
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

ОСОЗНАВАЕМЫЕ И НЕОСОЗНАВАЕМЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗАДАЧЕ
АРИФМЕТИЧЕСКОГО ПРАЙМИНГА ЗАВИСЯТ ОТ УРОВНЯ
АРИФМЕТИЧЕСКОГО НАВЫКА

© 2024 г. В. М. Князева^{1,*}, Н. В. Полякова¹, Д. Г. Федоров¹, Д. Д. Ситникова¹,
А. А. Александров¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

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

Поступила в редакцию 13.12.2023 г.

После доработки 06.02.2024 г.

Принята к публикации 06.02.2024 г.

В исследовании изучался вклад осознанных и неосознанных процессов в задаче арифметического прайминга в зависимости от уровня арифметического навыка испытуемых. Испытуемые были разделены на две группы по степени сформированности навыка на основании результатов теста на скорость и точность арифметических вычислений. Во время эксперимента на экране монитора предъявлялись замаскированные и незамаскированные примеры на сложение однозначных чисел (праймы) и следующие за ними правильные и неправильные ответы. В задаче осознанного восприятия (незамаскированный прайминг) при предъявлении ответа на примеры большой и малой проблем (результатом сложения операндов является число больше или меньше 10 соответственно) наблюдалось возникновение арифметического эффекта N400 и поздней позитивной волны (LPC) в обеих группах испытуемых. В случае неосознанного восприятия (замаскированный прайминг) при предъявлении ответа на примеры малой проблемы арифметический эффект LPC появлялся в группе испытуемых со слабым арифметическим навыком. Таким образом, арифметический эффект LPC может являться индикатором процессов кодирования и извлечения информации, которые связаны с уровнем арифметического навыка испытуемых. Обнаружение арифметического эффекта LPC при неосознанном предъявлении примеров может свидетельствовать о независимом от активного внимания характере этих процессов.

Ключевые слова: арифметика, замаскированный прайминг, неосознанное восприятие, сложение, вызванные потенциалы, N400, поздняя позитивная волна (LPC)

DOI: 10.31857/S0869813924080135, EDN: CMZZHA

ВВЕДЕНИЕ

Базовая арифметика, то есть умение складывать, вычитать, умножать и делить целые числа – это основной навык, который приобретается на ранних этапах обучения и играет ключевую роль в развитии математических способностей. Разница в успешности освоения математического навыка определяется индивидуальными различиями на нейрональном и поведенческом уровнях, что наблюдается как у детей, так и у взрослых

испытываемых [1, 2]. При решении арифметических задач с целыми числами используются две основные стратегии: извлечение результата из долговременной памяти и последовательное вычисление. Выбор той или иной стратегии зависит от сложности задачи, арифметических способностей испытуемого и напрямую влияет на скорость вычислений и количество совершенных ошибок. Тот факт, что взрослые испытуемые массово сообщают об использовании стратегии извлечения результата из памяти для примеров с суммой слагаемых меньше 10 [3], может свидетельствовать о том, что простые арифметические операции уже автоматизированы и больше не находятся под сознательным контролем. С другой стороны, несмотря на то, что в литературе существует консенсус в отношении того, что дети в возрасте старше 10 лет извлекают результаты простых задач на сложение из долговременной памяти, имеются данные, что дети [4] и взрослые [5] по-прежнему полагаются на процедуры счета для решения простых задач.

Исследования реакции мозга на примеры разной степени сложности выявили изменения электрофизиологической активности как во время процесса вычисления [6, 7], так и во время проверки ответа [8–10]. Задача на проверку правильности ответа позволяет оценить точность поиска решения, а также выявить различия в используемой вычислительной стратегии в зависимости от индивидуального уровня арифметического навыка. Электрофизиологическими показателями реакции мозга на предъявление результата решения арифметического примера служит генерация двух компонент вызванного потенциала (ВП) – волны N400 и следующей за ней поздней позитивной волны (late positive component, LPC), амплитуды которых увеличиваются при предъявлении ошибочного результата. Возникающая разница в амплитуде ВП, регистрируемого в ответ на предъявление верного и ошибочного результата, носит название арифметического эффекта волны N400 и волны LPC. Эту разницу принято связывать с активацией механизмов памяти [8, 9, 11].

Существуют данные, что нейронные системы, задействованные в обработке семантических и арифметических элементов, не обязательно идентичны, но имеют определенное функциональное сходство [12, 13]. Задача проверки правильности ответа является аналогом задачи семантического прайминга (т. н. «эффект предшествования») и приводит к ускорению реакции на целевой стимул с помощью связанного с контекстом предшествующего стимула (прайма) [14]. Существуют две гипотезы о возможных когнитивных механизмах, лежащих в основе эффекта прайминга: сознательная обработка стимула и неосознаваемое автоматическое распространение активации на связанные области семантической сети [15]. Согласно первой из предложенных гипотез, эффект прайминга является результатом сознательно контролируемых процессов, таких как семантическое сопоставление или семантическое ожидание, и зависит от ресурсов внимания [14]. Вторая гипотеза предполагает, что предъявление прайма активирует соответствующие концептуальные представления в семантической сети, и активация распространяется на семантически связанные узлы, тем самым повышая уровень их активации, что облегчает узнавание контекстно связанных стимулов. Предполагается, что автоматическое распространение активации не зависит от ограниченных возможностей процессов внимания [15].

