To conduct a theoretical analysis of modern psychological and neurocognitive models of metacognition and mathematical cognition, identifying the main approaches to the study of their functional organization and interconnection.

2. To systematize ideas about the role of metacognitive monitoring in the structure of cognitive activity, clarifying the meaning of the subjective assessment of mental effort as a mechanism of cognitive regulation.

3. To develop and implement an experimental research paradigm that makes it possible to compare the processes of solving mathematical problems of varying complexity and the subsequent metacognitive assessment of the efforts expended within the framework of a single design.

4. To empirically study the features of the functional organization of mathematical cognition, including the influence of the type of arithmetic operation and the level of complexity of tasks on the parameters of cognitive activity.

5. To identify the cognitive and neural correlates of metacognitive monitoring of mental effort, as well as to determine the degree of functional overlap and differences between the processes of mathematical processing and metacognitive assessment.

6. To interpret the results in the context of modern theories of metacognition, self-regulation and mathematical thinking, clarifying the nature of the interaction of metacognitive and mathematical processes.

The theoretical and methodological basis of the work is the following scientific principles:

1) the principle of the unity of consciousness and activity (Leontiev, 1975; Rubinstein, 2010) made it possible to consider the neural correlates of cognitive processes in the performance of mathematical and metacognitive tasks; 2) the principle of determinism served as the basis for the study of the neurological foundations of cognitive processes; 3) based on the principle of psychophysical unity, metacognitive and cognitive processes were considered in an inextricable connection with their neurocorrelates. The following metacognitive theories were used as the theoretical basis for the study: the Flavell (1979) model, in which metacognitions are considered as "cognitions about cognitions", including monitoring and control of one's own cognitive processes; the Nelson (1990) model, which distinguishes between the object level (the performance of a task) and the meta-level of self-esteem, which is responsible for monitoring and controlling the object level; The theory of signal detection and metacognitive performance, in which confidence and performance assessment are modeled as metacognitive sensitivity (meta-D'), which separates the accuracy of monitoring from task performance. Bayesian and probabilistic frameworks made it possible to consider metacognitive judgments as second-order conclusions about the reliability of first-order decisions associated with computational uncertainty models; According to the theory of management, it was assumed that metacognitions are built into a closed system of regulation, where monitoring signals (e.g., effort, uncertainty) affect decisions about control (distribution of efforts, choice of strategy), the dissertation research was also based on the theories of mathematical cognition: a model of mathematical cognition that assumes the existence of three different but interacting neural systems for processing numerical information: analog quantity, Visual Arabic and verbal codes (the triple code model; Dehaene & Cohen, 1995) a general resource model that relies on working memory, executive functions, attention

control, and cognitive load.

Materials and methods of research. In accordance with the purpose of the study and the hypotheses put forward, a set of research methods was used:

1) the method of theoretical analysis of literary sources on various aspects of the problem under consideration;

2) Experimental method. In the course of the experimental study, the participants inside the scanner were sequentially presented with blocks of mathematical problems of varying complexity and type of arithmetic operations (addition, subtraction, division, multiplication) and control tasks involving the comparison of fonts of visually presented numbers, which made it possible to control the basic processes of visual perception and the decision-making process. Each block included 12 math and 3 control tasks, varying in three levels of difficulty, determined by the number of digits in the operands (single-digit, two-digit and three-digit numbers). In total, 36 mathematical and 9 control tasks were presented. After each mathematical block, a metacognitive task was presented. Participants were asked to rate subjective mental effort or difficulties they faced in the previous set of tasks. Each assessment period was followed by a 10-second rest (fixation) interval. The full experimental block consisted of a math block with built-in quizzes → metacognitive assessment → fixation.

Data collection using fMRI

The study was carried out using a Siemens Magnetom Verio magnetic resonance imaging scanner (Syngo MR B17) with a magnetic field strength of 3 T, installed at the National Research Center "Kurchatov Institute" (Moscow). To capture functional images, a gradient echo-planar imaging (EPI) blood-oxygen-level-dependent (BOLD) sequence was used, which provides T2*-weighted images. Scan parameters: repetition time (TR), echo time (TE), slice thickness, matrix size, etc., were set in accordance with the standard protocols for functional MRI (fMRI) cognitive loads adopted at this center. The choice of these parameters is due to the need to achieve an optimal balance between spatial and temporal resolution, as well as contrast sensitive to the BOLD signal

Pre-processing of functional and anatomical images was performed using the AFNI (Analysis of Functional NeuroImages) software package. At the first stage, the slice timing was corrected using the 3dTshift function, which is necessary to take into account the different times of obtaining slices within the same volume (TR). Then, using the 3dvolreg function, the artifacts of the head movement were corrected: all images were combined with the first volume of the time series by means of a rigid transformation by six parameters (three broadcasts and three rotations).

A high-resolution anatomical image of each participant was combined (coregistration) with a functional image using a script align_epi_anat.py. All data were then spatially normalized into the MNI (Montreal Neurological Institute) stereotactic space using the @auto_t1rc function. After normalization, 3dmerge was used to improve the signal-to-noise ratio and compensate for inter-individual anatomical differences. The final step in the pre-processing was to remove the signal from tissues outside the brain (masking) using the automatic 3dAutomask function.

Statistical processing of fMRI data was performed using general linear model (GLM) methods. To build activation maps at the individual level, the 3dDeconvolve function was used, which implements the ordinary least squares (OLSQ) method. Based on this model, the regression parameters (vector $*b*$) for each voxel were estimated in accordance with the equation of the linear model $z = Xb$, where $*z*$ is the signal intensity vector in the time series, and X is the regression matrix (design matrix).

