

ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ (КОГНИТИВНОЙ) ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

УДК 612.821.2, 612.821.8

ВЛИЯНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТРЕВОЖНОСТИ НА ВЫПОЛНЕНИЕ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ НА НЕОСОЗНАВАЕМОМ УРОВНЕ

© 2025 г. В. М. Князева*, Н. В. Полякова, Д. Г. Федоров,
Д. Д. Ситникова, А. А. Александров

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: v.m.knyazeva@spbu.ru

Поступила в редакцию 27.06.2024 г.

После доработки 26.08.2024 г.

Принята к публикации 09.09.2024 г.

Проявление математической тревожности (МТ) связывают с беспокойством и страхом перед выполнением математических задач. Целью исследования было изучить электрофизиологические корреляты осознаваемых и неосознаваемых процессов при выполнении простых арифметических операций в зависимости от уровня математической тревожности участников эксперимента. Участникам эксперимента предъявлялись примеры на сложение и следующие за ними правильные и неправильные ответы. Участники эксперимента с низким уровнем МТ как в блоке с замаскированным, так и в блоке с незамаскированным предъявлением примеров демонстрируют достоверное увеличение амплитуды вызванных потенциалов при предъявлении правильного ответа по сравнению с неправильным на интервале 300–400 мс (волна N400/P300). В группе участников эксперимента с высоким уровнем МТ такое различие наблюдается только при осознаваемом восприятии (незамаскированное предъявление примеров). Участники эксперимента с высоким уровнем МТ показывают достоверную разницу между правильными и неправильными ответами на интервале 450–650 мс при неосознаваемом восприятии примеров, что позволяет говорить о наличии арифметического эффекта волны LPC (late positive component). Таким образом, полученные результаты могут свидетельствовать о преимущественном использовании процедурных стратегий при решении простых примеров участниками эксперимента с высоким уровнем МТ. С другой стороны, участники эксперимента с низким уровнем МТ демонстрируют корреляты автоматического извлечения ответа напрямую из долговременной памяти даже при неосознаваемом восприятии стимулов.

Ключевые слова: математическая тревожность, арифметика, N400, P300, поздний позитивный компонент, внимание, замаскированный прайминг, неосознаваемое восприятие, задача арифметической верификации

DOI: 10.31857/S0044467725010054

ВВЕДЕНИЕ

Математическая тревожность (mathematical anxiety, МТ) является распространенным аффективным расстройством, которое характеризуется избыточным страхом и беспокойством, возникающим в ситуациях, связанных с вычислениями (Будакова и др., 2020). МТ может привести к снижению успеваемости, избеганию ситуаций, связанных с математическими вычислениями, и карьеры, требующей математических знаний (Ashcraft et al., 2022; Daker et al., 2021). Исследования показывают, что люди с высоким уровнем МТ по сравнению с людьми с низкой МТ хуже справляются со сложными арифметическими задачами, в то время

как скорость и эффективность решения простых арифметических задач одинакова в обеих группах участников эксперимента (Zhang et al., 2019). Предполагается, что это связано с использованием менее эффективных стратегий решения арифметических примеров. Так, например, было установлено, что участники эксперимента с высоким уровнем МТ реже используют прямое извлечение результата вычисления из долговременной памяти, а чаще используют процедурные стратегии (т.е. разложение примеров на более простые, например $9+5 = 9+1+4$) и прямой подсчет для получения ответа (Imbo, Vandierendonck, 2007; Si et al., 2016). Таким образом, предполагается, что люди с высоким уровнем МТ затрачивают больше ресурсов памяти

и внимания для достижения той же эффективности работы, что и у людей с низким уровнем МТ (Suárez-Pellicioni et al., 2013).

Существует несколько теорий возникновения МТ, каждая из которых находит свое подтверждение в литературе. Одна из теорий утверждает, что высокий уровень МТ требует больших ресурсов рабочей памяти, необходимых для оптимальной математической производительности, что приводит к снижению успеваемости в группе участников эксперимента с высоким уровнем МТ (Ashcraft, Kirk, 2001). Вторая теория (Maloney et al., 2011) указывает на то, что люди с высоким уровнем МТ могут иметь менее точное ментальное представление о величине и отношении величин различных чисел, что может препятствовать развитию более сложных математических навыков. Наконец, третья теория (Suárez-Pellicioni et al., 2016) предполагает, что у людей с высоким уровнем МТ наблюдается дефицит контроля внимания, что делает их более восприимчивыми к отвлечению при выполнении числовых задач.

Исследования показывают, что у людей с высоким уровнем МТ при решении математических задач активизируются области мозга, связанные с негативными эмоциональными реакциями и болью, такие как миндалевидное тело и островковая доля (Shakmaeva, 2022). Помимо повышенной активности миндалевидного тела, у людей с высоким уровнем МТ наблюдалась сниженная активность в дорсолатеральной префронтальной коре при выполнении задачи на проверку результата вычисления примера (Young et al., 2012). Высокий уровень МТ также отрицательно коррелирует с объемом серого вещества в левой передней внутритеменной борозде – области, которая связана с процессами внимания. Это позволяет предположить, что в основе различий в концентрации внимания между людьми с низким и высоким уровнем МТ могут лежать исходные различия в морфологии головного мозга (Hartwright, 2018). Кроме того, было обнаружено, что результативность решения математической задачи предсказывалась нейронной активностью в области стыка нижней лобной и нижней прецентральной борозды (Lyons, Beilock, 2012). Указанная область активируется совместно с дорсолатеральной префронтальной корой как часть сети, связанной с когнитивным контролем (Derrfuss et al., 2005). Таким образом, можно предположить, что люди с высоким уровнем МТ иногда могут преодолеть дефицит внимания путем увеличения ресурсов контроля до начала самой математической задачи. Полученные данные подтверждают атипичную активность сетей, вовлеченных в функции когнитивного контроля, у людей с высоким уровнем МТ.

Использование парадигмы простого и замаскированного прайминга позволяет выявить

независящие от когнитивного контроля и активного внимания процессы, связанные с автоматическими механизмами распознавания и обработки стимулов. В случае замаскированного прайминга сознательное восприятие контекста нарушается при предъявлении «маски» (например, случайная последовательность букв или символов) между праймом и следующим за ним контекстно связанным целевым стимулом (Kristjánsson, Ásgeirsson, 2019).

Предъявление результата решения арифметического примера в парадигме прайминга приводит к возникновению специфической реакции в вызванных потенциалах (ВП) мозга. ВП, регистрируемый в ответ на предъявление правильного ответа, характеризуется позитивностью, достигающей максимума примерно на 450-й мс от начала предъявления стимула. Неправильные ответы примерно с 300 мс от начала предъявления стимула имеют негативность большей амплитуды, за которой следует длительная позитивная волна. Ряд авторов интерпретируют полученный результат как комплекс волн N400 и позднего позитивного компонента (late positive component, LPC) (Jost et al., 2004; Domahs et al., 2007), а ряд авторов – как комплекс волн P300 и LPC (Jasinski, Coch, 2012; Dickson et al., 2018). Объяснение представленного противоречия может заключаться в частичном перекрытии по времени волн N400 и P300, возникающих во временных диапазонах 200–600 мс (Kutas, Federmeier, 2011) и 300–600 мс (Riggins, Scott, 2020) соответственно. Таким образом, с одной стороны, возникновение компонента N400, связанного с обнаружением смыслового рассогласования предъявляемого стимула с контекстом (Kutas, Federmeier, 2011), приводит к увеличению амплитуды негативной волны ВП в ответ на нецелевые стимулы. С другой стороны, волна P300, которая обычно имеет позитивность большей амплитуды в отношении ожидаемой, соответствующей задаче цели (Huang et al., 2015), приводит к возникновению положительного отклонения при предъявлении правильного ответа. Соотношение амплитуд этих волн будет зависеть от парадигмы и индивидуальных особенностей участников эксперимента (Proverbio, Carminati, 2019), а разница в амплитуде указанных компонент ВП, регистрируемая при сравнении ВП в ответ на предъявление верного и ошибочного результата решения арифметического примера, носит название арифметического эффекта волн N400/P300 и LPC (Jost et al., 2004).