Для исследования возможных механизмов осознаваемых и неосознаваемых процессов широкое применение нашла парадигма замаскированного прайминга [16], в которой сознательное восприятие контекста нарушается путем предъявления после прайма так называемой “маски” (например, случайная последовательность букв или символов). В такого рода исследованиях участники обычно не могут сообщить, что видели прайм или опознать его после эксперимента. Электрофизиологические и поведенческие результаты, получаемые в задаче замаскированного прайминга, в целом повторяют данные, полученные в задачах с осознаваемым восприятием прайма, хотя они обычно несколько менее выражены [16]. Таким образом, считается, что полученные результаты свидетельствуют о наличии автоматических процессов при распознавании стимулов.

Поведенческие исследования с использованием замаскированного прайминга в арифметической задаче проверки ответа свидетельствуют о том, что человек способен неосознаваемо выполнять такие арифметические вычисления с однозначными целыми числами, как умножение, сложение и вычисление среднего [17–19]. Было установлено, что время реакции на предъявление целевых чисел уменьшается в случае предъявления перед ними замаскированного примера, результат вычисления которого совпадает по значению с целевым числом.

С другой стороны, электрофизиологические исследования процессов неосознаваемого арифметического прайминга крайне немногочисленны. В настоящее время нам известны только два исследования, посвященные изучению нейрофизиологических механизмов неосознаваемого восприятия арифметических примеров. В исследовании Strauss и Dehaene [20] испытуемым, находящимся в состоянии сна, предъявляли аудиозапись, состоящую из арифметических примеров и следующих за ними правильных или неправильных ответов. Во время эксперимента использовалась одновременная регистрация электро- и магнитоэнцефалограммы (МЭГ). В результате было обнаружено достоверное влияние правильности ответа на параметры ВП в интервале 316–640 мс, но только для данных МЭГ. Аналогичный эксперимент был повторно проведен на испытуемых, находящихся в состоянии бодрствования со смещенным вниманием: участникам исследования предъявлялись аудиостимулы и давалась посторонняя задача на определение тона голоса. В эксперименте со смещенным вниманием влияние правильности ответа на параметры ВП было обнаружено в интервале с сильно увеличенной латентностью – от 524 до 712 мс, однако также только для данных МЭГ. Таким образом, полученные результаты позволили авторам предположить, что доступ к арифметическим фактам, хранящимся в долговременной памяти, возможен и без участия сознания.

В исследовании 2019 г. [21] было продемонстрировано наличие эффекта N400 при замаскированном предъявлении табличных примеров на умножение. Испытуемым предъявлялся замаскированный пример на умножение, состоящий из двух однозначных чисел, и следующий за ним правильный или неправильный ответ. Эксперимент состоял из трех блоков – два блока замаскированного прайминга, между которыми был осознаваемый блок без маскировки прайма. Эффект N400 был обнаружен только для второго неосознаваемого блока. Кроме того, был проведен аналогичный эксперимент, в котором испытуемые накануне вечером до эксперимента в течение 10 мин повторяли таблицу умножения, в результате чего эффект N400 стал обнаруживаться в обоих неосознаваемых блоках. Таким образом, эта работа служит подтверждением возможности бессознательных арифметических операций, в данном случае умножения.

Принимая во внимание различные стратегии решения арифметических примеров разной степени сложности и их зависимость от индивидуальных арифметических способностей, а также свидетельства того, что человек способен бессознательно применять правила арифметического вычисления для таких операций как умножение, сложение и нахождение среднего, можно предположить, что различия в электрофизиологических показателях в зависимости от индивидуальных арифметических способностей существуют в том числе и при выполнении задачи замаскированного арифметического прайминга. Таким образом, целью настоящего исследования явилось изучение особенностей электрофизиологических показателей осознаваемых и неосознаваемых процессов в зависимости от индивидуальных арифметических способностей испытуемых.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Испытуемые. В исследовании приняли участие 26 человек (12 мужчин и 14 женщин). Средний возраст испытуемых составил 21.4 ± 1.8 лет, коэффициент моторной асимметрии по результатам эдинбургского тестирования 65.6 ± 18.1 . По результатам опроса у всех испытуемых была нормальная или скорректированная до нормы острота

зрения, нормальный слух, никто из испытуемых не сообщил о наличии неврологических заболеваний в анамнезе за последние три года. Два испытуемых были исключены из последующего анализа из-за большого числа артефактов при записи электроэнцефалограммы (ЭЭГ).

Для оценки уровня арифметического навыка был использован тест на скорость и точность арифметических вычислений [22], который включал три блока с примерами на сложение, вычитание и умножение двузначных чисел. Средние значения теста по всем блокам составили 30.54 ± 11.40 баллов (при шкале от 0 до 180). Так как парадигма нашего эксперимента включала только примеры на сложение, было решено разделить испытуемых на группы по уровню арифметического навыка на основании результатов блока с примерами на сложение. Средние значения теста по блоку с примерами на сложение составили 13.71 ± 4.73 баллов (при шкале от 0 до 60). Испытуемые с результатом ниже среднего значения были отнесены к группе со слабым арифметическим навыком, с результатом выше – к группе с сильным арифметическим навыком (каждая группа включала 12 человек).