3) Methods of statistical analysis. For statistical analysis, a two-level approach based on the Common Linear Model (GLM) was implemented.

At the first (individual) level, a general linear model was built for each participant using the "3dDeconvolve" and "3dREMLfit" commands of the AFNI package. The model included regressors for each condition: mathematical operation × level of complexity, metacognitive assessment, control task, and baseline fixation state. Interference regressors reflecting head movement parameters were

also included in the analysis.

At the individual level, contrasts of interest were calculated in order to distinguish the activity associated with: a) metacognitive tasks compared to the baseline state (fixation) and compared to the control task; b) mathematical problems in comparison with the basic state (fixation) and in comparison with the control task; c) comparison of various mathematical operations and levels of complexity.

At the second (group) level, random-effects analysis was carried out, during which individual contrast maps were averaged and statistically evaluated. A combined threshold was used to correct for multiple comparisons: the voxel significance level was set at $p < .01$, adjusted for False Discovery Rate (FDR) in combination with a cluster threshold of $p < .001$, as recommended for fMRI data (Woo et al., 2014). At the final stage, an analysis of regions of interest (ROI) was carried out. For clusters showing statistically significant activation, the dynamics of the BOLD signal was analyzed, and anatomical binding of the identified regions was performed. Localization of activated clusters was carried out using the Daemon Atlas (TTAtlas) implemented in the AFNI package.

Empirical sampling.

The study involved twenty young, healthy adults (10 women, 10 men, mean age 23.85 years). All participants were right-handed. The criteria for exclusion from the sample were left-handedness, failure to complete the number matching task before screening, and extreme performance (very high or very low) when solving a math problem during the control test. All participants voluntarily agreed to participate in the study.

The reliability and reliability of the main provisions, results and conclusions of the study are ensured by a thorough theoretical and methodological study of the problem; compliance with fundamental methodological and logical-scientific principles; compliance with the accepted standards of theoretical and empirical psychological research; representativeness of the sample; as well as the use of proven methods of data processing that correspond to the goals, subject and objectives of the study. A significant amount of analyzed and systematized theoretical material, as well as a high degree of generalization, which underlies the logic of constructing an empirical study, testify to the reliability and scientific reliability of its results and conclusions.

The most significant and new results of the study, obtained personally by the applicant, and their scientific novelty are as follows:

1. *An integrative cognitive model of interaction between metacognitive monitoring and mathematical cognition has been developed, in which the subjective assessment of mental effort is considered as a key mechanism for regulating cognitive activity. In the model, mental effort acts simultaneously as a result of monitoring current cognitive processes and as a regulatory signal that affects the distribution of resources and the choice of a strategy for solving a problem.*

2. *It is empirically shown that metacognitive and mathematical processes rely on partially overlapping cognitive mechanisms that implement the functions of monitoring, complexity assessment and cognitive control, which allows us to consider metacognition as an integrative component of mathematical activity.*

3. *The existence of functional differentiation between metacognitive monitoring and mathematical processing, manifested in the involvement of domain-specific mechanisms for processing symbolic and quantitative information in solving arithmetic problems, has been established.*

4. *It is shown that the subjective assessment of mental effort is a valid metacognitive indicator of cognitive load, systematically associated with changes in the functional activity of cognitive control systems when solving mathematical problems of varying complexity.*

5. *A parametric relationship was revealed between the objective complexity of mathematical problems and the involvement of metacognitive monitoring mechanisms, which indicates the inclusion of metacognitive processes in the structure of mathematical thinking and their role in the regulation of cognitive activity.*

6. New data on the functional organization of mathematical cognition have been obtained, demonstrating that different types of arithmetic operations are characterized by specific cognitive strategies and different activation profiles within the general system of mathematical processing.

7. Differences in the interhemispheric organization of metacognitive and mathematical processes are revealed, manifested in the predominantly left-hemispheric specialization of mathematical cognition and a more bilateral organization of metacognitive monitoring.

Thus, the results obtained expand the understanding of the structure of cognitive activity and clarify the role of metacognition as a mechanism for regulating mathematical thinking.

The theoretical significance of the work is determined by the contribution of the results to the development of cognitive and psychological ideas about the structure and regulation of human cognitive activity.

First of all, the work contributes to *the integration of two areas of modern psychological research — metacognition and mathematical cognition*, which have traditionally been studied mainly independently of each other. The results obtained demonstrate that metacognitive monitoring is not external to the processes of mathematical thinking, but is an internal mechanism for regulating cognitive activity, which provides an assessment of the complexity of the task, allocation of cognitive resources and adjustment of solution strategies.

The study contributes to the development of theoretical models of metacognitive control, clarifying the role of subjective mental effort as one of the central indicators of metacognitive monitoring. It is shown that the subjective assessment of effort reflects not only the experience of the complexity of the task, but also performs the function of a signal for the regulation of cognitive activity, integrating information about the current cognitive load and available resources.

The results obtained also contribute to the development of ideas about the functional organization of mathematical thinking. It is demonstrated that mathematical cognition includes not only specialized mechanisms for processing numerical and symbolic information, but is also closely related to the processes of metacognitive monitoring and cognitive control. Thus, mathematical activity is considered as a multi-level system of cognitive regulation, including both the object level of problem solving and the meta-level of evaluation and control.

Of particular importance is the two-level model of the organization of cognitive activity proposed in the paper, in which mathematical cognition is considered as the object level of information processing, and metacognitive monitoring as the meta-level of regulation. This model clarifies the ideas about the mechanisms of interaction between the processes of thinking and self-reflection and can be used for further development of theories of self-regulation of cognitive activity.

