

Научная статья | Original paper

Психофизиологические механизмы математической тревожности: обзор современных исследований

Маракшина Ю.А.

ФГБУ «Российская академия образования» (ФГБУ РАО), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7559-9148>, e-mail: retalika@yandex.ru

Павлова А.А.

ФГБУ «Российская академия образования» (ФГБУ РАО), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1566-243X>, e-mail: annapavlova98hse@gmail.com

Лобаскова М.М.

ФГБУ «Российская академия образования» (ФГБУ РАО), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0318-6480>, e-mail: lobaskovamm@gmail.com

Миронец С.А.

ФГБУ «Российская академия образования» (ФГБУ РАО), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9763-109X>, e-mail: sofiamironets@gmail.com

Адамович Т.В.

ФГБУ «Российская академия образования» (ФГБУ РАО), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1571-9192>, e-mail: tadamovich11@gmail.com

Ситникова М.А.

ФГБУ «Российская академия образования» (ФГБУ РАО), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3545-2149>, e-mail: sitnikovamary46@gmail.com

Представленные в статье материалы посвящены проблеме математической тревожности (МТ). МТ негативно влияет на все стороны деятельности, связанные с манипулированием числами как в обучении, так и в повседневной жизни человека. Актуальным остается вопрос о мозговых механизмах МТ. Авторы ставили целью провести обзор исследований нейрофизиологических коррелятов математической тревожности с помощью психофизиологических методов: электроэнцефалографии (ЭЭГ) и магнитно-резонансной томографии (МРТ). Результаты исследований с их использованием неоднородны. При исследовании МТ внимание уделяется тем мозговым структурам, которые связаны с обработкой как эмоциональной информации, так и когнитивных процессов. Результат проведенного обзора показал, что у лиц с высокой МТ обнаруживаются значимые различия во всех измеряемых показателях ЭЭГ. У испытуемых с высокой МТ активируется больше зон, ответственных за переживание негативных эмоций (страх и боль) при решении задач, числовая информация воспринимается как угроза и вызывает напряжение. Теория механизма недостаточного торможения описывает цикл обратной связи МТ: МТ вызывается математической задачей, после чего возникает

страх, занимающий часть рабочей памяти, поэтому ее объема не хватает для решения математической задачи, что приводит к неправильному решению. Рабочая память во многом определяет успешность обучения в целом и математике в частности. МРТ-исследования демонстрируют участие мозговых зон в корреляции высокой МТ и распределения внимания. Также в МРТ-исследованиях показано, что при предъявлении сложных математических заданий, независимо от МТ, активируются зоны мозга, ответственные за когнитивный контроль и регуляцию негативных эмоций. У людей с высокой МТ повышается активность регионов мозга, ответственных за выполнение числовых операций при использовании стратегии когнитивной переоценки, что проявляется в повышении эффективности решения математических задач и снижении негативных переживаний. На основе проведенного обзора делается вывод об отсутствии единой теории МТ и необходимости проведения комплексных психофизиологических исследований с учетом когнитивных и эмоциональных компонентов математической тревожности.

Ключевые слова: математическая тревожность; причины математической тревожности; психофизиологические методы; ЭЭГ; магнитно-резонансная томография (МРТ).

Для цитаты: Маракшина Ю.А., Павлова А.А., Лобаскова М.М., Миронец С.А., Адамович Т.В., Ситникова М.А. Психофизиологические механизмы математической тревожности: обзор современных исследований // Психологическая наука и образование. 2025. Том 30. № 1. С. 81—92. DOI: <https://doi.org/10.17759/pse.2025300106>

Psychophysiological Mechanisms of Math Anxiety: Review of Current Research

Julia A. Marakshina

Center for Interdisciplinary Research in the Educational Sciences,
Russian Academy of Education, Moscow, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7559-9148>, e-mail: retalika@yandex.ru

Anna A. Pavlova

Center for Interdisciplinary Research in the Educational Sciences,
Russian Academy of Education, Moscow, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1566-243X>, e-mail: annapavlova98hse@gmail.com

Marina M. Lobaskova

Center for Interdisciplinary Research in the Educational Sciences,
Russian Academy of Education, Moscow, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0318-6480>, e-mail: lobaskovamm@gmail.com

Sofia A. Mironets

Center for Interdisciplinary Research in the Educational Sciences,
Russian Academy of Education, Moscow, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9763-109X>, e-mail: sofiamironets@gmail.com

Timofey V. Adamovich

Center for Interdisciplinary Research in the Educational Sciences,
Russian Academy of Education, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1571-9192>, e-mail: tadamovich11@gmail.com

Maria A. Sitnikova

Center for Interdisciplinary Research in the Educational Sciences,
Russian Academy of Education, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3545-2149>, e-mail: sitnikovamary46@gmail.com

Mathematical anxiety (MA) negatively affects all aspects of activities related to manipulating numbers, both in education and in everyday life. MA is negatively associated with mathematical self-efficacy, subjective value of mathematics, attitude, and interest towards mathematics. Individuals with pronounced MA have a lower need for cognitive load and reflective thinking. Among the predictors of MA, cognitive, personality, and social aspects can be identified. The question of the brain mechanisms of MA remains relevant. The review provides an analysis of studies on the neurophysiological correlates of mathematical anxiety using modern psychophysiological methods: electroencephalography, magnetic resonance imaging (MRI). The results of studies using these methods are inconsistent. When studying MA, attention is paid to brain structures associated with the processing of both emotional information and cognitive processes. The analysis of the literature has shown that when implementing corrective measures, it is important to consider the lack of a unified theoretical approach, which raises questions about the causes of MA.

Keywords: math anxiety; causes of mathematical anxiety; psychophysiological methods; EEG; magnetic resonance imaging (MRI).

For citation: Marakshina Ju.A., Pavlova A.A., Lobaskova M.M., Mironets S.A., Adamovich T.V., Sitnikova M.A. Psychophysiological Mechanisms of Math Anxiety: Review of Current Research. *Psikhologicheskaya nauka i obrazovanie = Psychological Science and Education*, 2025. Vol. 30, no. 1, pp. 81—92. DOI: <https://doi.org/10.17759/pse.2025300106> (In Russ.).