Парадигма. В задаче арифметического прайминга испытуемым предъявлялись два экспериментальных блока: блок с осознаваемым восприятием прайма всегда предшествовал блоку с неосознаваемым восприятием [21]. Временная последовательность предъявления стимулов в блоках с осознаваемым и неосознаваемым восприятием стимулов представлена на рис. 1.

Во время исследования испытуемый 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 располагались в центре экрана (частота обновления 60 Гц). Стимулы предъявлялись с помощью программы Presentation (Neurobehavioral Systems Inc., Олбани, Калифорния, США).

В качестве праймов предъявлялись арифметические примеры на сложение, состоящие из двух однозначных чисел и знака сложения между ними (например, $3 + 2$). Для оценки фактора трудности задания примеры, результатом сложения операндов которых является число меньше 10, были обозначены как простые (32 примера, т. н. «малая проблема»), МП), а примеры с результатом вычисления больше 10 – как сложные (32 примера, т. н. «большая проблема», БП) [23]. Были исключены примеры с одинаковыми слагаемыми (например, $2 + 2$) и примеры с ответом, равным 10 [24]. В каждом блоке демонстрировалось три сегмента по 64 примера: 32 малые проблемы и 32 большие проблемы, всего 384 примера в каждом. Длительность сегмента составляла около 4 мин, между сегментами давалось время для отдыха. Каждая последовательность стимулов начиналась с предъявления пустого экрана на 200 мс, после чего демонстрировался арифметический пример (прайм) длительностью 32 мс [17, 19, 21]. Через 468 мс после предъявления примера демонстрировался результат его вычисления, который мог быть верным или неверным с вероятностью 50%. Величина ошибки для неверных ответов генерировалась случайно и составляла $\pm 1-3$. В блоке с неосознаваемым восприятием сразу после появления примера предъявлялась маска (96 мс) в виде набора символов “&@&”, после чего через 372 мс показывался результат вычисления примера. Значения длительности предъявления стимулов и синхронизация предъявления с кадровой разверткой оценивались с использованием датчика яркости светового потока OPT101 (Texas Instruments, США). После эксперимента все испытуемые заявили, что не замечали цифр и знака сложения перед маской.

Главное отличие нашей задачи от применяемой в других исследованиях состояло в том, что испытуемые должны были решить пример до предъявления ответа, но не оценивать правильность предъявляемого решения или классифицировать его [25]. После осознаваемого блока проводился опрос, где испытуемых просили оценить, сколько примеров в процентном соотношении было успешно решено до предъявления ответа и/или одновременно с его появлением. В неосознаваемом блоке для под-

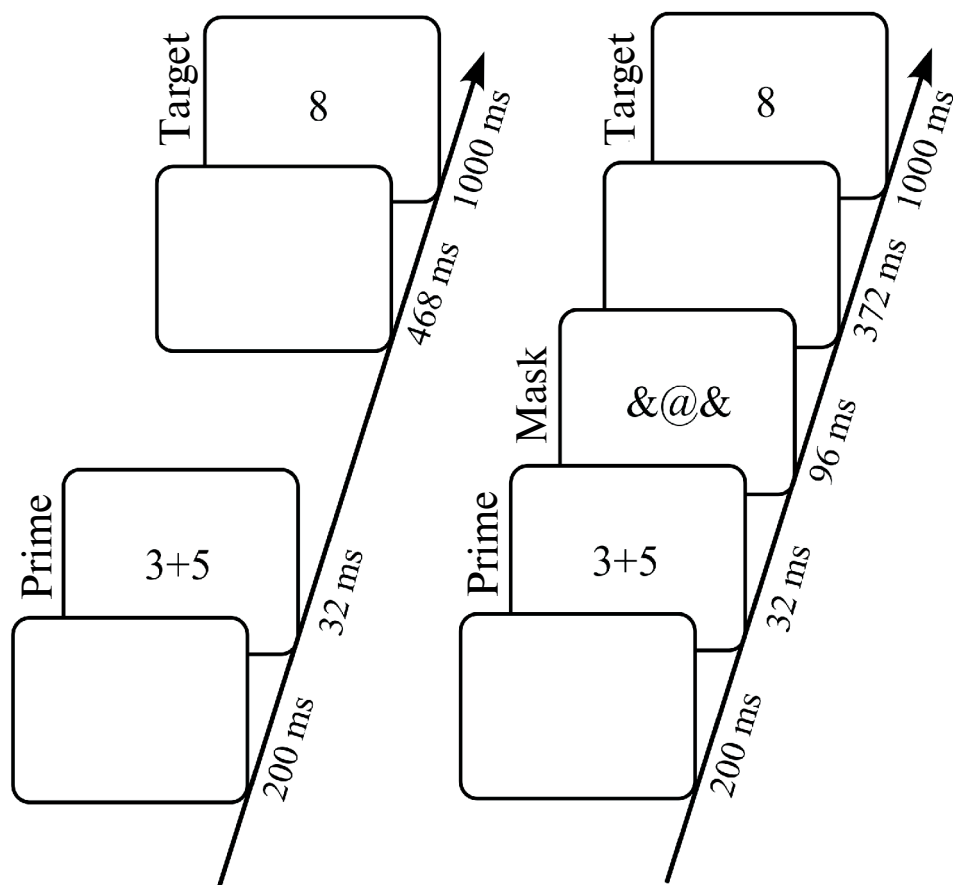


Рис. 1. Временная последовательность предъявления стимулов в блоках с осознаваемым (слева) и неосознаваемым (справа) восприятием стимулов.