The results of the study also contribute to the discussion about the domain-general and domain-specific nature of metacognition. It is shown that metacognitive processes are based on universal mechanisms of cognitive control, but their functioning parametrically depends on the characteristics of a particular cognitive activity. Thus, metacognition can be considered as a domain-general regulatory mechanism that adapts to the requirements of a particular cognitive domain.

In addition, the data obtained expand theoretical ideas about the structure of cognitive self-regulation, demonstrating that the subjective assessment of effort is an important component of the cognitive control system, ensuring the dynamic adaptation of cognitive activity to the changing requirements of the task.

In general, the results of the study contribute to the development of modern cognitive and psychological models of thinking, self-regulation and metacognition, clarifying the mechanisms of their interaction in the structure of complex intellectual activity.

The practical significance of the thesis is determined by the possibility of applying the results obtained in educational, diagnostic, scientific and methodological practice.

The data obtained on the role of metacognitive monitoring of mental effort in the structure of mathematical cognition can be used in the development of programs for the development of

metacognitive skills aimed at forming students' ability to consciously control their own cognitive processes, assess the complexity of tasks and optimize the distribution of cognitive resources.

The results of the study can be applied in educational psychology and educational psychology in the creation of methods for teaching mathematics focused on the development of strategies for self-regulation of thinking. Taking into account the subjective assessment of cognitive load allows you to improve teaching methods aimed at increasing the effectiveness of solving mathematical problems and the formation of reflective skills in students.

The revealed patterns of the relationship between metacognitive assessment of effort and the processes of mathematical thinking can be used in the development of adaptive educational technologies and digital learning systems that take into account not only the objective complexity of tasks, but also the subjective state of the student. This is especially important when working with students who have difficulties in mathematics or increased mathematical anxiety.

The results of the study are also of practical importance for the psychological diagnosis of cognitive and metacognitive processes. The data obtained can be used in the development of diagnostic methods aimed at assessing the features of metacognitive monitoring and cognitive control in educational and professional activities.

In addition, the results of the study can be used in research and methodological work related to the study of cognitive processes, metacognition and self-regulation of cognitive activity, as well as in the development of interdisciplinary research at the intersection of cognitive psychology, pedagogy and neuroscience.

In general, the results obtained expand the possibilities of applying modern cognitive and psychological approaches in educational practice, psychological diagnostics and the development of teaching technologies focused on the development of self-regulation of cognitive activity.

The research was carried out in stages.

1. The theoretical and methodological stage included a systematic review of scientific literature on the problems of metacognition, mental effort, mathematical cognition, as well as their neurocorrelates identified using functional magnetic resonance imaging (fMRI). Based on the analysis, hypotheses were formulated regarding general and specific neural substrates of metacognitive and mathematical processes. At the same time, an experimental research paradigm was developed, the procedure for presenting stimuli and registering behavioral responses was programmed. Approval of the ethics committee was obtained and a sample of subjects was formed.

2. At the experimental stage, behavioral screening was carried out to verify the participants' compliance with the criteria for inclusion in the study, and the experimental study itself was implemented in accordance with the previously developed design. The main data collection was carried out at the National Research Center "Kurchatov Institute" (Moscow) using a Siemens Magnetom Verio magnetic resonance imaging scanner.

3. The stage of data processing and analysis included pre-processing of functional data using the AFNI (Analysis of Functional NeuroImages) package and statistical analysis of the results obtained within the framework of the general linear model (GLM), including individual and group processing levels.

4. At the final interpretative and generalizing stage, the identified patterns of neural activity were interpreted in the context of the hypotheses being tested and existing theoretical models. Based on the results obtained, chapters of the dissertation work were prepared, and the research materials were reflected in scientific articles, and were also presented in the form of reports at international scientific conferences.

Provisions to be defended:

1. Metacognitive monitoring and mathematical cognition are interrelated but functionally distinct levels of cognitive organization of activity. Mathematical problem solving is implemented at the object level of information processing, while metacognitive processes provide monitoring,

complexity assessment, and regulation of cognitive operations.

2. Metacognitive monitoring of mental effort is based on domain-general mechanisms of cognitive control, which are involved in both metacognitive assessment and mathematical problem solving, which indicates the systemic integration of regulatory and computational components of cognitive activity.

3. Mathematical cognition is characterized by the presence of domain-specific cognitive mechanisms that ensure the processing of quantitative and symbolic information and complement the work of domain-general systems of cognitive control.

4. Subjective assessment of mental effort is a significant metacognitive signal that reflects the level of cognitive load and participates in the regulation of the distribution of cognitive resources when solving problems of varying complexity.

5. The increase in the complexity of mathematical problems is accompanied by an increase in the involvement of metacognitive monitoring mechanisms, which indicates the functional integration of control and mathematical processing processes.

6. Different arithmetic operations are implemented using different cognitive strategies, which is manifested in differentiated patterns of activity within the general system of mathematical cognition.

7. Mathematical cognition and metacognitive assessment are characterized by a different interhemispheric organization, reflecting the differences between the linguistic and symbolic processing of mathematical information and the integrative mechanisms of self-reflective monitoring.

Approbation of the research results. The main provisions and empirical results of the study were discussed at methodological seminars at the Department of Psychology and Pedagogy of the Faculty of Philology of the Peoples' Friendship University of Russia, at scientific conferences of various levels: the international scientific and practical conference "Experimental and Theoretical Research in Modern Science", (Moscow, 2026); XIX International Scientific and Practical Conference "Higher School: Experience, Problems, Prospects. Personality in the Educational Space" (Moscow, RUDN University, 2026); XIII International Scientific and Practical Conference "Society, science, practice" (KRSU, Bishkek, 2026).