Введение

Математическая тревожность (МТ) — это негативная эмоциональная реакция, характеризующаяся избеганием, а также чувством беспокойства в ситуациях, связанных с математическим познанием и мышлением [8; 41]. По-другому МТ может быть определена как негативная аффективная реакция человека на ситуации, связанные с числами, математикой и математическими вычислениями, чувство напряжения и тревоги, которое мешает манипулированию числами и решению математических задач в большом разнообразии обычных жизненных и академических ситуаций [3; 7; 34]. Также

МТ можно определить как стабильное переживание негативных эмоций, связанных с решением широкого спектра ситуаций, предполагающих использование чисел [12]. Проблемы, возникающие у некоторых людей в ходе осуществления математических операций, негативно сказываются на их психологическом благополучии и, как следствие, социальном и экономическом состоянии, что является серьезным вызовом современному российскому обществу. Однако до сих пор вопрос о том, какие психофизиологические механизмы и в какой степени участвуют в формировании МТ, остается дискуссионным. Пока эта проблема является нерешенной.

шенной, невозможно эффективно выявлять причины развития МТ и проводить работу по ее коррекции и компенсации [4]. Таким образом, выявление психофизиологических механизмов МТ является не только фундаментальной научной проблемой, но и актуальной задачей, решение которой обосновано практическими запросами общества: математические компетенции являются необходимым условием академического и профессионального успеха в современном мире высоких технологий. МТ негативно связана с формированием математических компетенций, приводит к неблагоприятным последствиям при выборе профессии, ограничивая его, а также трудоустройстве и реализации профессиональной деятельности. В нашей статье ставится цель — представить обзор состояния проблематики МТ, который даст возможность не только познакомить читателя с основными результатами исследований, проведенных с применением психофизиологических методов, но провести их анализ.

МТ является самостоятельным феноменом, отличным от общей или тестовой тревожности, имеет специфичные психофизиологические и поведенческие проявления [1]. Обсуждается, что МТ часто коррелирует с общей тревожностью. Обнаружен вклад генетических различий в общей тревожности в генетические различия при МТ, т.е. если человек обладает высокой общей тревожностью, то у него скорее всего обнаружится и МТ [40]. Однако это разные явления: люди, не обладающие высокой общей тревожностью, могут в то же время проявлять МТ. В подтверждение этого факта обнаружены данные о том, что различные показатели МТ в большей степени коррелируют друг с другом, чем с конструктами общей и математической тревожности [8]. В одном из исследований было установлено, что МТ возникает как реакция на числовое, а не текстовое представление задачи [25].

Данные в пользу того, что МТ является самостоятельным феноменом, могут быть получены из исследования ее психофизиологических механизмов, отличающих ее от дру-

гих видов тревожности. В связи с этим важно обсудить вопрос о тех психофизиологических методах, с помощью которых изучается феномен МТ, а также проанализировать основные результаты исследований, проведенных с применением данных методов.

Психофизиологические методы для измерения МТ

Довольно часто для оценки МТ используются специальные опросники [14; 17; 20; 34]. Однако, как сообщают Ф. Демедтс (F. Demedts) и соавторы, данный способ измерения связан с рядом проблем. Опросники связаны зачастую с необходимостью вспомнить, как респондент ощущает себя в ряде ситуаций, что связано с ретроспективной оценкой [15]. Здесь мы сталкиваемся с искажением самоотчетов, связанным с особенностями воспоминания. Кроме того, способность дать самоотчет о собственном поведении в конкретной ситуации доступна не всем возрастным группам — у маленьких детей это может вызывать определенные трудности.

Измерение МТ с помощью психофизиологических методов обосновано тем, что в основе МТ лежит стрессовый физиологический ответ. В случае возникновения МТ возникает репертуар реакций, связанных с активацией гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси, и выделение глюкокортикоидов [28; 33]. Таким образом, МТ имеет под собой достаточно определенный физиологический базис, поэтому ее психологические проявления могут быть прокоррелированы с физиологическими реакциями. По сравнению с методиками опросов, психофизиологическая регистрация обладает рядом преимуществ, в частности, объективностью, возможностью непосредственного измерения МТ в модельной ситуации. Выбор различных методик регистрации может основываться на целях исследования. В практических целях регистрации показателя МТ в учебной обстановке школ и вузов, т.е. в ситуациях с высокой экологической валидностью, удобно применять простые методики, которые бы не мешали повседневной учебной деятельности респондентов. В качестве методик могут вы-

ступать такие, как регистрация кожно-гальванической реакции, частоты сердечных сокращений и т.д. В научных исследованиях механизмов МТ возможно использование других методов: многоканальной электроэнцефалографии, магнитно-резонансной томографии, функциональной спектроскопии в ближнем инфракрасном диапазоне и т.д. Далее подробнее рассмотрим основные психофизиологические методы, которые используются в исследованиях МТ.

Электроэнцефалография (ЭЭГ)

Электроэнцефалография (ЭЭГ) — неинвазивный метод исследования функционального состояния головного мозга путем регистрации его биоэлектрической активности. При анализе ЭЭГ исследуют такие показатели, как связанные с событиями потенциалы, показатели ритмической активности мозга, восстановление источников электрической активности, показатели связности.