держания внимания предъявлялось двенадцать примеров на сложение без маскировки с последующим правильным ответом. Во время предъявления стимулов испытуемый должен был внимательно смотреть на экран и при появлении примера сложить предъявляемые числа до появления ответа. Испытуемому не сообщалось, что перед маской также предъявлялись примеры. После этого блока задавались те же вопросы, что и в блоке с осознаваемым восприятием стимулов, а также уточнялось, что в маскируемых примерах испытуемый видел только маску. Таким образом, мы старались свести к минимуму интерференцию когнитивных и моторных процессов, которая наблюдалась при решении задачи классификации [26]. Кроме того, отсутствие моторного ответа обеспечило совпадение задач в осознаваемом и неосознаваемом блоках.

В ходе эксперимента регистрировалась 31-канальная ЭЭГ с помощью электроэнцефалографа “Мицар-ЭЭГ-202” и пакета программного обеспечения WinEEG (ООО Мицар, Санкт-Петербург, Россия). В качестве референта использовался объединенный ушной электрод, заземляющий электрод располагался на лбу. Сопротивление электродов не превышало 10 кОм. Сигнал оцифровывался с частотой дискретизации 500 Гц

и полосой пропускания 0.53–30 Гц. Предварительная обработка ЭЭГ представляла собой удаление глазодвигательных артефактов методом независимых компонент, а также удаление артефактов, превышающих по амплитуде 100 мкВ.

Статистическая обработка результатов. По завершении предварительной обработки записей ЭЭГ проводился расчет индивидуальных вызванных потенциалов (ВП), а затем усредненных ВП для двух групп испытуемых. По кривой ВП, усредненной для всех отведений, типов стимулов и групп испытуемых (grand-grand average), а также на основании данных литературы [9, 27] были идентифицированы основные компоненты ВП и интервалы для их статистического анализа. Анализ амплитуды компонента N400 проводился в пределах временного окна 300–350 мс (пик 325 мс), компонента LPC – в пределах 450–550 мс.

Для статистического анализа были выбраны 9 отведений: F_3 , F_z , F_4 , C_3 , C_z , C_4 , P_3 , P_z , P_4 . 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 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: сильные арифметические способности и слабые арифметические способности). Тест Шапиро – Уилка не обнаружил значимого отклонения распределения значений от нормального. В случае значимого отклонения от предположения о сферичности, оцениваемого с помощью критерия Моучли, применялась поправка статистики F-критерия по методу Гринхауса – Гейссера. Апостериорный анализ проводился с помощью метода парных сравнений с коррекцией Бонферони.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ компонента N400. При анализе компонента N400 в осознаваемом блоке (рис. 2) обнаружено достоверное влияние факторов «Тип ответа» ($F_{(1, 22)}^{(1, 22)} = 11.826$, $p = 0.002$, $\eta^2 = 0.350$) и «Размер проблемы» ($F_{(1, 22)}^{(1, 22)} = 33.998$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.607$), что позволяет говорить об увеличении негативности волны N400 в рассматриваемом диапазоне при предъявлении неправильного ответа, а также о достоверно более положительной амплитуде ВП при предъявлении примеров БП.

Наблюдается асимметрия в распределении амплитуд ВП на исследуемом интервале, что показано на топографических картах распределения электрической активности (рис. 3). Обнаружено значимое взаимодействие факторов «Размер проблемы» х «Латерализация» ($F_{(1.55, 34.218)}^{(1.55, 34.218)} = 4.029$, $p = 0.036$, $\eta^2 = 0.155$): при демонстрации задачи МП амплитуда N400 в отведениях правого полушария достоверно менее негативная по сравнению с ответом, который регистрируется в центральных отведениях ($p = 0.003$) и в отведениях левого полушария ($p = 0.002$). В случае с задачей БП такое же снижение негативности амплитуды в отведениях правого полушария наблюдается по сравнению с отведениями, расположенными в левом полушарии ($p = 0.037$). Кроме того, наблюдается разница в распределении ответа в росто-каудальном направлении («Каудальность» х «Латерализация», $F_{(2.525, 55.544)}^{(2.525, 55.544)} = 22.367$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.504$) с достоверно более негативной амплитудой в отведении P_z по сравнению с C_z ($p = 0.004$) и F_z ($p = 0.028$).