The content of the research is reflected in 5 published scientific works of the author, 2 of them are in leading scientific peer-reviewed journals recommended by the Academic Council of the Peoples' Friendship University of Russia ("Regulations on the Award of Academic Degrees" of the Peoples' Friendship University of Russia, approved on 19.02.2018) and 1 article in a journal indexed in the Scopus scientometric database.

Correspondence of the dissertation with the passport of the research area. The provisions and conclusions reflected in the thesis correspond to the passport of the scientific specialty 5.3.1 General Psychology, Psychology of Personality, History of Psychology on the following points: p.7. Psychophysical problem; p.8. Consciousness and cognitive processes. Cognitive psychology; p.9. Thinking, imagination. Emotional and semantic regulation of thinking. Practical thinking in complex systems. Metacognitions, their role in the regulation of human behavior and activity; p.17. Consciousness. States of consciousness. Reflexive processes. Thinking and thought processes, structure, types, methods of research.

Structure and volume of the thesis. The thesis consists of an introduction, 2 chapters, a conclusion, a list of references and supplementary material. The main text of the thesis is set out on 122 pages. The list of references includes 205 sources, of which 164 are in English. The thesis contains 122 tables and 28 figures.

MAIN CONTENT OF THE WORK

The introduction substantiates the relevance of the topic, the development of the problem of the dissertation research, defines the object, subject, goal, tasks, formulates hypotheses, presents the

theoretical and methodological basis, methods, empirical base of the study, scientific novelty, theoretical and practical significance of the research results; provisions submitted for defense, approbation and implementation of the research results, compliance of the dissertation with the passport of the scientific specialty, and See also the structure of the dissertation.

In the first chapter "Structural, functional and neural characteristics of metacognition and mathematical cognition", the first chapter is devoted to the theoretical analysis and systematization of existing approaches to the study of metacognition and mathematical cognition as independent, but interrelated cognitive domains. Special attention is paid to the neurobiological foundations of these processes, which creates a theoretical foundation for the empirical study of their interaction.

Section 1.1 examines the evolution of the concept of "metacognition" from philosophical origins (Plato, Aristotle, Montaigne, Descartes) to modern psychological models. A comparative analysis of the main theoretical approaches is carried out:

Higher-order introspectionist theories (Fleming, 2024), which view metacognition as the result of the formation of a higher-level representation of a first-order state (e.g., confidence in the correctness of a perceptual decision).

Theories of "mindreading" (Carruthers, 2021), which postulate that human metacognition recruits mechanisms that are evolutionarily designed to understand the mental states of other people.

Information-probabilistic models, including signal detection theory (SDT) with the key concept that treats confidence as the inference of metacognitive efficiency (meta- d'/d') (Fleming & Lau, 2014), as well as second-order Bayesian approaches about the reliability of one's own decisions.

Dynamic evidence accumulation models (e.g., the diffuse drift model) that view certainty and error awareness as processes that unfold over time.

A cybernetic (control-regulatory) approach, in which metacognition is built into a closed loop of regulation: monitoring (assessment of uncertainty, difficulties) informs the control system (choice of strategy, distribution of efforts).

A special place in the section is given to the conceptualization of mental effort as a metacognitive signal. Based on the analysis of works (Khachouf et al., 2017; Schnaubert & Schneider, 2022) substantiates the dual nature of mental effort: it acts both as a product of metacognitive control (the result of a decision on the degree of involvement in a task) and as feedback (a signal of subjective difficulty, conflict or exhaustion of resources), which is used to adjust strategies. This position is integrated into the Expected Value of Control (EVC) model, where the dorsal anterior cingulate cortex (dACC) estimates the cost of effort, and the lateral prefrontal cortex implements the selected level of control.

Section 1.2 provides an overview of the neuroimaging correlates of metacognition and mental effort. Data on key brain networks are systematized:

Prefrontal cortex (PFC): The lateral and frontopolar regions provide explicit metacognitive judgments and controlled strategies (Saccenti et al., 2024; Kapetaniou et al., 2025). Medial regions (dmPFCs) are involved in monitoring and mentalization processes (Jiang et al., 2022).

Cingulate cortex (ACC/dACC): Seen as a central node for coding uncertainty and conflict that arise in decision-making, as well as anticipation and experience of effort (Jiang et al., 2022)

Insula : Integrates interoceptive and affective information, providing a phenomenological experience of "feeling of effort". Its role in task difficulty assessment, cognitive fatigue experience, and metamemory accuracy has been shown (Walsh et al., 2023).

Precuneus and posterior cingulate cortex (PCC): Involved in self-referential processes and episodic memory retrieval, which is necessary to contextualize current experience of effort within a "self-model" (Ye et al., 2018; Bader & Wiener, 2024).

Section 1.3 analyzes the conceptual and neural foundations of mathematical cognition. Its historical development and key modern models are considered:

Dehaene & Cohen's Triple Code Model (Dehaene & Cohen, 1995; Skagenholt et al., 2018) postulate the existence of three number representation formats (analog, Arabic-visual, verbal) implemented by partially dissociated but interacting neural networks.

The Domain-Shared Resources model emphasizes the contribution of working memory, executive function, and attention to the success of mathematical activities (Menon, 2016; Panaoura, 2007).

Neuroimaging correlates of mathematical cognition are described in detail:

Intraparietal sulcus (IPS): a key area for representing number magnitude and performing quantitative operations (Faye et al., 2019).