Компоненты P300/N400 и следующая за ними волна LPC отражают последовательные процессы перцептивного анализа, по-разному протекающие для совпадающих и не совпадающих с предшествующим контекстом стимулов. Волна N400 может быть обусловлена так называемой памятью узнавания, а предварительная активация узлов

памяти будет приводить к облегчению восприятия контекстно связанного стимула, что выражается в снижении амплитуды N400 (Kutas, Federmeier, 2011). Волна P300 связывается с процессами категоризации, принятия решения и узнавания, отражающего повышенную различимость целевых стимулов по мере увеличения силы следа памяти (Riggins, Scott, 2020). Ранее было установлено, что амплитуда волны N400/P300, а также выраженность арифметического эффекта волны N400/P300 зависит от сложности задания, используемой стратегии вычислений и степени развитости арифметического навыка (Proverbio, Carminati, 2019). В случае использования стратегии извлечения результата из долговременной памяти предполагается наличие большей амплитуды ответов (Jost et al., 2011) и более выраженного арифметического эффекта волны N400/P300 (Proverbio, Carminati, 2019).

Волна LPC связана с процессами припоминания и категоризации стимула, а также отражает степень несоответствия предъявляемого стимула предшествующему контексту (Núñez-Peña, Suárez-Pellicioni, 2012; Sun et al., 2024). Волна LPC имеет позитивность большей амплитуды в ответ на предъявление неверного ответа. Арифметический эффект LPC более выражен в ответ на сложные примеры, а также у участников эксперимента с менее тренированным арифметическим навыком (Núñez-Peña et al., 2011; Núñez-Peña, Suárez-Pellicioni, 2012). Предполагается, что увеличение позитивности волны LPC является мерой степени ожидания и свидетельствует об использовании стратегии оценки правдоподобия представленной задачи (Núñez-Peña, Suárez-Pellicioni, 2012). Предыдущие исследования показали, что участники эксперимента с высоким уровнем МТ при решении примеров на сложение однозначных чисел демонстрируют увеличение позитивности и латентности волны LPC в ответ на предъявление неверных ответов с большим диапазоном девиации ошибки (Suárez-Pellicioni et al., 2013). С другой стороны, при решении примеров на сложение двузначных чисел был обнаружен противоположный эффект, а именно уменьшение позитивности волны LPC в ответ на предъявление неправильного решения у участников эксперимента с высоким уровнем МТ (Núñez-Peña, Suárez-Pellicioni, 2015). Авторы предполагают, что предъявляемые неправильные решения для сложных примеров кажутся участникам эксперимента с высоким уровнем МТ более правдоподобными, что приводит к снижению позитивности волны LPC.

Генерация описываемых компонентов в условиях сниженного или отвлеченного внимания может свидетельствовать об автоматической, не зависящей от процессов произвольного внимания природе соответствующих процессов, что

подтверждается результатами недавних исследований (Полякова, Александров, 2019; Strauss, Dehaene, 2019). Таким образом, выявление различий в электрофизиологических критериях указанных процессов позволяет оценить степень выраженности их автоматической природы в условиях неосознаваемого восприятия.

Целью исследования было изучить электрофизиологические корреляты осознаваемых и неосознаваемых процессов при выполнении математических операций в зависимости от уровня математической тревожности участников эксперимента. Мы предполагаем обнаружить различия в характеристиках волны N400/P300 и волны LPC, а также выраженности арифметического эффекта волны N400/P300 и волны LPC в группах с высоким и низким уровнем МТ. Выявление указанных различий в условиях неосознаваемого восприятия при замаскированном предъявлении стимулов будет являться маркером автоматической природы соответствующих когнитивных процессов. Полученные результаты позволят сделать вывод об используемых стратегиях вычисления у участников эксперимента двух групп.

МЕТОДИКА

В исследовании приняли участие 24 человека (из них 13 женщин) в возрасте от 18 до 25 лет. Половина участников эксперимента составила группу с низким уровнем МТ ($M = 45$; $SD = 5.80$), половина – группу с высоким уровнем МТ ($M = 74$; $SD = 17.36$) по результатам русскоязычной версии сокращенной шкалы оценки МТ (sMARS; Alexander, Martray, 1989). Шкала sMARS состоит из 25 пунктов, которые представляют ситуации, вызывающие математическую тревогу: математический тест, числовая задача и тревога из-за курса математики. Ответы на вопросы оцениваются по пятибалльной шкале Лайкера от 1 (отсутствие тревожности) до 5 (высокая тревожность). Общий балл получается путем суммирования оценок, баллы варьируются от 25 до 125.

Все участники эксперимента были правшами и сообщили об отсутствии неврологических заболеваний в анамнезе за последние три года, нормальном слухе и нормальной или скорректированной до нормы остроте зрения. Каждый из включенных в исследование участников подписал информированное добровольное согласие на участие в исследовании. Исследование было одобрено Этическим комитетом Санкт-Петербургского психологического общества в области исследований с привлечением людей (протокол № 25 от 26.10.2023).

Уровень арифметического навыка участников эксперимента был оценен с использованием теста

на скорость и точность арифметических вычислений (Sowinski et al., 2014). Тест состоял из трех блоков с примерами на сложение, вычитание и умножение двузначных чисел. В каждом блоке было представлено 6 рядов примеров, по 10 примеров на каждом блоке. Участникам давалась 1 минута на каждый блок, их просили решать примеры точно и как можно быстрее. Разрешалось использовать лист бумаги для письменных расчетов. Перед началом теста участники решали 6 тренировочных задач каждого типа. Общий балл получался путем суммирования числа правильно решенных примеров, баллы варьировались от 0 до 60 для каждого блока.

Парадигма

Экспериментальная задача включала предъявление примеров на сложение (прайм) разной степени трудности (большая и малая проблема) в блоках с осознаваемым и неосознаваемым восприятием, а также верные и ошибочные результаты решения предъявляемых примеров (целевой стимул). Блок с осознаваемым восприятием всегда предшествовал блоку с неосознаваемым восприятием (Полякова, Александров, 2019). В блоке на осознаваемое восприятие прайма задачей участников эксперимента было внимательно смотреть на экран и вычислять предъявляемые примеры до появления целевого стимула (ответа). Средняя оценка успешности выполнения задания была получена путем опроса участников эксперимента после выполнения теста. Таким образом, не планировалось задействовать моторный ответ участников эксперимента, как в ряде работ с использованием парадигмы верификации ответа (Taghizadeh et al., 2020), что позволило избежать появления компонент ВП, связанных с подготовкой и выполнением моторного задания. При создании блоков на неосознаваемое восприятие был применен метод замаскированного прайминга. Для этого сразу после появления прайма предъявлялся стимул-маска, состоящий из набора символов «&@&», после чего показывался результат вычисления примера. Предъявление стимула-маски после прайма приводит к замещению зрительного образа и затруднению сознательного восприятия прайма. Участникам эксперимента не сообщалось, что перед маской предъявлялись примеры. После эксперимента все участники эксперимента заявили, что видели только стимул-маску и не замечали примера перед ним. Задачей участника эксперимента было внимательно смотреть на экран. Для поддержания уровня внимания в блоке с неосознаваемым восприятием стимулов предъявлялись двенадцать незамаскированных примеров. Когда участник эксперимента видел пример (незамаскированное предъявление), его просили выполнить вычисления до появления ответа.

Параметры стимулов

В качестве прайм-стимулов использовались примеры на сложение однозначных чисел (от 1 до 9), были исключены примеры с одинаковыми слагаемыми (например: 5 + 5), а также примеры с ответом, равным 10 (Blankenberger, 2001). В каждом из двух блоков (осознаваемое и неосознаваемое восприятие) в случайном порядке были предъявлены 192 простых примера на сложение с суммой однозначных чисел < 10 (малая проблема (МП)) и 192 трудных примера с суммой однозначных чисел > 10 (большая проблема (БП)) (Wilson et al., 2006). Длительность предъявления примера составляла 32 мс (Полякова, Александров, 2019). Для задачи с неосознаваемым восприятием стимулов сразу после предъявления примера на 96 мс демонстрировался стимул-маска. Через 468 мс после появления примера предъявлялся целевой стимул (верные или ошибочные результаты решения арифметических примеров с равной вероятностью). В качестве неправильных ответов были использованы однозначные или двузначные числа с малым диапазоном девиации ошибки (от 1 до 3), которые задавались случайно для каждого участника эксперимента. Протокол исследования включал в себя тренировочную сессию, осознаваемый и неосознаваемый блоки, разделенные на 3 сегмента по 64 примера в каждом (32 малые проблемы и 32 большие проблемы, предъявляемые в случайном порядке). Длительность одного сегмента составляла около 4 минут, между сегментами давалось время для отдыха. Данная парадигма показала свою эффективность в наших предыдущих исследованиях (Полякова, Александров, 2019).