Анализ компонента N400 при неосознаваемом восприятии стимулов (рис. 4) выявил достоверное взаимодействие факторов «Размер проблемы» х «Каудальность» х «Латерализация» ($F_{(3.342, 73.533)}^{(3.342, 73.533)} = 2.937$, $p = 0.034$, $\eta^2 = 0.118$). Апостериорный анализ показал, что при предъявлении ответов на примеры МП наблюдается достоверно менее негативная амплитуда в отведении F_z по сравнению с отведениями F_3 ($p = 0.001$)

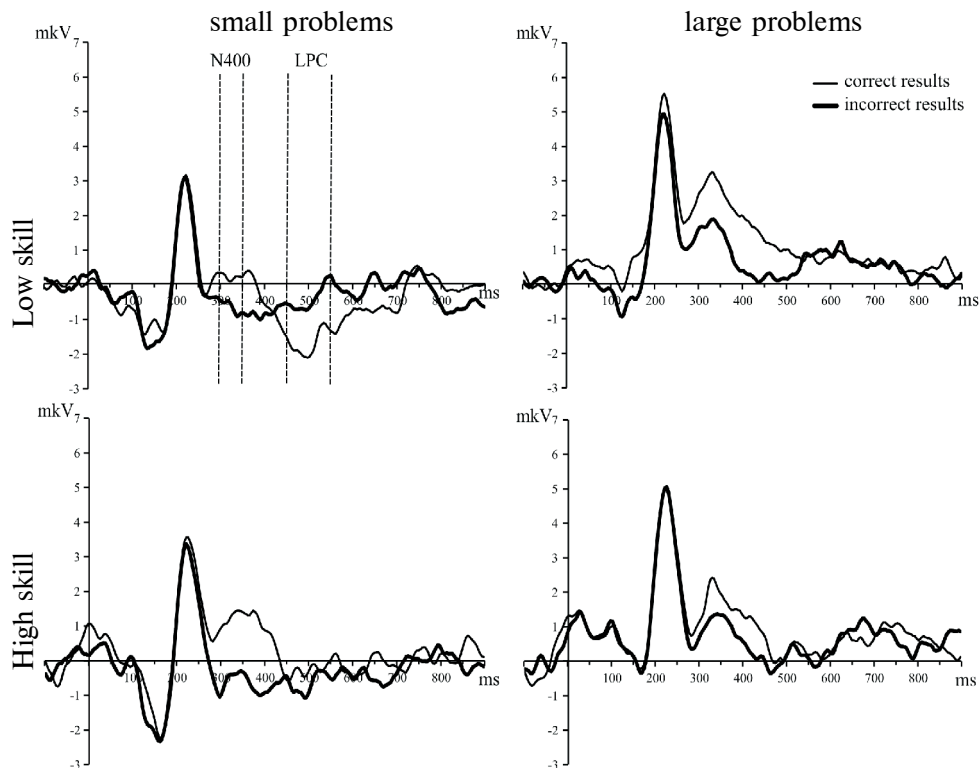


Рис. 2. Вызванные потенциалы в ответ на предъявление правильных (тонкая линия) и неправильных (толстая линия) решений, зарегистрированные в отведении Cz в блоке осознаваемого восприятия стимулов для примеров МП (слева) и БП (справа) для испытуемых с сильным (внизу) и слабым (вверху) арифметическим навыком. Пунктирной линией показаны интервалы анализа основных компонент.

и F_4 ($p = 0.004$), а также более негативная амплитуда ответа в отведении Pz по сравнению с отведениями P_3 ($p < 0.001$) и P_4 ($p = 0.003$).

В левом и правом полушарии при предъявлении ответов на примеры МП также наблюдалась менее негативная амплитуда ответа в парietальных отведениях по сравнению с медианными (P_3/C_3 : $p < 0.001$; P_4/C_4 : $p < 0.001$) и фронтальными (P_3/F_3 : $p = 0.023$; P_4/F_4 : $p = 0.005$). При предъявлении ответов на примеры БП во фронтальных и теменных отведениях обнаруживалась достоверная разница в амплитуде ответа между центральными отведениями и отведениями левого и правого полушария ($Fz > F_3$: $p < 0.001$; $P_3 > Pz$: $p = 0.008$; $P_4 > Pz$: $p = 0.003$). В левом и правом полушариях при предъявлении ответов на примеры БП также наблюдалась менее негативная амплитуда ответа в парietальных отведениях по сравнению с медианными (P_3/C_3 : $p < 0.001$; P_4/C_4 : $p < 0.001$) и фронтальными (P_3/F_3 : $p = 0.013$; P_4/F_4 : $p = 0.006$).

Анализ компонента LPC. Результаты дисперсионного анализа компонента LPC при осознанном восприятии стимулов (рис. 2) выявили достоверное влияние фактора «Размер проблемы» ($F_{(1, 22)} = 9.686$, $p = 0.005$, $\eta^2 = 0.306$), а также взаимодействие факторов «Тип ответа» х «Размер проблемы» х «Группа» ($F_{(1, 22)} = 5.117$, $p = 0.033$, $\eta^2 = 0.190$). Апостериорный анализ показал значимо более положительную амплитуду LPC при предъявлении неправильного ответа на примеры МП в группе испытуемых