Temporal cortex: The left temporal regions are involved in the extraction of tabular facts (multiplication) and semantic processing of symbolic information (Daitch et al., 2016; Amalric & Dehaene, 2018).

Frontoparietal Meshline: Provides complex calculations, strategic planning, and control.

Special attention is paid to the analysis of the influence of the complexity and type of arithmetic operation on patterns of brain activity (Allen et al., 1992; Brunner, 2021; Pletzer, 2016), as well as individual differences related to gender, level of competence and mathematical anxiety.

Section 1.4 synthesizes the data from the previous two sections and formulates the problem of the interaction between metacognition and mathematical cognition. Analysis of works (Muncer et al., 2022; Valk et al., 2016; Jiang et al., 2022) shows that despite the availability of numerous behavioral data on the association of metacognitive skills with success in mathematics and well-developed neurocognitive models of each domain individually, their integrative study using fMRI remains critically unexplored.

Based on the analysis, the author draws the following key conclusions:

Metacognition and mathematical cognition rely on well-established, but mainly separately studied neural networks: fronto-opercular (for monitoring) and fronto-parietal-temporal (for calculations).

Mental effort is theoretically grounded as a valid metacognitive signal that can be operationalized and investigated using fMRI.

There is an unresolved theoretical debate about the domain-general or domain-specific nature of metacognitive monitoring in the context of mathematical activity.

There are no empirical studies that directly compare the neural correlates of metacognitive effort assessment and mathematical computation proper within the same experimental design.

Thus, the first chapter concludes with the substantiation of the main research gap, which defines the purpose and objectives of the dissertation: empirical testing of the hypothesis about overlapping and dissociable neural substrates of metacognition and mathematical cognition.

The second chapter "Empirical Study of the Relationship between Metacognition and Mathematical Cognition" is devoted to the development of an experimental paradigm and analysis of the results of the study aimed at identifying the cognitive mechanisms of interaction between metacognitive monitoring and mathematical thinking processes.

The study was built in accordance with the theoretical model developed in the first chapter, according to which mathematical cognition is considered as the object level of information processing, and metacognitive assessment of mental effort is considered as a meta-level of monitoring and regulation of cognitive activity.

The experimental paradigm included alternation of the following types of tasks:- solving arithmetic problems (addition, subtraction, multiplication, division);- control task (comparison of number fonts);- metacognitive assessment of subjective mental effort;- period of fixation (rest).

The complexity of the math problems varied in three levels (single-digit, two-digit, and three-digit numbers), which made it possible to investigate the parametric effect of cognitive load on the

processes of mathematical decision and metacognitive monitoring. Table 1 presents examples of mathematical operations, control, and metacognitive tasks used in the experiment.

Table 1.
Examples of mathematical operations, control and metacognitive tasks used in the experiment.

	Light Level	Average Level	Hight Level
Addition	5+9	32+36	859+213
	13 15 16 14	78 69 67 68	1062 972 1172 1072
Subtraction	9-3	101-54	1563-531
	5 7 4 6	37 57 48 47	832 922 942 932
Multiplication	5x7	28x8	453x8
	42 40 30 35	216 214 324 224	3524 3724 3614 3624
Division	30/5	228/3	2472/4
	8 5 7 6	86 77 75 76	518 718 608 618
Control	5#5	82#82	540#540
	5 5 5 5	82 82 82 82	540 540 540 540
Metacognition task	Please evaluate the effort spent on the previous tasks		
	1 2 3 4		

At this stage of the study, a systematic analysis of the obtained fMRI data was carried out in order to identify: common (domain-common) neural networks; domain-specific areas of mathematical processing; parametric modulation of activation by the complexity of the task; operational-specific differences; features of interhemispheric lateralization. Sections 2.1 and 2.2 of the chapter describe in detail the experimental design and procedure for statistical processing of the data obtained.

Section 2.3 is devoted to the analysis of the results of an empirical study aimed at identifying the cognitive and neural mechanisms of interaction between metacognitive monitoring and mathematical cognition. The analysis of the data obtained was carried out in order to test the hypotheses put forward and solve research problems related to the identification of general and specific mechanisms of information processing when performing mathematical and metacognitive tasks.

First of all, the analysis of the neural correlates of the metacognitive assessment of subjective mental effort was carried out. It was found that the performance of a metacognitive task, which requires an assessment of the effort expended in solving the previous block of mathematical problems, is accompanied by the activation of a number of brain regions traditionally associated with the processes of cognitive monitoring and control. The most stable activations were observed in the dorsal anterior cingulate cortex, lateral parts of the prefrontal cortex, insula and precuneus.

These areas form a functional network related to uncertainty assessment, cognitive conflict monitoring, interoceptive awareness, and self-referential information processing. The data obtained allow us to consider the subjective assessment of mental effort as a metacognitive signal that arises as a result of the integration of information about the current state of cognitive resources, the level of complexity of the task performed and the success of the solution. The results of the analysis are presented in Table 2.

Table 2.

Activations in Metacognitive Assessment

Brain area	Hemisphere	Function
Prefrontal cortex	Left and right	Explicit self-assessment, control
Dorsal anterior cingulate	Bilaterally	Conflict monitoring

cortex		
Anterior insula	Bilaterally	Experiencing Effort
Precuneus	Bilaterally	Self-referential processing

Thus, the data obtained confirm the hypothesis that metacognitive monitoring is based on domain-general mechanisms of cognitive control, which provide an assessment of the state of cognitive activity and regulation of the distribution of cognitive resources.