Связанные с событиями потенциалы — это измеренный отклик мозга, который формируется в ответ на сенсорное, когнитивное либо двигательное явление. Формы колебаний сигнала ССП состоят из серии положительных и отрицательных отклонений напряжения, которые связаны с набором базовых компонентов. Некоторые компоненты ССП обозначаются аббревиатурами (например, отрицательный результат, связанный с ошибкой — ERN), большинство компонентов обозначаются буквой (N/P), указывающей полярность (отрицательная/положительная), за которой следует число, указывающее либо задержку в миллисекундах, либо порядковое положение компонента в форме сигнала. Компоненты ССП, которые анализируются при анализе МТ: P2, P3, N450, ERN. Различия в N450, негативной волне ССП, возникающей в периоде 450 мс после предъявления стимула, объясняются в русле теории контроля внимания М. Айзенка (М. Eysenck): лица с высокой МТ демонстрируют реактивный (постфактум) контроль, с низкой — проактивный (предвосхищающий) [39]. Показаны более отрицательные показатели амплитуды

ERN у лиц с высокой МТ в числовом задании, что указывает на специфику мониторинга ошибок [38]. Также было показано, что у людей с высокой МТ в процессе выполнения математических заданий компонент вызванных потенциалов (event-related potentials, ERP) P300/P3 выше, чем у людей с низкой МТ. Компонент P300 — это положительная волна, которая достигает максимума через 300 миллисекунд после предъявления стимула [13]. Компонент P300 у математически тревожных людей также меняется в зависимости от решений относительно покупок [19]. Еще одно ЭЭГ-исследование показало важную роль компонента P600/P3b: этот компонент имеет более высокую амплитуду и более позднее время появления у математически тревожных людей [38]. Люди с высокой МТ, независимо от успешности решения заданий, демонстрируют более высокую амплитуду компонента P300, когда ожидают, что предстоит решать математическую задачу. ЭЭГ-исследование вызванных потенциалов (ВП) показало большую амплитуду ВП при решении математической задачи у студентов с высокой МТ по сравнению со студентами с низкой МТ. Данное различие прослеживалось для разных типов математической задачи [30]. Данный результат интерпретируется увеличением нагрузки на рабочую память.

Имеет широкое распространение подход восстановления источников биоэлектрической активности мозга, которая регистрируется электродами во время записи ЭЭГ. Данный подход позволяет определить зоны (источники) текущей активации мозга. Исследования с восстановлением источников мозговой активности с применением специальных методов (в частности, sLORETA) показывают, что у лиц с МТ активируются такие области мозга, как островковая доля и миндалина. Островковая доля участвует в реакциях боли, миндалина связана с эмоциональными переживаниями (страх, стресс, тревога). В частности, ЭЭГ-исследование показало, что у людей с высокими показателями МТ активируется больше зон, ответственных за переживание негативных эмоций (страх и боль), тогда как

у людей с низкой МТ с большей интенсивностью активируются зоны, ответственные за функционирование рабочей памяти — передняя поясная кора, островковая доля, вторичная моторная область (supplementary motor area) [22]. Эти данные выступают в пользу теории, объясняющей МТ предвосхищением боли, и согласуются с фМРТ исследованием, которое показывает, что у математически тревожных людей в процессе решения задач активируются регионы, отвечающие за болевые ощущения, и исследованием, которое демонстрирует, что МТ связана с активацией центров, ответственных за переживание негативных эмоций [27; 41].

Также информативным показателем при анализе ЭЭГ является ритмическая активность мозга. Ритм ЭЭГ — регулярный (имеющий постоянную частоту) тип электрической активности, соответствующий некоторому определенному состоянию мозга и связанный с определенными церебральными механизмами. Основные ритмы ЭЭГ связаны с различными состояниями человека. В исследованиях показано увеличение активности в гамма-диапазоне у лиц с высокой МТ: увеличивается мощность гамма-осцилляций в лобных отведениях [26]. Сравнение реакции на числовую и текстовую информацию у людей с высокой и низкой МТ демонстрирует, что у математически тревожных людей наблюдается более высокая гамма-активность при восприятии числовой информации по сравнению с текстовой, тогда как для людей с низкой МТ таких различий не обнаружилось. По мнению авторов, данные результаты свидетельствуют о том, что люди с высокой МТ воспринимают числовую информацию как угрозу [10]. Также в исследованиях обнаружены различия между высоко- и низкотрещевыми лицами в альфа-диапазоне [2]. Альфа-активность традиционно связывается с бодрствованием в спокойном состоянии, и различия, таким образом, могут отражать разницу в способности расслабиться у тех, кто отличается высоким и низким уровнем МТ.

Психологические характеристики, в том числе МТ, связаны с особенностями структур сетей мозга, в частности, с количеством

«слабых» путей передачи информации в сети. Теория механизма недостаточного торможения описывает цикл обратной связи МТ: МТ вызывается математической задачей [5; 6; 18]. Затем у человека возникает страх, занимающий часть рабочей памяти, поэтому ее объема не хватает для решения математической задачи, что приводит к неправильному решению. Анализ функциональной связности показывает, что в мозге лиц с низкой МТ обнаруживаются более структурированные корковые сети с увеличенной связностью в областях, связанных с рабочей памятью, таких как лобная кора. В то же время мозг лиц с высокой МТ имеет более рассредоточенную и неструктурированную сеть, что выступает фактом в пользу нарушений рабочей памяти [22]. При этом ЭЭГ-исследование когнитивной усталости (mental fatigue) при решении математических задач не выявило различий в нейронных коррелятах когнитивной усталости у лиц с высокой и низкой МТ [42].

Следует также отметить, что МТ можно предсказать с точностью 93,75% по особенностям электроэнцефалограммы (ЭЭГ) с использованием метода машинного обучения NBTree [21].

Магнитно-резонансная томография (МРТ), функциональная МРТ (фМРТ), диффузионная МРТ (дМРТ)

При исследовании МТ особое внимание уделяется тем мозговым структурам, которые связаны с обработкой эмоциональной информации и рабочей памяти. Результаты нейрокогнитивных исследований с использованием фМРТ показали, что МТ связана с отклоняющейся от нормы активностью в правом миндалевидном теле [11; 31]. Рабочая память считается одной из важных детерминант успешного обучения в целом и математического познания в частности [24]. Согласно модели А. Бадделей (A. Baddeley), рабочая память включает три компонента: (I) зрительно-пространственный компонент, который является хранилищем для визуальной и пространственной информации; (II) вербальный компонент, необходимый для хране-

ния словесной информации; (III) центральный исполнительный компонент, который задействован в регулировании, манипулировании и обработке информации [9]. Дети с низким уровнем зрительно-пространственного компонента рабочей памяти больше всего страдают от МТ при обучении математике [36].