Во время исследования участник эксперимента сидел напротив экрана в комфортном положении, расстояние от центра монитора до глаз составляло 100 см, угловой размер стимулов составлял 2.86° по горизонтали и 2.00° по вертикали. Стимулы предъявлялись в центре экрана (частота обновления 60 Гц) с помощью программы Presentation (Neurobehavioral Systems Inc., Олбани, Калифорния, США). Значения длительности предъявления стимулов и синхронизация предъявления с покадровой разверткой были оценены перед началом эксперимента с помощью датчика яркости светового потока OPT101 (Texas Instruments, США). В ходе исследования проводилась регистрация 31-канальной электроэнцефалограммы (ЭЭГ) с помощью электроэнцефалографа «Мицар-ЭЭГ-202» и пакета программного обеспечения WinEEG (ООО «Мицар», Санкт-Петербург, Россия). В качестве референта использовался общий единственный ушной электрод, заземляющий электрод находился на лбу. Сопротивление электродов не превышало 10 кОм. Сигнал оцифровывался

с частотой дискретизации 500 Гц. После процедуры фильтрации ЭЭГ в диапазоне от 0.53–30 Гц и удаления глазодвигательных артефактов методом независимых компонент, а также удаления артефактов, превышающих по амплитуде 100 мкВ, в ответ на предъявление целевого стимула (верные и ошибочные результаты решения арифметических примеров) были вычислены индивидуальные длиннолатентные зрительные вызванные потенциалы. Продолжительность анализируемой эпохи составляла 1100 мс. Для коррекции изолинии использовался интервал от 0 до -100 мс до начала стимула. Количество исключенных из анализа эпох составило не более 5%.

Статистическая обработка результатов

На основании данных литературных источников (Prieto-Corona et al., 2010) были определены основные компоненты ВП и интервалы для их дальнейшего анализа. Анализ средней амплитуды (от изолинии) компонента N400 проводился в пределах временного окна 300–400 мс, компонента LPC – в пределах 450–650 мс. Для статистического анализа были выбраны 9 отведений: F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4. Статистическая оценка результатов проводилась с помощью дисперсионного анализа с повторными измерениями (IBM SPSS Statistic v. 21, IBM Corporation, Нью-Йорк, США) отдельно для блоков осознаваемого и неосознаваемого предъявления стимулов (Полякова, Александров, 2019) с внутригрупповыми факторами: «Тип ответа» (2 уровня: правильный и неправильный ответ), «Размер проблемы» (2 уровня: большая и малая проблема), «Каудальность» (3 уровня: фронтальные, медиальные и теменные отведения), «Латерализация» (3 уровня: правое и левое полушарие, центральные отведения) – и межгрупповым фактором «Группа» (2 уровня: высокий и низкий уровень математической тревожности). Тест Шапиро–Уилка не обнаружил значимого отклонения распределения значений от нормального. В случае значимого отклонения от предположения о сферичности, оцениваемого с помощью критерия Монте–Карло, применялась поправка статистики F-критерия по методу Гринхауса–Гейссера. Апостериорный анализ проводился с помощью метода парных сравнений

с коррекцией Бонферрони. Анализ корреляционной связи проводился с использованием коэффициента ранговой корреляции r -Спирмена.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты оценки уровня арифметического навыка

Статистический анализ результатов теста на скорость и точность арифметических вычислений проводился с использованием непараметрического U-критерия Манна–Уитни. Анализ не выявил достоверных различий уровня арифметического навыка ($z = -1.331$; $p = 0.198$) в группах участников эксперимента с высоким ($M = 27.33 \pm 7.82$) и низким ($M = 33.75 \pm 13.71$) уровнем МТ. Отдельный анализ трех блоков с примерами на сложение, вычитание и умножение показал некоторое снижение уровня арифметического навыка в группе участников эксперимента с высоким уровнем МТ, которое, однако, также не достигает уровня достоверности (см. табл. 1).

Результаты анализа вызванных потенциалов при осознаваемом восприятии стимулов

На рис. 1 показаны групповые усредненные вызванные потенциалы во фронтальных, центральных и париетальных отведениях при осознаваемом восприятии стимулов. Статистический анализ амплитуд ответа на интервале 300–400 мс от начала предъявления результата решения арифметического примера показал достоверное влияние фактора «Размер проблемы» ($F(1, 22) = 41.198$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.652$). Было установлено, что амплитуда ВП при предъявлении примеров большой проблемы достоверно больше по сравнению с примерами малой проблемы.

Было обнаружено взаимодействие факторов «Тип ответа» * «Каудальность» * «Латерализация» * «Группа» ($F(4, 88) = 3.294$, $p = 0.024$, $\eta^2 = 0.13$). Апостериорный анализ показал, что участники эксперимента с низким уровнем МТ при предъявлении правильного ответа имеют большую амплитуду ВП во фронтальных ($F3$: $p = 0.021$,

Таблица 1. Результаты теста на скорость и точность арифметических вычислений в трех блоках с примерами на сложение, вычитание и умножение

Table 1. Calculation fluency test results in three blocks with addition, subtraction and multiplication problems

	Сложение	Вычитание	Умножение
Низкий уровень МТ	15.00 \pm 5.48	12.08 \pm 4.80	6.67 \pm 4.27
Высокий уровень МТ	12.42 \pm 3.63	9.58 \pm 3.40	5.33 \pm 3.06
Результаты теста Манна–Уитни	$z = -1.102$; $p = 0.291$	$z = -1.509$; $p = 0.143$	$z = -0.879$; $p = 0.410$