The next stage of the analysis was the study of the functional organization of the processes of mathematical cognition. It was shown that the solution of arithmetic problems is accompanied by the activation of the distributed frontal-parietotemporal network, including the intraparietal sulcus, inferior and middle frontal gyrus, dorsal anterior cingulate cortex, insula and temporal cortical regions.

A special role in the processing of quantitative information is played by the intraparietal sulcus, which is considered as a key structure of the neural system for representing numerical quantities and performing arithmetic operations. Activation of the inferior frontal gyrus is associated with the processes of symbolic processing of numerical information and the involvement of verbally mediated calculation strategies. The temporal regions of the cortex are involved in the extraction of arithmetic facts from long-term memory, which is especially characteristic of the operations of multiplication and division.

The main results of the analysis are presented in Table 3.

Table 3.

Activations in Mathematical Cognition

Brain area	Hemisphere	Function
Intraparietal sulcus (IPS)	Left and right	Quantification
Inferior frontal gyrus (IFG)	Predominantly left	Symbolic recycling
Temporal cortex	Predominantly left	Extract arithmetic facts
Dorsal anterior cingulate cortex (dACC)	Bilaterally	Complexity Control

The data obtained confirm the existence of a specialized mathematical processing system, including both domain-specific areas of quantitative information processing and cognitive control structures that ensure the planning and regulation of computational operations.

Particular attention in the study was paid to the analysis of the influence of the complexity of mathematical problems on the functional organization of cognitive activity. It was found that an increase in the complexity of arithmetic tasks is accompanied by an increase in the activation of the intraparietal sulcus, an increase in the activity of the dorsal anterior cingulate cortex and the insula, as well as an increase in the involvement of the lateral parts of the prefrontal cortex.

These results indicate that with an increase in the computational load, the participation of cognitive control mechanisms that ensure the maintenance of attention, the regulation of decision strategies and the distribution of cognitive resources increases. At the same time, the increased activity of areas associated with metacognitive monitoring indicates that the subjective assessment of mental effort is parametrically dependent on the objective complexity of the tasks performed.

Thus, the results of the analysis confirm the hypothesis that the processes of metacognitive monitoring are integrated into the structure of mathematical cognition and participate in the regulation of cognitive activity when solving problems of varying complexity.

A separate analysis was devoted to the comparison of neural patterns that arise when performing different types of arithmetic operations. It was found that, despite the presence of a

common mathematical processing network, individual arithmetic operations are characterized by different activation profiles.

For example, multiplication and division operations demonstrated a more pronounced activation of the temporal cortex, which is associated with the use of strategies for extracting arithmetic facts from long-term memory. At the same time, addition and subtraction operations were accompanied by a more pronounced activation of parietal regions, reflecting the use of procedural quantification strategies.

The results obtained indicate the existence of functional differentiation of cognitive strategies within the general system of mathematical cognition.

A comparison of brain activity patterns in math tasks and metacognitive assessment of mental effort revealed partial overlap in the activated areas. Overlap was observed primarily in the prefrontal cortex, dorsal anterior cingulate cortex, insula, and precuneus.

This result indicates the existence of common cognitive control mechanisms involved both in the performance of computational operations and in the metacognitive assessment of one's own cognitive activity. The results of the comparative analysis are presented in Figure 1.

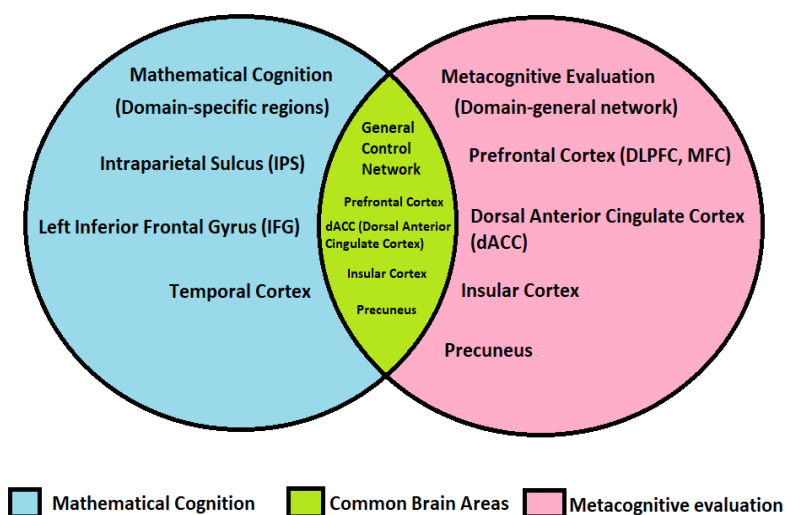


Figure 1. **Overlapping neural networks of metacognition and mathematical cognition**

The discovered partial overlap of neural networks while preserving specialized areas of mathematical processing allows us to interpret the results within the framework of a two-level model of cognitive organization of activity.

According to this model, mathematical cognition is realized at the level of object cognitive processes related to the processing of quantitative and symbolic information, while metacognitive processes function at the meta-level, providing monitoring, assessment of complexity, and regulation of the execution of cognitive operations. The conceptual scheme of this model is presented in Figure 2.