МРТ-исследование с использованием морфометрии показало, что высокая МТ отрицательно связана с объемом серого вещества в левой внутритеменной борозде — области мозга, которая отвечает за распределение внимания [16].

Исследование с использованием функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) показало, что при использовании стратегии когнитивной переоценки (cognitive reappraisal strategy) у людей с высокой МТ повышается активность регионов мозга, ответственных за выполнение числовых операций (Dorsal PFC/supplementary motor cortex, Inferior frontal cortex/frontal operculum, Medial prefrontal/temporal lobe, Temporoparietal junction, Left anterior prefrontal cortex). На поведенческом уровне это выражается в увеличении правильно решенных задач и одновременном уменьшении негативных переживаний, связанных с математическими стимулами [32].

В другом фМРТ-исследовании получены данные о том, что при ожидании очень сложной математической задачи негативные эмоции возникают как у людей с высокой, так и с низкой МТ, причем активность мозга при этом не зависит от уровня МТ человека. Также было показано, что при ожидании сложной математической задачи, независимо от МТ, активируются зоны мозга, ответственные за когнитивный контроль и в том числе регуляцию негативных эмоций (таких, как передняя поясная кора, anterior cingulate cortex) [23].

При помощи фМРТ было показано различие в функциональной связанности внутри и между дорсальной сетью внимания (dorsal attention network, DAN), вентральной сетью внимания (ventral attention network, VAN) и сетью пассивного режима (default mode network, DMN) у студентов-физиков с высокой и низ-

кой математической тревожностью при решении заданий из области физики [35].

Исследование при помощи диффузионной магнитно-резонансной томографии (дМРТ) выявило положительную связь между баллом по Сокращенной шкале математической тревожности (AMAS) и степенью микроструктурной связанности (microstructural connectivity) в левом дугообразном пучке (left arcuate fasciculus, AF), мозолистом теле (the body of corpus callosum, CC), правом пояске (right cingulum) и левом нижнем продольном пучке (left inferior longitudinal fasciculus, ILF) у мужчин. У женщин была обнаружена положительная связь между баллом AMAS и степенью микроструктурной связанности (microstructural connectivity) в мозолистом теле (the genu of CC), правом нижнем продольном пучке (right ILF) и двусторонних сводах (bilateral fornices); отрицательная связь между баллом AMAS и степенью микроструктурной связанности в левом пояске и правом пояске (bilateral cingulum) [29].

Заключение

Проведенный обзор состояния выделенной проблематики и анализ материалов исследований позволили выделить наличие методологической проблемы в исследованиях мозговых механизмов математической тревожности, что оставляет под вопросом причины возникновения МТ и затрудняет выбор психолого-педагогических интервенций и их результативность.

Во-первых, это вызвано сложностью самого феномена математической тревожности. МТ — отдельный психологический феномен, имеющий различные предикторы — когнитивные, личностные, социальные. Например, МТ может возникать как у людей с высокой тревожностью и высокими когнитивными способностями, так и у низкотревожных с дефицитностью отдельных когнитивных функций, а также и в других случаях.

Во-вторых, результаты исследований с применением современных психофизиологических методов (ЭЭГ, производных МРТ) демонстрируют большой разброс данных вслед-

ствии высокой специфичности каждого из перечисленных методов. С одной стороны, получены данные об участии когнитивных характеристик, таких как рабочая память, контроль внимания в формировании МТ и ее связи с системой математического познания. С другой стороны, обнаружена связь МТ с эмоциональными переживаниями и ощущением боли.

Проведенный анализ позволяет конкретизировать план дальнейшего исследования, направленного на поиск мозговых механизмов МТ. На первом этапе предполагается провести исследование с применением ЭЭГ, в котором будут принимать участие испытуемые с различным уровнем выраженности МТ и общей тревожности. В план эксперимента

будут включены значимые для МТ когнитивные способности (рабочая память, решение арифметических заданий, академические оценки по математическим дисциплинам и др.). ЭЭГ будет регистрироваться в состоянии покоя и при выполнении экспериментальных заданий, что позволит нам в последующем использовать анализ, основанный на методе графов. Целью нашего будущего исследования станет конкретизация психофизиологических механизмов МТ с применением ЭЭГ, а именно — выявление активации мозговых зон и параметров функциональной связности. В дальнейшем мы планируем расширить исследование, включив другие психофизиологические методы.

Литература

1. Богданова О.Е., Ковас Ю.В., Богданова Е.Л., Акимова К.К., Гынку Е.И. Феномен математической тревожности в образовании // Теоретическая и экспериментальная психология. 2013. Т. 6. № 4. С. 6—17.
2. Будакова А.В., Яковлев Н.И., Есипенко Е.А. Спектральные характеристики в покое и ожидании математических заданий у лиц с разным уровнем математической тревожности // Мир человека в фокусе психологических метапрактик. К 145-летию со дня основания Томского государственного университета: материалы VIII Сибирского психологического форума. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2022. С. 21—22.
3. Дюличева Ю.Ю. Учебная аналитика MOOK как инструмент анализа математической тревожности // Вопросы образования. 2021. № 4. С. 243—265.
4. Яковлев Н.И., Есипенко Е.А., Архипова О.В., Марейчева Е.М., Маташова Т.Д., Мацепуро Д.М. Эффекты психологических интервенций на ассоциированные с математической тревожностью функциональные связи головного мозга // Психология. Психофизиология. 2023. Т. 16. № 2. С. 93—103.
5. Ashcraft M.H., Kirk E.P. The relationships among working memory, math anxiety, and performance // Journal of experimental psychology: General. 2001. Vol. 130. № 2. P. 224. DOI:10.1037//0096-3445.130.2.224
6. Ashcraft M.H., Krause J.A. Working memory, math performance, and math anxiety // Psychonomic bulletin & review. 2007. Vol. 14. P. 243—248. DOI:10.3758/BF03194059
7. Ashcraft M.H., Moore A.M. Mathematics anxiety and the affective drop in performance // Journal of