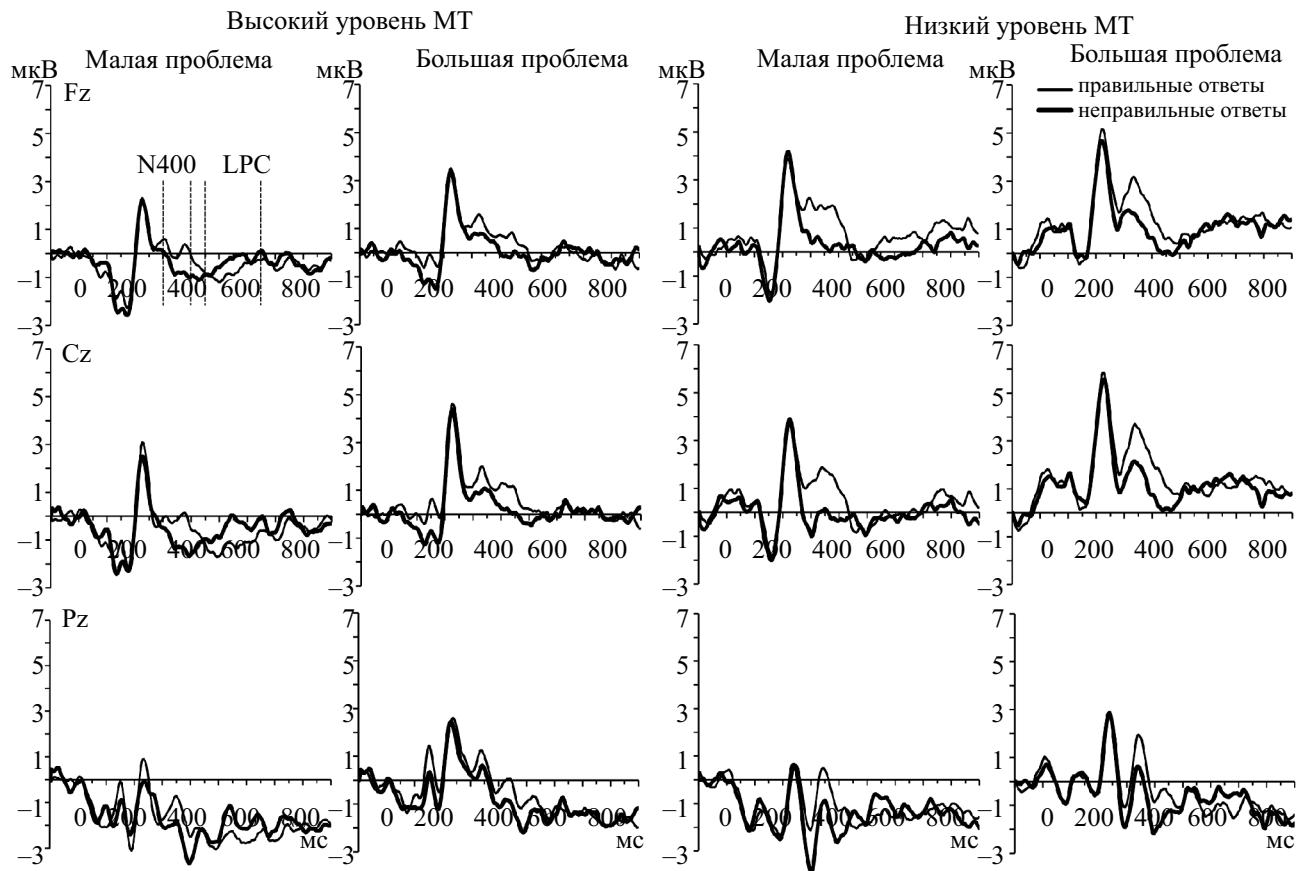


Рис. 1. Вызванные потенциалы при осознаваемом восприятии стимулов. Тонкой линией отмечен ВП в ответ на предъявление правильных решений, толстой линией – ВП в ответ на предъявление неправильных решений. Представлены ВП для примеров малой и большой проблем для участников эксперимента с высоким (слева) и низким (справа) уровнем математической тревожности. Пунктирной линией показаны интервалы анализа основных компонент.

Fig. 1. Event related potentials (ERPs) during conscious stimuli perception. The thin line shows ERPs in response to the correct solutions presentation, the thick line shows ERPs in response to the incorrect solutions presentation. The ERPs are shown for small and large problems for participants with high (left) and low (right) levels of mathematical anxiety. The dotted line shows the intervals of the ERPs components statistical analysis.

Fz: $p = 0.013$) и центральных (Cz: $p = 0.031$) отведениях по сравнению с участниками эксперимента, имеющими высокий уровень МТ. При предъявлении неправильных ответов достоверной разницы между двумя группами участников эксперимента обнаружено не было. Кроме того, у менее тревожных участников эксперимента при предъявлении правильного ответа, по сравнению с предъявлением неправильного, наблюдается увеличение амплитуды ВП во фронтальных (F3: $p = 0.002$, Fz: $p = 0.002$, F4: $p = 0.004$), центральных (C3: $p < 0.001$, Cz: $p = 0.003$, C4: $p < 0.001$) и париетальных (P3: $p = 0.006$, Pz: $p = 0.005$, P4: $p = 0.003$) отведениях, что является отражением арифметического эффекта волны N400. В группе математически тревожных участников эксперимента арифметический эффект волны N400 достоверно наблюдается только в отведениях C4 ($p = 0.049$) и P3 ($p = 0.03$).

Также наблюдается асимметрия в распределении ВП на исследуемом интервале. В отведениях левого полушария наблюдается снижение амплитуды по сравнению с центральными отведениями и отведениями правого полушария как при предъявлении правильных (высокий уровень МТ: F3/Fz: $p = 0.001$; C3/Cz: $p = 0.001$; P3/P4: $p = 0.034$; Pz/P4: $p = 0.003$; низкий уровень МТ: F3/Fz: $p = 0.007$; P3/P4: $p = 0.002$; Pz/P4: $p = 0.003$), так и при предъявлении неправильных (высокий уровень МТ: F3/Fz: $p = 0.002$; F3/F4: $p = 0.049$; C3/Cz: $p = 0.001$; P3/P4: $p = 0.044$; Pz/P4: $p = 0.002$; низкий уровень МТ: F3/Fz: $p = 0.045$; P3/P4: $p = 0.009$; Pz/P4: $p = 0.001$) ответов.

Статистический анализ амплитуд ответа на интервале 450–650 мс от начала предъявления результата решения арифметического примера показал достоверное взаимодействие факторов «Тип ответа» * «Размер проблемы» * «Каудальность»

($F(2, 44) = 4.507, p = 0.03, \eta^2 = 0.17$) и «Размер проблемы» * «Латеральность» ($F(2, 44) = 7.450, p = 0.002, \eta^2 = 0.253$). Апостериорный анализ показал увеличение амплитуды ВП при предъявлении правильных ответов на примеры БП по сравнению с примерами МП во фронтальных ($p = 0.014$), центральных ($p < 0.001$) и париетальных ($p = 0.001$) отведениях. Для неправильных ответов аналогичное увеличение амплитуды наблюдалось только в центральных отведениях ($p = 0.049$). Кроме того, было обнаружено наличие асимметрии ответа и изменение амплитуды ВП в рострально-каудальном направлении. В левом полушарии наблюдается снижение амплитуды по сравнению с медианными отведениями (МП: $p = 0.012$; БП: $p = 0.034$) и отведениями правого полушария (МП: $p = 0.032$). При предъявлении правильных ответов во фронтальных отведениях регистрируется большая амплитуда по сравнению

с центральными (МП: $p = 0.002$) и париетальными (МП: $p = 0.014$; БП: $p = 0.032$) отведениями.

Результаты анализа вызванных потенциалов при неосознаваемом восприятии стимулов

На рис. 2 показаны групповые усредненные вызванные потенциалы во фронтальных, центральных и париетальных отведениях при неосознаваемом восприятии стимулов. Статистический анализ амплитуд ответа на интервале 300–400 мс от начала предъявления результата решения арифметического примера показал достоверное взаимодействие факторов «Тип стимула» * «Группа» ($F(1, 22) = 4.94, p = 0.037, \eta^2 = 0.183$). Апостериорный анализ установил, что в группе участников эксперимента с низким уровнем МТ наблюдалась достоверная разница между правильными и неправильными ответами (Правильный > Неправильный,