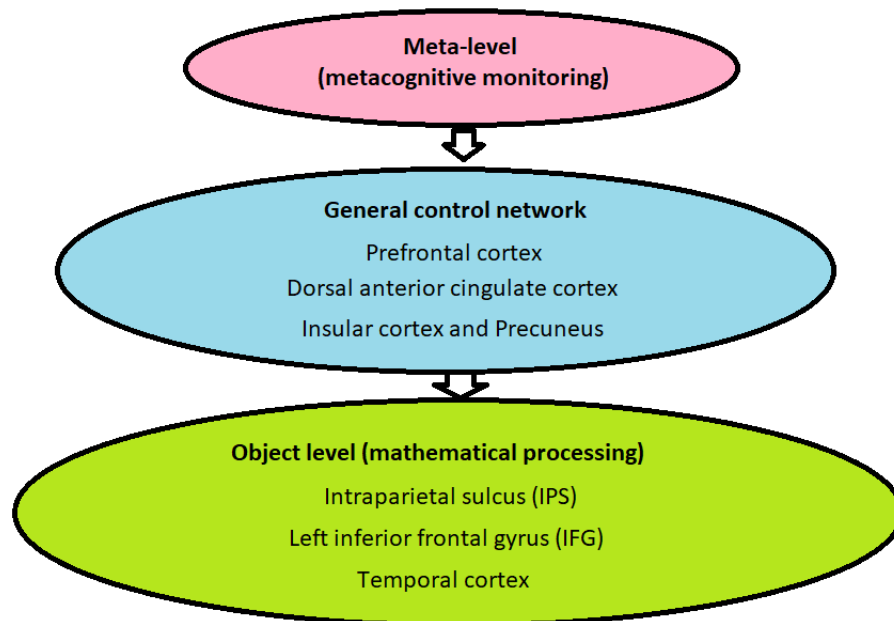


Figure 2. **Two-Tier Architecture of Cognitive Organization**

Of particular interest is the analysis of the interhemispheric organization of the processes under study. It was found that mathematical cognition is characterized mainly by left-hemispheric specialization, especially in the areas of the inferior frontal gyrus and temporal cortex, which reflects the participation of linguistic and symbolic mechanisms of information processing.

In contrast, the metacognitive assessment of mental effort shows a more pronounced bilateral organization and involves medial brain structures associated with the processes of self-reflection and internal monitoring. These results are presented in Table 4.

Table 4.

Features of Lateralization in Solving Mathematical and Metacognitive Problems

Domain	Nature of lateralization
Mathematical cognition	Predominantly left hemisphere (IFG, temporal cortex)
Metacognitive Assessment	Bilateral fronto-cingulo-insular network

Thus, the results of the empirical study allow us to conclude that metacognitive monitoring and mathematical cognition form a functionally interrelated system of cognitive organization of activity. The data obtained indicate that the solution of mathematical problems relies on specialized mechanisms for processing quantitative and symbolic information, while the metacognitive assessment of subjective mental effort is implemented within the framework of domain-general systems of cognitive monitoring and control. The discovered partial overlap of neural networks with the preservation of domain-specific components of mathematical processing confirms the assumption of a two-level architecture of cognitive activity, in which the object level of problem solving is complemented by the meta-level of assessment and regulation of cognitive processes. The established dependencies between the objective complexity of mathematical problems, the involvement of cognitive control systems, and the subjective assessment of mental effort confirm the hypothesis about the regulatory role of metacognitive monitoring in the structure of mathematical thinking. Thus, the results of the study empirically confirm the hypotheses put forward and demonstrate that metacognitive processes are an important mechanism for the organization and self-regulation of mathematical cognitive activity.

The Conclusion summarizes the results of the study, sets out the main conclusions confirming

the hypotheses and provisions submitted for defense, highlights the prospects for further research.

The study was aimed at identifying the cognitive mechanisms of interaction between metacognitive monitoring and the processes of mathematical cognition.

In the course of the work, an integrative research strategy was implemented, combining a theoretical analysis of modern cognitive-psychological models of metacognition and mathematical thinking with an empirical study of their functional organization using neuroimaging methods.

The results obtained allow us to draw a number of generalizing conclusions.

First, it has been established that metacognitive monitoring of mental effort and the processes of mathematical cognition form an interrelated system of cognitive organization of activity, in which mathematical processing is implemented at the object level of problem solving, and metacognitive processes provide monitoring, assessment of complexity and regulation of cognitive operations.

Secondly, it is shown that metacognitive monitoring relies on domain-general mechanisms of cognitive control, which are involved both in the assessment of mental effort and in solving mathematical problems. This confirms the assumption that metacognition performs an integrative regulatory function in the structure of cognitive activity.

Thirdly, it is revealed that mathematical cognition is characterized by the presence of domain-specific mechanisms for processing quantitative and symbolic information, which is manifested in the activation of specialized areas of the frontal-parietal-temporal network.

Fourthly, it has been established that the increase in the complexity of mathematical problems is accompanied by an increase in the involvement of metacognitive monitoring mechanisms, which indicates the inclusion of the processes of estimating effort in the system of regulation of mathematical thinking.

Fifth, it is shown that various arithmetic operations are implemented using different cognitive strategies, which is reflected in differentiated patterns of activity within the general system of mathematical processing.

Finally, differences in the interhemispheric organization of the processes under study were revealed: mathematical cognition is characterized mainly by left-hemispheric specialization, while metacognitive monitoring demonstrates a more bilateral functional organization.

The results obtained made it possible to empirically confirm the two-level model of cognitive organization of activity developed in the dissertation, in which mathematical cognition is considered as the object level of information processing, and metacognitive monitoring is considered as the meta-level of regulation and control.

Thus, the hypotheses put forward in the work received empirical confirmation, and the tasks of the study were solved.

The results of the study expand the understanding of the role of metacognition in the structure of complex intellectual activity and clarify the mechanisms of regulation of mathematical thinking.

The data obtained can be used in the development of theoretical models of self-regulation of cognitive activity, as well as in educational psychology in the creation of teaching methods aimed at developing metacognitive skills and strategies for solving mathematical problems. Overcoming these limitations in the future will expand the understanding of the identified patterns to other age and clinical groups.