- Psychoeducational assessment. 2009. Vol. 27. № 3. P. 197—205. DOI:10.1177/0734282908330580
8. Ashcraft M.H., Ridley K.S. Math anxiety and its cognitive consequences: A tutorial review // The handbook of mathematical cognition. 2005. P. 315—327.
9. Baddeley A. Working memory // Science. 1992. Vol. 255. № 5044. P. 556—559. DOI:10.1126/science.1736359
10. Batashvili M., Staples P., Baker I.S., Sheffield D. The neurophysiological relationship between number anxiety and the EEG gamma-band // Journal of Cognitive Psychology. 2020. Vol. 32. № 5-6. P. 580—585. DOI:10.1080/20445911.2020.1778006
11. Büchel C., Dolan R.J., Armony J.L., Friston K.J. Amygdala-hippocampal involvement in human aversive trace conditioning revealed through event-related functional magnetic resonance imaging // Journal of Neuroscience. 1999. Vol. 19. № 24. P. 10869—10876. DOI:10.1523/jneurosci.19-24-10869.1999
12. Budakova A.V., Likhonov M., Bloniewski T., Malykh S., Kovas Y. Mathematical anxiety: etiology, development, and links with mathematical achievement // Voprosy filosofii i psikhologii. 2020. Vol. 66. № 1. P. 109—118.
13. Choi-Koh S.S., Ryoo B.G. Differences of math anxiety groups based on two measurements, MASS and EEG // Educational Psychology. 2019. Vol. 39. № 5. P. 659—677. DOI:10.1080/01443410.2018.1543857
14. Dede Y. Mathematics anxiety questionnaire development and validation // Essays in Education. 2008. Vol. 23. P. 36—55.
15. Demedts F., Cornelis J., Reynvoet B., Sasanguie D., Depaepe F. Measuring math anxiety through self-reports and physiological data // Journal of Numerical Cognition. Vol. 9. № 3. P. 380—397. DOI:10.5964/jnc.9735

16. *Hartwright C.E., Looi C.Y., Sella F., Inuggi A., Santos F.H., González-Salinas C., Fuentes L.J.* The neurocognitive architecture of individual differences in math anxiety in typical children // *Scientific reports*. 2018. Vol. 8. № 1. P. 8500. DOI:10.1038/s41598-018-26912-5
17. *Hopko D.R.* Confirmatory factor analysis of the math anxiety rating scale-revised // *Educational and psychological measurement*. 2003. Vol. 63. № 2. P. 336—351. DOI:10.1177/0013164402251041
18. *Hopko D.R., Ashcraft M.H., Gute J., Ruggiero K.J., Lewis C.* Mathematics anxiety and working memory: Support for the existence of a deficient inhibition mechanism // *Journal of anxiety disorders*. 1998. Vol. 12. № 4. P. 343—355. DOI:10.1016/S0887-6185(98)00019-X
19. *Jones W.J., Childers T.L., Jiang Y.* The shopping brain: Math anxiety modulates brain responses to buying decisions // *Biological psychology*. 2012. Vol. 89. № 1. P. 201—213. DOI:10.1016/j.biopsycho.2011.10.011
20. *Kelly S., Croucher S.M., Kim K.Y., Permyakova T., Turdubaeva E., Rucker K.T., Rimkeeratikul S.A.* General Math Anxiety Measure // *Education Sciences*. 2022. Vol. 12. № 6. P. 370. DOI:10.3390/educsci12060370
21. *Klados M.A., Pandria N., Micheloyannis S., Margulies D., Bamidis P.D.* Math anxiety: Brain cortical network changes in anticipation of doing mathematics // *International Journal of Psychophysiology*. 2017. Vol. 122. P. 24—31. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2017.05.003
22. *Klados M.A., Paraskevopoulos E., Pandria N., Bamidis P.D.* The impact of math anxiety on working memory: A cortical activations and cortical functional connectivity EEG study // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 15027—15039. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2892808
23. *Klein E., Bleck S.M., Bloechle J., Huber S., Bahnmüller J., Willmes K., Moeller K.* Anticipation of difficult tasks: neural correlates of negative emotions and emotion regulation // *Behavioral and Brain Functions*. 2019. Vol. 15. P. 1—13. DOI:10.1186/s12993-019-0155-1
24. *Lee K., Bull R.* Developmental changes in working memory, updating, and math achievement // *Journal of Educational Psychology*. 2016. Vol. 108. № 6. P. 869. DOI:10.1037/edu0000090
25. *Levy H.E., Rubinsten O.* Numbers (but not words) make math anxious individuals sweat: Physiological evidence // *Biological psychology*. 2021. Vol. 165. P. 108187. DOI:10.1016/j.biopsycho.2021.108187
26. *Liu J., Li J., Peng W., Feng M., Luo Y.* EEG correlates of math anxiety during arithmetic problem solving: Implication for attention deficits // *Neuroscience letters*. 2019. Vol. 703. P. 191—197. DOI:10.1016/j.neulet.2019.03.047
27. *Lyons I.M., Beilock S.L.* When math hurts: math anxiety predicts pain network activation in anticipation of doing math // *PLoS one*. 2012. Vol. 7. № 10. P. e48076. DOI:10.1371/journal.pone.0048076
28. *Mattarella-Micke A., Mateo J., Kozak M.N., Foster K., Beilock S.* Choke or thrive? The relation between salivary cortisol and math performance depends on individual differences in working memory and math-anxiety // *Emotion*. 2011. Vol. 11. P. 1000—1005. DOI:10.1037/a0023224
29. *Mehrabinejad M.M., Sanjari Moghaddam H., Mohammadi E., Hajighadery A., Sinaeifar Z., Aarabi M.H.* Sex differences in microstructural white matter alterations of mathematics anxiety based on diffusion MRI connectometry // *Neuropsychology*. 2021. Vol. 35. № 2. P. 197. DOI:10.1037/neu0000684
30. *Norton A., Seok Y., Choi-Koh S.* Examining mathematics anxiety of undergraduates using a brain-based measurement // *EEG Journal of Behavioral and Brain Science*. 2019. Vol. 9. P. 195—209. DOI:10.4236/jbbs.2019.95017
31. *Phelps E.A., Delgado M.R., Nearing K.I., LeDoux J.E.* Extinction learning in humans: role of the amygdala and vmPFC // *Neuron*. 2004. Vol. 43. № 6. P. 897—905. DOI:10.1016/j.neuron.2004.08.042
32. *Pizzie R.G., McDermott C.L., Salem T.G., Kraemer D.J.* Neural evidence for cognitive reappraisal as a strategy to alleviate the effects of math anxiety // *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. 2020. Vol. 15. № 12. P. 1271—1287. DOI:10.1093/scan/nsaa161
33. *Pletzer B., Wood G., Moeller K., Nuerk H.C., Kerschbaum H.H.* Predictors of performance in a real-life statistics examination depend on the individual cortisol profile // *Biol. Psychol.* 2010. Vol. 85. P. 410—416. DOI:10.1016/j.biopsycho.2010.08.015
34. *Richardson F.C., Suinn R.M.* The mathematics anxiety rating scale: psychometric data // *Journal of Counseling Psychology*. 1972. Vol. 19. № 6. P. 551. DOI:10.1037/h0033456
35. *Smith D.D., Meca A., Bottenhorn K.L., Bartley J.E., Riedel M.C., Salo T., Laird A.R.* Task-based attentional and default mode connectivity associated with science and math anxiety profiles among university physics students // *Trends in Neuroscience and Education*. 2023. P. 100204. DOI:10.1016/j.tine.2023.100204
36. *Soltanlou M., Artemenko C., Dresler T., Fallgatter A.J., Elhis A.C., Nuerk H.C.* Math anxiety in combination with low visuospatial memory impairs math learning in children // *Frontiers in psychology*. 2019. Vol. 10. P. 89. DOI:10.3389/fpsyg.2019.00089
37. *Strohmaier A.R., Schiepe-Tiska A., Müller F., Reiss K.* Mathematical reading patterns-The influence of self-concept and situational context // *Annual Meeting of the American Educational Research Association (AERA)*. San Antonio, TX, 2017.