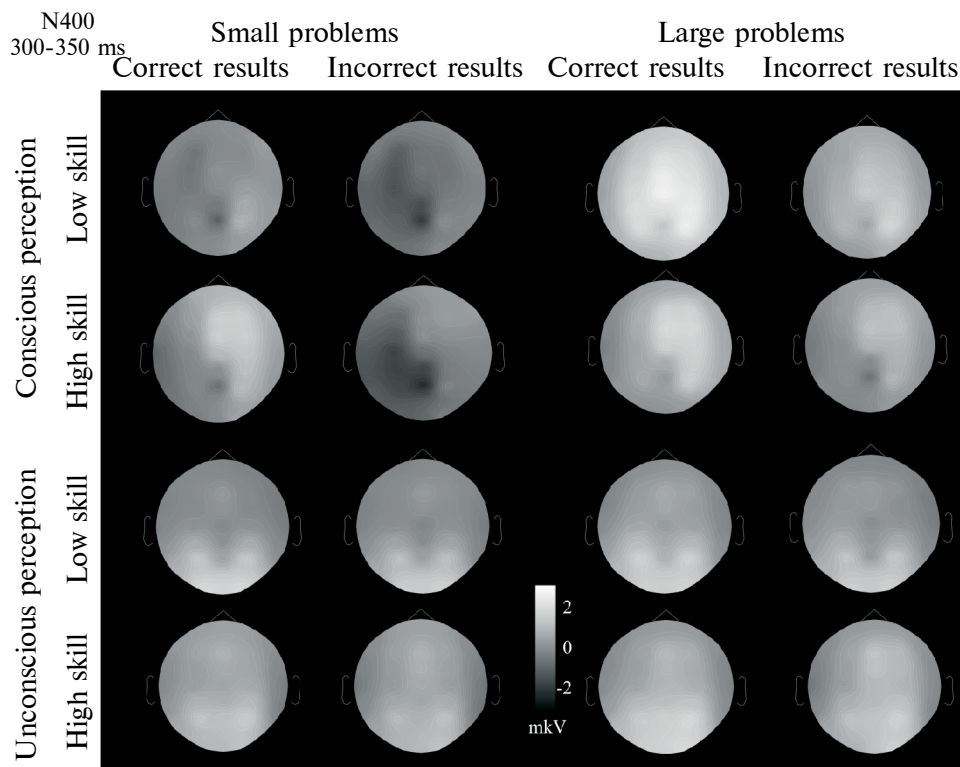


Рис. 3. Топографические карты распределения электрической активности для испытуемых с сильным и слабым арифметическим навыком в окне 300–350 мс от начала предъявления результата решения арифметического примера.

со слабым арифметическим навыком ($p = 0.037$). Кроме того, в группе испытуемых со слабым арифметическим навыком амплитуда ВП в ответ на предъявление правильного ответа на примеры БП была достоверно более положительной по сравнению с примерами МП ($p < 0.001$).

Дисперсионный анализ также выявил значимое взаимодействие факторов «Размер проблемы» х «Латерализация» ($F_{(1.768, 38.906)} = 7.398, p = 0.003, \eta^2 = 0.252$) и «Каудальность» х «Латерализация» ($F_{(3.300, 72.592)} = 22.367, p < 0.001, \eta^2 = 0.451$). Апостериорный анализ показал наличие асимметрии ответа: при предъявлении ответов на примеры МП амплитуда ВП была достоверно менее положительной в отведениях левого полушария по сравнению с отведениями, расположенными в правом полушарии ($p = 0.032$). Кроме того, обнаруживается снижение амплитуды в отведениях Pz по сравнению с отведениями Cz ($p = 0.002$) и Fz ($p = 0.011$). Топографические карты распределения электрической активности на исследуемом интервале представлены на рис. 5.

Анализ компонента LPC при неосознаваемом восприятии стимулов (рис. 4) выявил достоверное взаимодействие факторов «Тип ответа» х «Размер проблемы» х «Группа» ($F_{(1, 22)} = 6.953, p = 0.015, \eta^2 = 0.240$). Апостериорный анализ показал значимо более положительную амплитуду LPC при предъявлении неправильного ответа на примеры МП в группе испытуемых со слабым арифметическим навыком ($p = 0.033$). В группе испытуемых со слабым арифметическим навыком амплитуда ВП в ответ на