Further research may focus on the application of effective connectivity analysis (DCM, PPI) methods to study the directionality of influences between the selected levels, the use of brain stimulation techniques (TMS/EFT) to establish causal relationships, as well as the expansion of the research paradigm to include other cognitive domains and samples with different levels of mathematical competence and metacognitive abilities. The development of this topic seems promising for the development of neurobiologically based methods for diagnosing and correcting learning difficulties in mathematics, as well as for the creation of adaptive learning systems that take into account not only the success, but also the subjective "cost" of the tasks performed.

The main provisions of the thesis are reflected in the following publications of the author:

1. Kouzalis A. et al. Advanced technologies and mathematical metacognition: The present and future orientation //BioSystems. – 2024. – T. 245. – C. 105312.
2. Kouzalis A. A Group level analysis of self-evaluations associated with cognitive load // Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Series: Psychology and Pedagogy. – 2023. – T. 20. – №. 3. – P. 578-587.
3. Kouzalis A., Ershova R. V. A region of interest analysis focusing on the insular and cingulate cortices // Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Series: Psychology and Pedagogy. – 2024. – T. 21. – №. 1. – P. 328-339.
4. Kouzalis A. The role of metacognition in healthcare: Shaping the future with artificial intelligence //IJPS. – 2026. – T. 8. – №. 1. – C. 08-11.
5. Kouzalis A., Ershova R. V. Neuroimaging of Mathematical Cognition: Regions of the Brain Associated with Mathematical Problem Solving// Collection of Scientific Works of the CXXII International Scientific and Practical Conference "Experimental and Theoretical Research in Modern Science", Moscow, 2026.- C.113-118.

Кузалис Алексис (Республика Кипр)
**Метакогниции в структуре математического познания: когнитивный и
нейросетевой анализ**

Данная диссертация посвящена исследованию нейронных взаимосвязей между математическим познанием и метакогницией с особым акцентом на умственном усилии как метакогнитивном сигнале. В работе рассматривается центральная теоретическая проблема: опирается ли метакогнитивный мониторинг в математике преимущественно на доменно-общие системы когнитивного контроля или же отражает доменно-специфическую специализацию внутри математических нейронных сетей. Основываясь на данных когнитивной нейронауки, педагогической психологии и вычислительного моделирования, исследование интегрирует двухуровневые теоретические модели, разграничивающие объектный уровень математической обработки и мета-уровень мониторинга и контроля.

Было проведено событийно-связанное фМРТ-исследование с участием двадцати здоровых молодых взрослых с использованием 3Т-сканера Siemens Magnetom Verio. Участники решали арифметические задачи (сложение, вычитание, умножение, деление) трёх уровней сложности, после чего давали субъективную оценку воспринимаемого умственного усилия. В качестве контрольного условия использовалось задание на различение шрифта. Нейровизуализационные данные были предварительно обработаны и проанализированы в программе AFNI с применением двухуровневой общей линейной модели и группового анализа со случайными эффектами (с FDR-коррекцией).

Результаты выявили перекрывающиеся, но функционально различимые нейронные системы. Решение математических задач активировало лобно-теменную сеть, включающую внутритеменную борозду и латеральную префронтальную кору, а также двусторонние височные области, связанные с символической и семантической переработкой. Метакогнитивная оценка умственного усилия стабильно активировала доменно-общую фронто-цингуло-инсулярную сеть, включающую дорсолатеральную префронтальную кору, дорсальную переднюю поясную кору, переднюю островковую кору и предклинье.

Kouzalis Alexios (Republic of Cyprus)

**Metacognition in the structure of mathematical cognition: cognitive and neural network
analysis**

This dissertation investigates the neural relationship between mathematical cognition and metacognition, with a particular focus on mental effort as a metacognitive signal. The study addresses a central theoretical debate concerning whether metacognitive monitoring in mathematics relies primarily on domain-general control systems or reflects domain-specific specialization within mathematical networks. Drawing on cognitive neuroscience, educational psychology, and computational modeling, the research integrates two-layer theoretical frameworks distinguishing object-level mathematical processing from meta-level monitoring and control.

An event-related fMRI experiment was conducted with twenty healthy young adults using a 3T Siemens Magnetom Verio scanner. Participants solved arithmetic problems (addition, subtraction, multiplication, division) at three levels of difficulty, followed by subjective ratings of perceived mental effort. A font-comparison task served as a control condition. Neuroimaging data were preprocessed and analyzed using AFNI with a two-level general linear model and random-effects group analysis (FDR-corrected).

Results revealed overlapping yet dissociable neural systems. Mathematical problem solving engaged a fronto-parietal network including the intraparietal sulcus and lateral prefrontal cortex, alongside bilateral temporal regions associated with symbolic and semantic processing. Metacognitive

evaluation of effort consistently activated a domain-general fronto-cingulo-insular network, including the dorsolateral prefrontal cortex, dorsal anterior cingulate cortex, anterior insula, and the precuneus. Task difficulty modulated both mathematical and metacognitive hubs, indicating that subjective effort appraisal scales with objective computational demand. Operation-specific activation patterns further demonstrated differentiated strategy and retrieval demands across arithmetic types.

The findings support a domain-general metacognitive architecture dynamically interacting with domain-specific mathematical circuits. The study refines neurocognitive models of mental effort as both a monitoring signal and regulatory mechanism within closed-loop control systems. The results have implications for educational practice, clinical assessment, adaptive learning technologies, and biologically informed computational models of self-regulated cognition.