38. *Suárez-Pellicioni M., Núñez-Peña M.I., Colomé Á.* Abnormal error monitoring in math-anxious individuals: evidence from error-related brain potentials // *PLoS one*. 2013. Vol. 8. № 11. P. e81143. DOI:10.1371/journal.pone.0081143
39. *Suarez-Pellicioni M., Núñez-Peña M.I., Colome A.* Reactive recruitment of attentional control in math anxiety: an ERP study of numeric conflict monitoring and adaptation // *PLoS one*. 2014. Vol. 9. № 6. P. e99579. DOI:10.1371/journal.pone.0099579
40. *Wang Z., Hart S.A., Kovas Y., Lukovski S., Soden B., Thompson L.A. et al.* Who is afraid of math?

- Two sources of genetic variance for mathematical anxiety // *J. Child Psychol. Psychiatry*. 2014. Vol. 55. P. 1056—1064. DOI:10.1111/jcpp.12224
41. *Young C.B., Wu S.S., Menon V.* The neurodevelopmental basis of math anxiety // *Psychological science*. 2012. Vol. 23. № 5. P. 492—501. DOI:10.1177/0956797611429134
42. *Zhban E.S., Likhonov M.V., Zakharov I.M., Bezrukova E.M., Malykh S.B.* The Role of Mathematical and trait anxiety in Mental fatigue: an eeg investigation // *Psychology in Russia: State of the art*. 2018. Vol. 11. № 4. P. 79—95. DOI:10.11621/pir.2018.0406

References

1. *Bogdanova O.E., Kovas Yu.V., Bogdanova E.L., Akimova K.K., Gynku E.I.* Fenomen matematicheskoi trevozhnosti v obrazovanii // *Teoreticheskaya i eksperimental'naya psikhologiya*. 2013. T. 6. № 4. S. 6—17.
2. *Budakova A.V., Yakovlev N.I., Esipenko E.A.* Spektral'nye kharakteristiki v pokoe i ozhidanii matematicheskikh zadaniy u lits s raznym urovnem matematicheskoi trevozhnosti // *Mir cheloveka v fokuse psikhologicheskikh metapraktik. K 145-letiyu so dnya osnovaniya Tomskogo gosudarstvennogo universiteta: materialy VIII Sibirskogo psikhologicheskogo foruma*. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 2022. S. 21—22.
3. *Dyulichева Yu.Yu.* Uchebnaya analitika MOOK kak instrument analiza matematicheskoi trevozhnosti // *Voprosy obrazovaniya*. 2021. № 4. S. 243—265.
4. *Yakovlev N.I., Esipenko E.A., Arkhipova O.V., Mareicheva E.M., Matashova T.D., Matsepuro D.M.* Effekty psikhologicheskikh interventsii na assotsirovannyye s matematicheskoi trevozhnost'yu funktsional'nye svyazi golovnogogo mozga // *Psikhologiya. Psikhofiziologiya*. 2023. T. 16. № 2. S. 93—103.
5. *Ashcraft M.H., Kirk E.P.* The relationships among working memory, math anxiety, and performance // *Journal of experimental psychology: General*. 2001. Vol. 130. № 2. P. 224. DOI:10.1037//0096-3445.130.2.224
6. *Ashcraft M.H., Krause J.A.* Working memory, math performance, and math anxiety // *Psychonomic bulletin & review*. 2007. Vol. 14. P. 243—248. DOI:10.3758/BF03194059
7. *Ashcraft M.H., Moore A.M.* Mathematics anxiety and the affective drop in performance // *Journal of Psychoeducational assessment*. 2009. Vol. 27. № 3. P. 197—205. DOI:10.1177/0734282908330580
8. *Ashcraft M.H., Ridley K.S.* Math anxiety and its cognitive consequences: A tutorial review // *The handbook of mathematical cognition*. 2005. P. 315—327.
9. *Baddeley A.* Working memory // *Science*. 1992. Vol. 255. № 5044. P. 556—559. DOI:10.1126/science.1736359