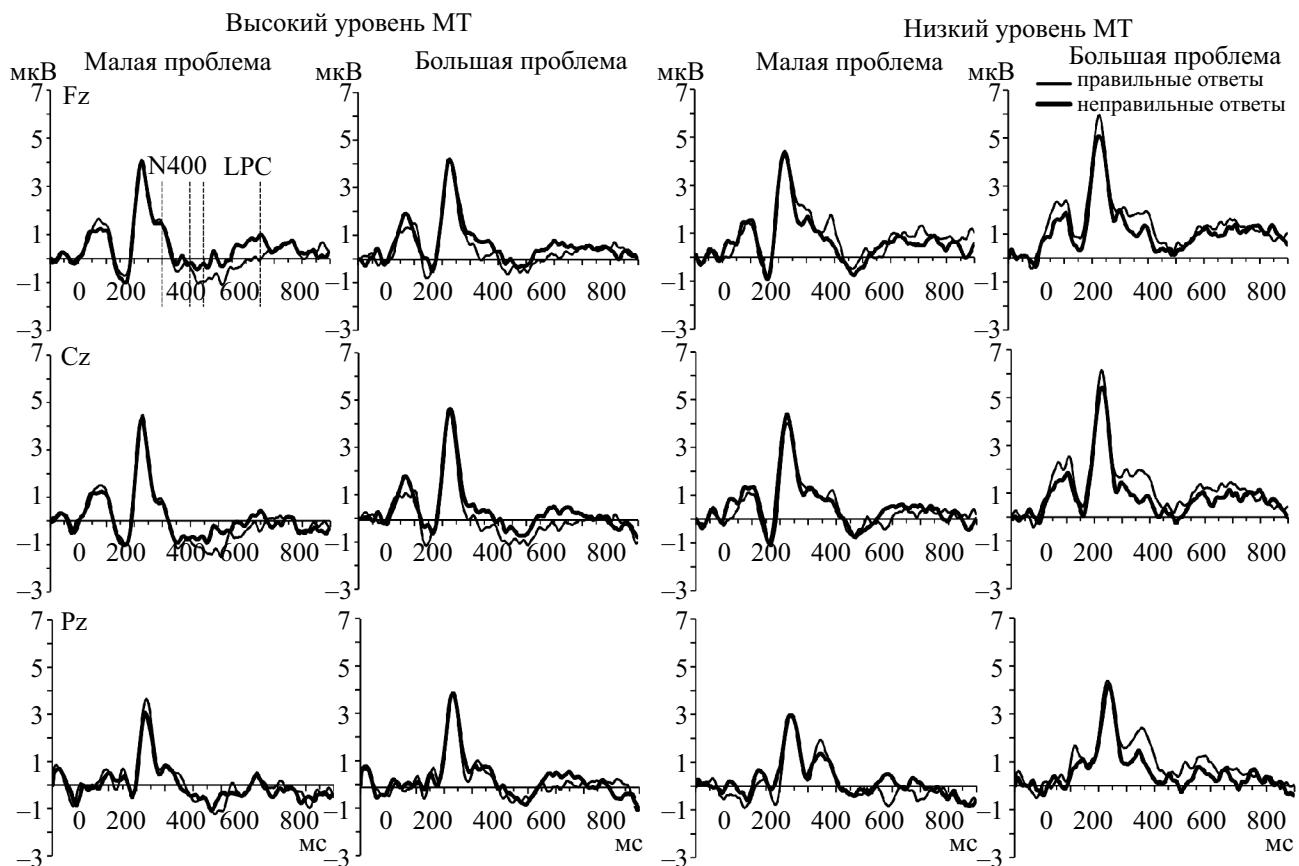


Рис. 2. Вызванные потенциалы при неосознаваемом восприятии стимулов. Тонкой линией отмечен ВП в ответ на предъявление правильных решений, толстой линией – ВП в ответ на предъявление неправильных решений. Представлены ВП для примеров малой и большой проблем для участников эксперимента с высоким (слева) и низким (справа) уровнем математической тревожности. Пунктирной линией показаны интервалы анализа основных компонент.

Fig. 2. Event related potentials (ERPs) during unconscious stimuli perception. The thin line shows ERPs in response to the correct solutions presentation, the thick line shows ERPs in response to the incorrect solutions presentation. The ERPs are shown for small and large problems for participants with high (left) and low (right) levels of mathematical anxiety. The dotted line shows the intervals of the ERPs components statistical analysis.

$p = 0.032$), что является отражением арифметического эффекта N400/P300 на исследуемом временном интервале. Кроме того, при предъявлении правильного ответа амплитуда ВП в группе участников эксперимента с низким уровнем МТ была больше по сравнению с участниками эксперимента с высоким уровнем МТ ($p = 0.015$). При предъявлении неправильного ответа разницы между двумя группами участников эксперимента не наблюдалось. Было обнаружено достоверное взаимодействие факторов «Латеральность» * «Группа» ($F(2, 44) = 4.574, p = 0.016, \eta^2 = 0.172$). Апостериорный анализ показал увеличение амплитуды ВП в правом полушарии по сравнению с медианными отведениями в группе участников эксперимента с низким уровнем МТ ($p = 0.04$).

Статистический анализ амплитуд ответа на интервале 450–650 мс от начала предъявления результата решения арифметического примера показал достоверное взаимодействие факторов «Тип ответа» * «Размер проблемы» * «Каудальность» * «Группа» ($F(2, 44) = 3.113, p = 0.087, \eta^2 = 0.124$). Апостериорный анализ показал, что в группе участников эксперимента с высоким уровнем МТ наблюдалась достоверная разница между правильными и неправильными ответами (Правильный < Неправильный, $p = 0.036$) при предъявлении примеров МП, что является отражением арифметического эффекта LPC на исследуемом временном интервале. При предъявлении правильного ответа амплитуда ВП в группе участников эксперимента с низким уровнем МТ была больше по сравнению с участниками эксперимента с высоким уровнем МТ в центральных ($p = 0.003$) и фронтальных отведениях ($p = 0.039$). Кроме того, в группе участников эксперимента с низким уровнем МТ наблюдалось достоверное увеличение амплитуды ВП при предъявлении правильных ответов на примеры БП по сравнению с МП в центральных ($p = 0.006$) и париетальных ($p = 0.002$) отведениях.

Результаты корреляционного анализа

Для того чтобы проанализировать возможные взаимодействия между параметрами ВП и показателями МТ, был проведен анализ корреляционной связи между результатами теста для оценки уровня МТ (sMARS) и средней амплитудой ВП в интервалах 300–400 мс и 450–650 мс (для правильных и неправильных ответов). Корреляционный анализ выявил, что показатели уровня МТ отрицательно коррелируют с амплитудой ВП на интервале 300–400 мс, возникающего в ответ на предъяжение правильных решений примеров МП, в отведениях F3 ($r(24) = -0.457, p = 0.025$), Fz ($r(24) = -0.559, p = 0.005$), F4 ($r(24) = -0.482, p = 0.017$), Cz ($r(24) = -0.539, p = 0.007$), C4 ($r(24) = -0.460, p = 0.024$) при осознаваемом предъявлении

стимулов и в отведениях F3 ($r(24) = -0.658, p < 0.001$), Fz ($r(24) = -0.629, p = 0.001$), F4 ($r(24) = -0.631, p = 0.001$), C3 ($r(24) = -0.493, p = 0.014$), Cz ($r(24) = -0.499, p = 0.013$), C4 ($r(24) = -0.461, p = 0.023$) при неосознаваемом предъявлении примеров БП обнаружена отрицательная корреляционная связь большой и средней силы между амплитудой ВП в ответ на предъявление правильных решений и оценкой уровня МТ в отведениях Fz ($r(24) = -0.548, p = 0.006$), F4 ($r(24) = -0.462, p = 0.023$), Cz ($r(24) = -0.437, p = 0.033$). При неосознаваемом предъявлении примеров БП, а также для неправильных ответов при осознаваемом и неосознаваемом предъявлении стимулов корреляционной связи между амплитудой ВП и оценкой уровня МТ обнаружено не было.

Корреляционный анализ амплитуд ВП на интервале 450–650 мс и показателя уровня МТ выявил отрицательную корреляционную связь между амплитудой ВП, возникающего в ответ на предъявление правильных решений примеров МП, в отведениях F3 ($r(24) = -0.408, p = 0.048$), Fz ($r(24) = -0.432, p = 0.035$), F4 ($r(24) = -0.456, p = 0.025$), Cz ($r(24) = -0.443, p = 0.003$) при осознаваемом предъявлении стимулов и в отведениях F3 ($r(24) = -0.473, p = 0.02$), F4 ($r(24) = -0.432, p = 0.035$) при неосознаваемом предъявлении стимулов. При предъявлении примеров БП обнаружена отрицательная корреляционная связь между амплитудой ВП в ответ на предъявление правильных решений и оценкой уровня МТ в отведениях F3 ($r(24) = -0.439, p = 0.032$), Fz ($r(24) = -0.441, p = 0.031$) при осознаваемом предъявлении стимулов и в отведении Cz ($r(24) = -0.413, p = 0.045$) при неосознаваемом предъявлении стимулов. Для неправильных ответов при осознаваемом и неосознаваемом предъявлении стимулов корреляционной связи между амплитудой ВП и оценкой уровня МТ обнаружено не было.

Обнаруженная корреляционная связь показывает, что по мере увеличения уровня математической тревожности наблюдается снижение амплитуды ВП, возникающего в ответ на предъявление правильных решений как при сознательном, так и при неосознаваемом предъявлении стимулов на интервале 300–400 и 450–650 мс от начала предъявления решения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В представленном исследовании изучались электрофизиологические показатели осознаваемых и неосознаваемых процессов при выполнении математических операций у участников эксперимента с высоким и низким уровнем МТ. В эксперименте

использовались арифметические примеры на сложение разной степени трудности и следующие за ними верные и неверные ответы. Стимулы предъявлялись в блоках с применением замаскированного и незамаскированного прайминга. Важно отметить, что применяемая в исследовании задача не требовала от участника эксперимента оценить правильность предъявляемого решения или классифицировать его (Jost et al., 2004), что позволило сделать задание одинаковым в обоих блоках эксперимента. Несколько нам известно, представленное исследование впервые демонстрирует результаты изучения обработки сложения однозначных чисел у лиц с высоким уровнем МТ в условиях неосознаваемого восприятия стимулов.