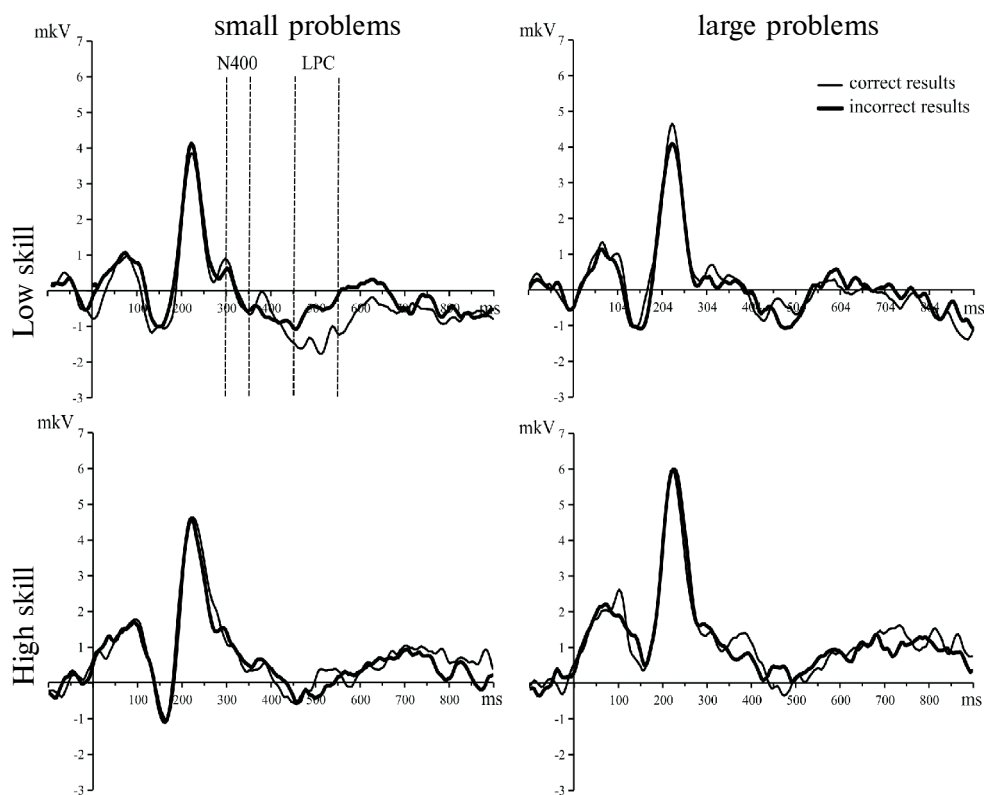


Рис. 4. Вызванные потенциалы в ответ на предъявление правильных (тонкая линия) и неправильных (толстая линия) решений, зарегистрированные в отведении Cz в блоке неосознаваемого восприятия стимулов для примеров МП (слева) и БП (справа) для испытуемых с сильным (внизу) и слабым (вверху) арифметическим навыком. Пунктирной линией показаны интервалы анализа основных компонент.

предъявление правильного ответа на примеры БП была достоверно больше по сравнению с примерами МП ($p = 0.008$), а также наблюдалось снижение амплитуды ВП при предъявлении правильных ответов на примеры МП в группе испытуемых со слабым арифметическим навыком по сравнению с испытуемыми с сильным арифметическим навыком ($p = 0.017$).

Выявлено взаимодействие факторов «Каудальность» $\times$ «Латерализация» ($F_{(2.783, 61.235)} = 10.318, p < 0.001, \eta^2 = 0.319$). Результаты дальнейшего анализа показали, что в теменных отведениях наблюдается достоверно большая амплитуда ответа в левом полушарии по сравнению с центральными отведениями ($P_3/P_z: p = 0.016$), а в медианных и фронтальных отведениях амплитуда ответа в центральных отведениях больше, чем в левом ($F_z/F_3: p = 0.005$) и правом ($C_z/C_4: p = 0.003; F_z/F_4: p = 0.002$) полушариях.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Цель нашего исследования заключалась в изучении осознаваемых (контролируемых) и неосознаваемых (рефлекторных) процессов в задаче арифметического прайминга в зависимости от уровня арифметического навыка испытуемых. Арифметические

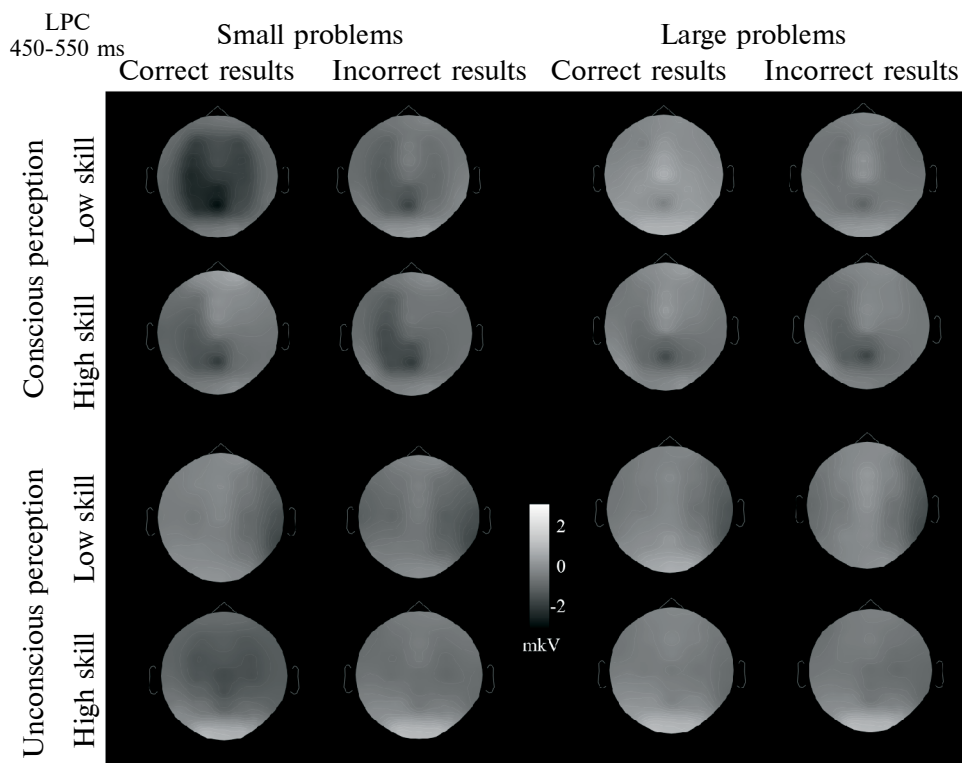


Рис. 5. Топографические карты распределения электрической активности для испытуемых с сильным и слабым арифметическим навыком в окне 450–550 мс от начала предъявления результата решения арифметического примера.