10. *Batashvili M., Staples P., Baker I.S., Sheffield D.* The neurophysiological relationship between number anxiety and the EEG gamma-band // *Journal of Cognitive Psychology*. 2020. Vol. 32. № 5-6. P. 580—585. DOI:10.1080/20445911.2020.1778006
11. *Büchel C., Dolan R.J., Armony J.L., Friston K.J.* Amygdala-hippocampal involvement in human aversive trace conditioning revealed through event-related functional magnetic resonance imaging // *Journal of Neuroscience*. 1999. Vol. 19. № 24. P. 10869—10876. DOI:10.1523/jneurosci.19-24-10869.1999
12. *Budakova A.V., Likhonov M., Bloniewski T., Malykh S., Kovas Y.* Mathematical anxiety: etiology, development, and links with mathematical achievement // *Voprosy filosofii i psikhologii*. 2020. Vol. 66. № 1. P. 109—118.
13. *Choi-Koh S.S., Ryou B.G.* Differences of math anxiety groups based on two measurements, MASS and EEG // *Educational Psychology*. 2019. Vol. 39. № 5. P. 659—677. DOI:10.1080/01443410.2018.1543857
14. *Dede Y.* Mathematics anxiety questionnaire development and validation // *Essays in Education*. 2008. Vol. 23. P. 36—55.
15. *Demedts F., Cornelis J., Reynvoet B., Sasanguie D., Depaepe F.* Measuring math anxiety through self-reports and physiological data // *Journal of Numerical Cognition*. Vol. 9. № 3. P. 380—397. DOI:10.5964/jnc.9735
16. *Hartwright C.E., Looi C.Y., Sella F., Inuggi A., Santos F.H., González-Salinas C., Fuentes L.J.* The neurocognitive architecture of individual differences in math anxiety in typical children // *Scientific reports*. 2018. Vol. 8. № 1. P. 8500. DOI:10.1038/s41598-018-26912-5
17. *Hopko D.R.* Confirmatory factor analysis of the math anxiety rating scale-revised // *Educational and psychological measurement*. 2003. Vol. 63. № 2. P. 336—351. DOI:10.1177/0013164402251041
18. *Hopko D.R., Ashcraft M.H., Gute J., Ruggiero K.J., Lewis C.* Mathematics anxiety and working memory: Support for the existence of a deficient inhibition mechanism // *Journal of anxiety disorders*. 1998. Vol. 12. № 4. P. 343—355. DOI:10.1016/S0887-6185(98)00019-X

19. Jones W.J., Childers T.L., Jiang Y. The shopping brain: Math anxiety modulates brain responses to buying decisions // *Biological psychology*. 2012. Vol. 89. № 1. P. 201—213. DOI:10.1016/j.biopsycho.2011.10.011
20. Kelly S., Croucher S.M., Kim K.Y., Permyakova T., Turdubaeva E., Rocker K.T., Rimkeeratikul S.A. General Math Anxiety Measure // *Education Sciences*. 2022. Vol. 12. № 6. P. 370. DOI:10.3390/educsci12060370
21. Klados M.A., Pandria N., Micheloyannis S., Margulies D., Bamidis P.D. Math anxiety: Brain cortical network changes in anticipation of doing mathematics // *International Journal of Psychophysiology*. 2017. Vol. 122. P. 24—31. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2017.05.003
22. Klados M.A., Paraskevopoulos E., Pandria N., Bamidis P.D. The impact of math anxiety on working memory: A cortical activations and cortical functional connectivity EEG study // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 15027—15039. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2892808
23. Klein E., Bieck S.M., Bloechle J., Huber S., Bahnmueller J., Willmes K., Moeller K. Anticipation of difficult tasks: neural correlates of negative emotions and emotion regulation // *Behavioral and Brain Functions*. 2019. Vol. 15. P. 1—13. DOI:10.1186/s12993-019-0155-1
24. Lee K., Bull R. Developmental changes in working memory, updating, and math achievement // *Journal of Educational Psychology*. 2016. Vol. 108. № 6. P. 869. DOI:10.1037/edu0000090
25. Levy H.E., Rubinsten O. Numbers (but not words) make math anxious individuals sweat: Physiological evidence // *Biological psychology*. 2021. Vol. 165. P. 108187. DOI:10.1016/j.biopsycho.2021.108187
26. Liu J., Li J., Peng W., Feng M., Luo Y. EEG correlates of math anxiety during arithmetic problem solving: Implication for attention deficits // *Neuroscience letters*. 2019. Vol. 703. P. 191—197. DOI:10.1016/j.neulet.2019.03.047
27. Lyons I.M., Beilock S.L. When math hurts: math anxiety predicts pain network activation in anticipation of doing math // *PLoS one*. 2012. Vol. 7. № 10. P. e48076. DOI:10.1371/journal.pone.0048076
28. Mattarella-Micke A., Mateo J., Kozak M.N., Foster K., Beilock S. Choke or thrive? The relation between salivary cortisol and math performance depends on individual differences in working memory and math-anxiety // *Emotion*. 2011. Vol. 11. P. 1000—1005. DOI:10.1037/a0023224
29. Mehrabinejad M.M., Sanjari Moghaddam H., Mohammadi E., Hajighadery A., Sinaeifar Z., Aarabi M.H. Sex differences in microstructural white matter alterations of mathematics anxiety based on diffusion MRI connectometry // *Neuropsychology*. 2021. Vol. 35. № 2. P. 197. DOI:10.1037/neu0000684
30. Norton A., Seok Y., Choi-Koh S. Examining mathematics anxiety of undergraduates using a brain-based measurement // *EEG Journal of Behavioral and Brain Science*. 2019. Vol. 9. P. 195—209. DOI:10.4236/jbbs.2019.95017
31. Phelps E.A., Delgado M.R., Nearing K.I., LeDoux J.E. Extinction learning in humans: role of the amygdala and vmPFC // *Neuron*. 2004. Vol. 43. № 6. P. 897—905. DOI:10.1016/j.neuron.2004.08.042
32. Pizzie R.G., McDermott C.L., Salem T.G., Kraemer D.J. Neural evidence for cognitive reappraisal as a strategy to alleviate the effects of math anxiety // *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. 2020. Vol. 15. № 12. P. 1271—1287. DOI:10.1093/scan/nsaa161
33. Pletzer B., Wood G., Moeller K., Nuerk H.C., Kerschbaum H.H. Predictors of performance in a real-life statistics examination depend on the individual cortisol profile // *Biol. Psychol.* 2010. Vol. 85. P. 410—416. DOI:10.1016/j.biopsycho.2010.08.015
34. Richardson F.C., Suinn R.M. The mathematics anxiety rating scale: psychometric data // *Journal of counseling Psychology*. 1972. Vol. 19. № 6. P. 551. DOI:10.1037/h0033456
35. Smith D.D., Meca A., Bottenhorn K.L., Bartley J.E., Riedel M.C., Salo T., Laird A.R. Task-based attentional and default mode connectivity associated with science and math anxiety profiles among university physics students // *Trends in Neuroscience and Education*. 2023. P. 100204. DOI:10.1016/j.tine.2023.100204
36. Soltanlou M., Artemenko C., Dresler T., Fallgatter A.J., Ehlis A.C., Nuerk H.C. Math anxiety in combination with low visuospatial memory impairs math learning in children // *Frontiers in psychology*. 2019. Vol. 10. P. 89. DOI:10.3389/fpsyg.2019.00089
37. Strohmaier A.R., Schiepe-Tiska A., Müller F., Reiss K. Mathematical reading patterns-The influence of self-concept and situational context // *Annual Meeting of the American Educational Research Association (AERA)*. San Antonio, TX, 2017.
38. Suárez-Pellicioni M., Nuñez-Peña M.I., Colomé Á. Abnormal error monitoring in math-anxious individuals: evidence from error-related brain potentials // *PLoS one*. 2013. Vol. 8. № 11. P. e81143. DOI:10.1371/journal.pone.0081143
39. Suarez-Pellicioni M., Nuñez-Peña M.I., Colome A. Reactive recruitment of attentional control in math anxiety: an ERP study of numeric conflict monitoring and adaptation // *PLoS one*. 2014. Vol. 9. № 6. P. e99579. DOI:10.1371/journal.pone.0099579
40. Wang Z., Hart S.A., Kovas Y., Lukovski S., Soden B., Thompson L.A. et al. Who is afraid of math? Two sources of genetic variance for mathematical anxiety // *J. Child Psychol. Psychiatry*. 2014. Vol. 55. P. 1056—1064. DOI:10.1111/jcpp.12224
41. Young C.B., Wu S.S., Menon V. The neurodevelopmental basis of math anxiety //