Арифметический эффект

По результатам электрофизиологических измерений были выявлены два значимых результата. Во-первых, было установлено, что в группе участников эксперимента с низким уровнем МТ при предъявлении примеров как в блоке на осознаваемое, так и в блоке на неосознаваемое восприятие наблюдается арифметический эффект на интервале от 300–400 мс (Prieto-Corona et al., 2010). Данный эффект выражается в большей амплитуде позитивной волны ВП при предъявлении правильного ответа по сравнению с предъявлением неправильного и при осознаваемом восприятии достоверно наблюдается во всех исследуемых отведениях. В группе более математически тревожных участников эксперимента арифметический эффект при осознаваемом восприятии наблюдается в значительно меньшей области (достоверные различия обнаружены только в отведениях C4 и P3), а при неосознаваемом восприятии не выявляется. Обнаруженные различия между группами участников эксперимента связаны, в первую очередь, с разницей в амплитуде ВП при предъявлении правильного ответа: у участников эксперимента с низким уровнем МТ наблюдается большая амплитуда ВП по сравнению с участниками эксперимента, имеющими высокий уровень МТ. Полученный результат подтверждается данными корреляционного анализа: уровень МТ имеет обратную корреляцию с амплитудой N400/P300 в ответ на предъяявление правильных ответов.

Предыдущие исследования показали, что в задаче арифметического прайминга в диапазоне от 200 до 600 мс возникает разница в амплитуде ВП при предъявлении верного и неверного результата решения арифметического примера. Данная разница интерпретируется разными исследователями как волна N400 в ответ на предъявление неверного решения (Kutas, Federmeier, 2011) и волна P300 в ответ на предъявление

верного решения (Riggins, Scott, 2020). Амплитуда волны N400/P300 отражает процесс автоматического распространения возбуждения в сетях долговременной памяти, приводящего к облегчению восприятия контекстно связанного целевого стимула (Kutas, Federmeier, 2011; Riggins, Scott, 2020). Таким образом, амплитуда этой волны непосредственно связана с прочностью ассоциативной связи «задача – ответ», которая зависит от сложности задания, степени развития арифметического навыка и является отражением используемой стратегии вычисления (Jost et al., 2011; Proverbio, Carminati, 2019). Например, у более квалифицированных участников эксперимента, чаще использующих стратегию извлечения результата из долговременной памяти, наблюдается более короткий латентный период пика волны P300, а также большая амплитуда для правильных ответов. Анализ корреляционной связи показал, что арифметический навык имеет прямую корреляцию с амплитудой P300 в ответ на предъявление правильных ответов и обратную – с амплитудой P300 в ответ на предъявление неправильных ответов (Proverbio, Carminati, 2019).

Установлено, что высокий уровень МТ негативно влияет на использование эффективных стратегий вычисления (Si et al., 2016). В частности, такие участники эксперимента реже используют стратегию извлечения результата из долговременной памяти (Imbo, Vandierendonck, 2007). При этом точность выполнения арифметических операций может соответствовать таковой у людей с низким уровнем МТ, приводя к расходованию большего числа ресурсов памяти и внимания (Suárez-Pellicioni et al., 2013). Таким образом, полученные в нашем исследовании результаты могут служить подтверждением, что участники эксперимента с высоким уровнем МТ, несмотря на отсутствие различий в арифметическом навыке по результатам тестирования, в основном больше полагаются на стратегию, основанную на проверке правдоподобности результатов или непосредственный счет, чем на припомнание арифметических фактов. Такие участники эксперимента, вероятно, имеют сниженные характеристики в части автоматического извлечения ответа напрямую из долговременной памяти, что отражается в меньшей выраженности арифметического эффекта N400/P300.

С другой стороны, участники эксперимента с низким уровнем МТ демонстрируют разницу в амплитуде ВП между верными и неверными решениями на интервале 200–300 мс даже при отсутствии активного внимания (при замаскированном предъявлении примеров). В предыдущих исследованиях арифметический эффект N400 при выполнении задачи неосознаваемого арифметического прайминга был зафиксирован только после предварительной тренировки, что

свидетельствует о более высокой активности долговременной памяти для той части информации, к которой недавно обращались (Полякова, Александров, 2019). Таким образом, полученный результат может свидетельствовать о наличии более прочных ассоциативных связей «задача – ответ» в группе участников эксперимента с низким уровнем МТ.

Вторым важным результатом, полученным в нашем исследовании, было обнаружение арифметического эффекта LPC на интервале 450–650 мс в группе участников эксперимента с высоким уровнем МТ в блоке на неосознаваемое восприятие. Волна LPC, возникающая после волны N400/P300 в парадигме арифметического прайминга, считается индексом соответствия стимула предшествующему контексту. Чем меньше предложенное неверное решение кажется участнику эксперимента правдоподобным, тем больше амплитуда волны LPC (Núñez-Peña и Suárez-Pellicioni, 2012).

Предыдущие исследования показали, что при решении примеров на сложение двузначных чисел участники эксперимента с высоким уровнем МТ показывают меньшую амплитуду LPC при предъявлении неправильных решений по сравнению с участниками эксперимента с низким уровнем МТ (Núñez-Peña, Suárez-Pellicioni, 2015). Предполагается, что неправильные решения кажутся более правдоподобными для людей с высоким уровнем МТ, что выражается в снижении амплитуды волны LPC в ответ на их предъявление (Núñez-Peña, Suárez-Pellicioni, 2015). Авторы связывают такое отличие между двумя группами с меньшей арифметической компетенцией участников эксперимента с высоким уровнем МТ, что повторяет результаты исследований, направленных на выявление связи волны LPC с арифметическим навыком (Núñez-Peña и Suárez-Pellicioni, 2012).

Выявленное в нашем исследовании наличие арифметического эффекта LPC при решении простых примеров у участников эксперимента с высоким уровнем МТ также может свидетельствовать об использовании такими участниками эксперимента менее эффективных стратегий вычисления. Так, например, было установлено, что арифметический эффект LPC у участников эксперимента с плохим арифметическим навыком появляется уже при решении простых примеров, а у более арифметически успешных участников эксперимента – только при решении сложных (Núñez-Peña et al., 2011). Предполагается, что участники эксперимента со слабым арифметическим навыком чаще используют процедурные стратегии при решении как сложных, так и простых примеров. Выраженность арифметического эффекта LPC также негативно коррелирует со степенью тренированности арифметического навыка, что связывают с облегчением извлечения ответа напрямую из долговременной памяти (Núñez-Peña, 2008).

Было установлено, что в задаче арифметического прайминга с примерами на сложение однозначных чисел участники эксперимента с высоким уровнем МТ демонстрируют увеличение позитивности и латентности волны LPC в ответ на предъявление неверных ответов с большим диапазоном девиации ошибки (Suárez-Pellicioni et al., 2013). Авторы предполагают, что участники эксперимента с высоким уровнем МТ вкладывают больше когнитивных ресурсов на обработку и тратят больше времени на оценку таких решений.

Таким образом, выявленное в нашей работе наличие арифметического эффекта LPC у участников эксперимента с высоким уровнем МТ может свидетельствовать об использовании процедурных стратегий при решении простых примеров. Это может быть следствием снижения использования автоматического извлечения ответа напрямую из долговременной памяти, выражаящимся в увеличении амплитуды негативности ВП при предъявлении правильных ответов и отсутствии арифметического эффекта волны N400/P300 в условиях неосознаваемого восприятия. Результатом такого рода изменений может стать повышение усилий и ресурсов обработки для решения даже простых арифметических примеров у участников эксперимента с высоким уровнем МТ.

Асимметрия распределения ответа

В нашем исследовании была обнаружена асимметрия распределения ответа при осознаваемом восприятии стимулов как на интервале 200–300 мс, так и на интервале 450–650 мс. В отведениях правого полушария наблюдается достоверное увеличение амплитуды позитивности ответа по сравнению с отведениями левого полушария как при предъявлении правильных, так и при предъявлении неправильных ответов в обеих группах участников эксперимента. С другой стороны, при неосознаваемом восприятии стимулов на интервале 200–300 мс увеличение амплитуды ВП в правом полушарии наблюдается только в группе участников эксперимента с низким уровнем МТ, а на интервале 450–650 мс достоверной асимметрии в распределении амплитуды ВП не обнаруживается.

Полученное распределение значений амплитуды согласуется с описанным в литературе. Данные, полученные с помощью различных методов нейровизуализации, указывают на мультимодальную семантическую систему, которая отражает, предположительно, не единичный статический источник активности, а, скорее, волну активности, которая возникает в задней половине левой верхней височной извилины в районе 250 мс, распространяясь сначала вперед и вентрально на левую височную долю к промежутку 365 мс, а затем

между 370–500 мс – к правой передней височной доле и к обеим лобным долям (Kutas, Federmeier, 2011). Таким образом, полученные нами данные подтверждают, что при неосознаваемом восприятии наблюдаемая активность выявляется только в группе с низким уровнем МТ.

Эффект трудности задания

Предъявление разных типов примеров позволило варьировать трудность задания: примеры, результатом вычисления которых является число меньше 10, были обозначены как простые, а примеры с результатом вычисления больше 10 – как сложные. Эффект трудности задания, или «эффект размера проблемы», обусловлен различными стратегиями решения примера в зависимости от частоты встречаемости той или иной задачи в опыте участника эксперимента. Более простые задачи с результатом вычисления меньше 10 встречаются чаще, что обуславливает использование для них более эффективной стратегии вычисления – извлечение результата из долговременной памяти (Imbo, Vandierendonck, 2007). С другой стороны, более трудные примеры чаще вычисляются посредством счета и перестановки, что приводит к увеличению времени обработки и числа ошибок (Dickson, Wicha, 2019).

В представленном исследовании при осознаваемом восприятии примеров эффект трудности задания выявлялся в обеих группах участников эксперимента: амплитуда ВП на интервалах 200–300 и 450–650 мс была достоверно больше при предъявлении примеров большой проблемы по сравнению с примерами малой проблемы. При неосознаваемом восприятии примеров увеличение амплитуды ВП при предъявлении правильных ответов на примеры БП по сравнению с МП наблюдалось в группе участников эксперимента с низким уровнем МТ. В группе участников эксперимента с высоким уровнем МТ влияния размера проблемы на параметры ВП обнаружено не было. Кроме того, было обнаружено, что уровень математической тревожности при осознаваемом восприятии примеров показывает отрицательную корреляционную связь с амплитудой ВП во фронтальных отведениях на интервале анализа волны N400\P300 для правильных ответов как для примеров МП, так и для примеров БП; при неосознаваемом восприятии такая корреляционная связь обнаруживается только для примеров МП. Таким образом, в отличие от примеров БП, автоматическая обработка примеров МП может происходить в условиях отсутствия активного внимания у участников эксперимента с низким уровнем МТ.

Данные, полученные в нашем предыдущем исследовании (Полякова, Александров, 2019) для примеров на умножение, подтверждают, что при

неосознаваемом восприятии стимулов эффект N400 можно достоверно обнаружить только после предварительной тренировки арифметического навыка (для задачи на умножение). Волны N400 часто связывают с процессами узнавания, которые могут усиливаться при повторном предъявлении стимулов (Kutas, Federmeier, 2011). Так как примеры МП чаще встречаются в повседневной жизни, ассоциативные связи «задача – ответ» для этой группы примеров должны иметь более высокие базовые состояния активности, что находит отражение в параметрах N400. Однако это верно только для участников эксперимента с низким уровнем МТ, в то время как группа участников эксперимента с высоким уровнем МТ не демонстрирует показателей автоматической обработки для простых примеров при неосознаваемом восприятии стимулов.

Существуют данные о том, что отрицательный эффект математической тревожности на результаты арифметических тестов и скорости вычисления может зависеть от трудности задания и проявляется только для сложных примеров (Wang, Liu, 2007). Люди с высоким уровнем МТ часто используют компенсаторные стратегии, такие как увеличение ментальных усилий и ресурсов обработки для достижения такого же уровня эффективности, как у людей с низким уровнем МТ (Eysenck, Derakshan, 2011). Было установлено, что дети с высоким уровнем МТ реже выбирают стратегии извлечения результата из долговременной памяти по сравнению с детьми с низкой тревожностью (Imbo, Vandierendonck, 2007). Таким образом, наши данные подтверждают, что, несмотря на отсутствие различий в эффективности решения примеров, участники эксперимента с высоким уровнем МТ, вероятно, реже используют процессы автоматической обработки при сниженном внимании, в отличие от участников эксперимента с высоким уровнем МТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теория дефицита контроля внимания у участников эксперимента с высоким уровнем МТ подразумевает повышенную восприимчивость таких участников эксперимента к отвлечению при выполнении числовых задач и необходимость задействовать повышенные ресурсы для такого же эффективного выполнения задания, как и у участников эксперимента с низким уровнем МТ. Выполнение задания в условиях замаскированного прайминга позволяет выявить особенности процессов категоризации стимулов при отсутствии произвольного внимания. Результаты, полученные в нашем исследовании, позволяют сделать вывод, что участники эксперимента с низким уровнем МТ извлекают результат решения по крайней мере простых примеров напрямую

из долговременной памяти даже в условиях неосознаваемого восприятия стимулов, в то время как участники эксперимента с высоким уровнем МТ демонстрируют нарушения этого процесса. Полученные данные подчеркивают особенности протекания процессов неосознаваемого восприятия, которые могут включать так называемые быстрые механизмы, не задействованные при сознательной деятельности (Иваницкий, 2019). Наличие арифметического эффекта волны LPC при неосознаваемом восприятии стимулов подтверждает преимущественное использование процедурных стратегий при решении простых примеров участниками эксперимента с высоким уровнем МТ.

ВКЛАД АВТОРОВ

Идея работы и планирование эксперимента – Александров А.А., Князева В.М., Полякова Н.В., разработка методики экспериментов – Александров А.А., Князева В.М., Полякова Н.В., Федоров Д.Г., сбор данных – Князева В.М., Полякова Н.В., Федоров Д.Г., Ситникова Д.Д., обработка данных – Князева В.М., Ситникова Д.Д., написание и редактирование манускрипта – Князева В.М., Александров А.А., Полякова Н.В., Федоров Д.Г., Ситникова Д.Д.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-78-01220, <https://rscf.ru/project/23-78-01220/>

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Протокол исследования одобрен Этическим комитетом Санкт-Петербургского психологического общества в области исследований с привлечением людей (протокол № 25 от 26.10.2023).

Каждый участник исследования подписал информированное согласие на участие в исследовании.

УКАЗАНИЕ НА ДОСТУПНОСТЬ ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ

Первичные данные могут быть предоставлены по запросу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Будакова А.В., Лиханов М.В., Блониевски Т., Малых С.Б., Ковас Ю.В. Математическая тревожность: этиология, развитие и связь с успешностью в математике. Вопросы психологии. 2020. 1: 109–118.

Полякова Н.В., Александров А.А. Использование компонента N400 для анализа математических вычислений на бессознательном уровне. Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2019. 69 (3): 325–333.

Иваницкий Г.А. Быстрая система обработки информации и осознание стимулов. Комментарий к статьям О.В. Щербаковой и Н.В. Поляковой с соавторами. Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2019. 69 (3): 339–342.

Alexander L., Martray C. The development of an abbreviated version of the Mathematics Anxiety Rating Scale. Meas. Eval. Couns. Dev. 1989. 22 (3): 143–150.

Ashcraft M.H., Kirk E.P. The relationships among working memory, math anxiety, and performance. J. Exp. Psychol. Gen. 2001. 130 (2): 224.

Ashcraft M.H., Kirk E.P., Hopko D. On the cognitive consequences of mathematics anxiety. The development of mathematical skills. Ed Donlan C. London: Psychology Press, 2022: 174–196 pp.