Psychological science. 2012. Vol. 23. № 5. P. 492—501. DOI:10.1177/0956797611429134
42. Zhan E.S., Likhanov M.V., Zakharov I.M., Bezrukova E.M., Malykh S.B. The Role of

Mathematical and trait anxiety in Mental fatigue: an eeg investigation // Psychology in Russia: State of the art. 2018. Vol. 11. № 4. P. 79—95. DOI:10.11621/pir.2018.0406

Информация об авторах

Маракшина Юлия Александровна, кандидат психологических наук, ведущий аналитик, Центр междисциплинарных исследований в сфере наук об образовании, ФГБУ «Российская академия образования» (ФГБУ РАО), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7559-9148>, e-mail: retalika@yandex.ru

Павлова Анна Андреевна, главный специалист, Центр междисциплинарных исследований в сфере наук об образовании, ФГБУ «Российская академия образования» (ФГБУ РАО), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1566-243X>, e-mail: annapavlova98hse@gmail.com

Лобаскова Марина Михайловна, кандидат психологических наук, главный специалист, Центр междисциплинарных исследований в сфере наук об образовании, ФГБУ «Российская академия образования» (ФГБУ РАО), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0318-6480>, e-mail: lobaskovamm@gmail.com

Миронец Софья Анатольевна, главный специалист, Центр междисциплинарных исследований в сфере наук об образовании, ФГБУ «Российская академия образования» (ФГБУ РАО), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9763-109X>, e-mail: sofiamironets@gmail.com

Адамович Тимофей Валерьевич, главный специалист, Центр междисциплинарных исследований в сфере наук об образовании, ФГБУ «Российская академия образования» (ФГБУ РАО), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1571-9192>, e-mail: tadamovich11@gmail.com

Ситникова Мария Александровна, кандидат психологических наук, ведущий аналитик, Центр междисциплинарных исследований в сфере наук об образовании, ФГБУ «Российская академия образования» (ФГБУ РАО), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3545-2149>, e-mail: sitnikovamary46@gmail.com

Information about the authors

Julia A. Marakshina, PhD in Psychology, Senior Researcher, Center for Interdisciplinary Research in the Educational Sciences, Russian Academy of Education, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7559-9148>, e-mail: retalika@yandex.ru

Anna A. Pavlova, Junior Researcher, Center for Interdisciplinary Research in the Educational Sciences, Russian Academy of Education, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1566-243X>, e-mail: annapavlova98hse@gmail.com

Marina M. Lobaskova, PhD in Psychology, Senior Researcher, Center for Interdisciplinary Research in the Educational Sciences, Russian Academy of Education, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0318-6480>, e-mail: lobaskovamm@gmail.com

Sofia A. Mironets, Junior Researcher, Center for Interdisciplinary Research in the Educational Sciences, Russian Academy of Education, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9763-109X>, e-mail: sofiamironets@gmail.com

Timofey V. Adamovich, Junior Researcher, Center for Interdisciplinary Research in the Educational Sciences, Russian Academy of Education, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1571-9192>, e-mail: tadamovich11@gmail.com

Maria A. Sitnikova, PhD in Psychology, Senior Researcher, Center for Interdisciplinary Research in the Educational Sciences, Russian Academy of Education, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3545-2149>, e-mail: sitnikovamary46@gmail.com

Получена 22.03.2024

Принята в печать 28.02.2025

Received 22.03.2024

Accepted 28.02.2025