Blankenberger S. The arithmetic tie effect is mainly encoding-based. Cognition 2001. 82 (1): B15–B24.

Daker R.J., Gattas S.U., Sokolowski H.M., Green A.E., Lyons I.M. First-year students' math anxiety predicts STEM avoidance and underperformance throughout university, independently of math ability. Npj Sci. Learn. 2021. 6 (1): 17.

Derrfuss J., Brass M., Neumann J., von Cramon D.Y. Involvement of the inferior frontal junction in cognitive control: Meta-analyses of switching and Stroop studies. Hum. Brain Mapp. 2005. 25: 22–34.

Dickson D.S., Cerdá V.R., Beavers R.N., Ruiz A., Castañeda R., Wicha N.Y. When 2×4 is meaningful: The N400 and P300 reveal operand format effects in multiplication verification. Psychophysiology. 2018. 55 (11): e13212.

Dickson D.S., Wicha N.Y. P300 amplitude and latency reflect arithmetic skill: An ERP study of the problem size effect. Biol. Psychol. 2019. 148: 107745.

Domahs F., Domahs U., Schlesewsky M., Ratnckx E., Verguts T., Willmes K., Nuerk H.C. Neighborhood consistency in mental arithmetic: Behavioral and ERP evidence. Behav. Brain Funct. 2007. 3: 1–13.

Eysenck M.W., Derakshan N. New perspectives in attentional control theory. Pers. Individ. Dif. 2011. 50: 955–960.

Hartwright C.E., Looi C.Y., Sella F., Inuggi A., Santos F.H., González-Salinas C., García Santos J.M., Kadosh R.C., Fuentes L.J. The neurocognitive architecture of individual differences in math anxiety in typical children. Sci. Rep. 2018. 8 (1): 8500.

Huang W.J., Chen W.W., Zhang X. The neurophysiology of P300 – an integrated review. Eur. Rev. Med. Pharmacol. 2015. 19(8): 1480–1488.

Imbo I., Vandierendonck A. Practice effects on strategy selection and strategy efficiency in simple mental arithmetic. *Psychol. Res.* 2008. 72: 528–541.

Jasinski E.C., Coch D. ERPs across arithmetic operations in a delayed answer verification task. *Psychophysiology*. 2012. 49 (7): 943–958.

Jost K., Henninghausen E., Rösler E. Comparing arithmetic and semantic fact retrieval: effects of problem size and sentence constraint on event-related brain potentials. *Psychophysiology*. 2004. 41:46–59.

Jost K., Khader P.H., Burke M., Bien S., Rösler F. Frontal and parietal contributions to arithmetic fact retrieval: a parametric analysis of the problem-size effect. *Hum. Brain Mapp.* 2011. 32 (1): 51–59.

Kristjánsson Á., Ásgeirsson Á.G. Attentional priming: recent insights and current controversies. *Curr. Opin. Psychol.* 2019. 29: 71–75.

Kutas M., Federmeier K.D. Thirty years and counting: finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annu. Rev. Psychol.* 2011. 62: 621–647.

Lyons I.M., Beilock S.L. When math hurts: Math anxiety predicts pain network activation in anticipation of doing math. *PLoS ONE*. 2012. 7 (10): e48076.

Maloney E.A., Ansari D., Fugelsang J.A. The effect of mathematics anxiety on the processing of numerical magnitude. *Q. J. Exp. Psychol. (Hove)*. 2011. 64 (1): 10–16.

Núñez-Peña M.I. Effects of training on the arithmetic problem-size effect: An event-related potential study. *Exp. Brain Res.* 2008. 190 (1): 105–110.

Núñez-Peña M.I., Gracia-Bafalluy M., Tubau E. Individual differences in arithmetic skill reflected in event-related brain potentials. *Int. J. Psychophysiol.* 2011. 80 (2): 143–149.

Núñez-Peña M.I., Suárez-Pellicioni M. Processing false solutions in additions: differences between high -and lower-skilled arithmetic problem-solvers. *Exp. Brain. Res.* 2012. 218: 655–663.

Núñez-Peña M.I., Suárez-Pellicioni M. Processing of multi-digit additions in high math-anxious individuals: psychophysiological evidence. *Front Psychol.* 2015. 6: 1268.

Prieto-Corona B., Rodríguez-Camacho M., Silva-Pereyra J., Marosi E., Fernández T., Guerrero V. Event-related potentials findings differ between children and adults during arithmetic-fact retrieval. *Neurosci. Lett.* 2010. 468 (3): 220–224.

Proverbio A.M., Carminati M. Electrophysiological markers of poor versus superior math abilities in healthy individuals. *Eur. J. Neurosci.* 2019. 50 (2): 1878–1891.

Riggins T., Scott L.S. P300 development from infancy to adolescence. *Psychophysiology*. 2020. 57 (7): e13346.

Shakmaeva A. Math anxiety – When the emotional brain paralyzes the thinking brain. *Kwart Pedagogiczny*. 2022. 264 (2): 11–27.30.

Sowinski C., Dunbar K., Le Fevre J. Calculation fluency test (Unpublished technical report). 2014.

Strauss M., Dehaene S. Detection of arithmetic violations during sleep. *Sleep*. 2019. 42 (3): zsy232.

Suárez-Pellicioni M., Núñez-Peña M.I., Colomé À. Math anxiety: A review of its cognitive consequences, psychophysiological correlates, and brain bases. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 2016. 16: 3–22.

Sun J., Osth A.F., Feuerriegel D. The late positive event-related potential component is time locked to the decision in recognition memory tasks. *Cortex*. 2024. 176: 194–208.

Taghizadeh S., Hashemi T., Jahan A., Nazari M.A. The neural differences of arithmetic verification performance depend on math skill: Evidence from event-related potential. *Neuropsychopharmacology Reports*. 2021. 41 (1): 73–81.

Wang C., Liu C. Mathematics anxiety and its effect on mental arithmetic. *Adv. Psychol. Sci.* 2007. 15 (5): 795.

Wilson A.J., Revkin S.K., Cohen D., Cohen L., Dehaene S. An open trial assessment of “The Number Race”, an adaptive computer game for remediation of dyscalculia. *Behav. Brain. Funct.* 2006. 2: 1–16.

Young C.B., Wu S.S., Menon V. The neurodevelopmental basis of math anxiety. *Psychol. Sci.* 2012. 23 (5): 492–501.

Zhang J., Zhao N., Kong Q.P. The relationship between math anxiety and math performance: A meta-analytic investigation. *Front. Psychol.* 2019. 10: 1613.

INFLUENCE OF MATH ANXIETY ON THE PERFORMANCE OF ARITHMETIC OPERATIONS AT UNCONSCIOUS LEVEL

V. M. Knyazeva[#], N. V. Polyakova, D. G. Fedorov, D. D. Sitnikova, A. A. Aleksandrov

St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
[#]*e-mail: v.m.knyazeva@spbu.ru*

Math anxiety (MA) is associated with concern and fear about mathematical tasks. The aim of the study was to investigate the electrophysiological correlates of conscious and unconscious processes during the performance of mathematical operations depending on the level of mathematical anxiety. Participants

were presented with addition problems followed by correct and incorrect answers. Participants with low level of MA demonstrated significantly more positive amplitude of event-related potentials when presented with the correct answer compared to the incorrect one in the interval from 200–300 ms after the solution presentation onset (N400/P300 wave), both in the conscious (unmasked presentation) and unconscious perception blocks (masked presentation). In the group of participants with high level of MA, such a difference was observed only in the conscious perception condition. Additionally, participants with high level of MA showed a significant difference between correct and incorrect answers in the interval from 450–650 ms during unconscious perception of problems, indicating the presence of an arithmetic effect in the late positive component (LPC) wave. Thus, the obtained results may indicate the predominant use of procedural strategies when solving simple problems by participants with a high level of MA. Participants with a low level of MA demonstrate correlates of automatic retrieval of the answer directly from long-term memory even with unconscious perception of stimuli.

Keywords: math anxiety, arithmetic, N400, P300, late positive component, attention, masked priming, unconscious perception, arithmetic verification task