примеры на сложение предъявлялись в условиях замаскированного и незамаскированного прайминга. В задаче осознанного восприятия (незамаскированный прайминг) при предъявлении ответа на примеры БП и МП наблюдалось возникновение арифметического эффекта N400 и LPC в обеих группах испытуемых. В случае неосознанного восприятия (замаскированный прайминг) при предъявлении ответа на примеры МП наблюдалось появление арифметического эффекта LPC в группе испытуемых со слабым арифметическим навыком.

На интервале 300–350 мс от начала предъявления стимула, вне зависимости от уровня арифметического навыка, наблюдалась более негативная амплитуда вызванного потенциала при предъявлении неправильного ответа, что является свидетельством возникновения арифметического эффекта волны N400. Такой вывод согласуется со множеством литературных данных [8, 9, 27], в которых арифметический эффект N400 был зарегистрирован в интервале от 250 до 500 мс. Полученное распределение значений амплитуды N400 согласуется с полученными ранее данными: компонент N400 имеет асимметричное распределение с увеличением амплитуды в правой полушарии [27]. Кроме того, установлено влияние фактора трудности задания: в обеих группах испытуемых амплитуды ВП в интервале анализа волны N400 при решении примеров БП оказались больше, чем для МП. Это может отражать так называемый «эффект величины операндов», который заключается в увеличении времени обработки и числа

ошибок при увеличении размера операндов, участвующих в задаче. Этот эффект подробно описан в литературе как в поведенческих [28], так и в электрофизиологических исследованиях [29]. Считается, что эффект величины операндов обусловлен различными стратегиями решения примера. Для небольших задач намного чаще используется стратегия извлечения результата решения примера из памяти, чем непосредственно счет. Первая стратегия более эффективна, чем вторая, что приводит к возникновению эффекта величины операндов. Кроме того, МП встречаются чаще, и поэтому ответы на них извлекаются из долговременной памяти быстрее [30].

В задаче замаскированного прайминга (неосознаваемое восприятие) в интервале анализа волны N400 не обнаружено достоверной разницы между правильным и неправильным ответом для обеих групп испытуемых, что говорит об отсутствии эффекта N400 в этом блоке. Также отсутствует асимметрия ответа, наблюдаемая в осознаваемом блоке, и эффект величины операндов. В нашей предыдущей работе эффект N400 был зафиксирован при выполнении задачи неосознаваемого арифметического прайминга только для примеров на умножение после предварительной тренировки тех же примеров, которые были использованы в эксперименте [21]. Похожий эффект был описан в литературе: информация, которая встречается чаще или к которой недавно обращались, будет иметь более высокие базовые состояния активности в семантической памяти, что может отражаться в параметрах N400 [12]. Эти данные согласуются с представлением о природе N400 как связанной с процессами узнавания, усиливающимися при повторном предъявлении стимулов в задачах на запоминание.

В неосознаваемом блоке при анализе компонента LPC в интервале 450–550 мс от начала предъявления стимула в группе испытуемых со слабым арифметическим навыком наблюдалась достоверно более позитивная амплитуда вызванного потенциала при предъявлении неправильного ответа на примеры МП, что является отражением арифметического эффекта LPC. Эффект LPC в неосознаваемом блоке полностью совпадает с результатами осознаваемого блока, в котором у испытуемых со слабым арифметическим навыком также наблюдалась достоверно более позитивная амплитуда ВП при предъявлении неправильного ответа на примеры МП. Кроме того, в группе испытуемых со слабым арифметическим навыком амплитуда ВП в ответ на предъявление правильного ответа на примеры БП была достоверно больше по сравнению с примерами МП, а также наблюдалось снижение амплитуды ВП при предъявлении правильных ответов на примеры МП в группе испытуемых со слабым арифметическим навыком.

Полученные результаты согласуются с результатами предыдущих исследований, демонстрирующих зависимость амплитуды LPC от трудности примера и уровня арифметических способностей испытуемых: эффект LPC появляется у испытуемых со слабым арифметическим навыком при решении простых примеров, а у более арифметически успешных испытуемых эффект LPC возникает только при решении сложных примеров с двузначными числами [7]. Также известно, что на амплитуду LPC может влиять тренировка арифметического навыка: чем более развит арифметический навык, тем менее выражен данный компонент. Это связывают с тем, что практика облегчает извлечение ответа напрямую из долговременной памяти [6, 31].

В настоящий момент имеется крайне мало электрофизиологических исследований природы неосознаваемого восприятия при обработке арифметических примеров. По имеющимся данным, в задачах с отсутствием внимания или замаскированным предъявлением примера наблюдалось возникновение эффекта, по временным и пространственным характеристикам похожего на арифметический эффект волны N400 [20, 21]. Эти данные похожи на результаты, получаемые в задачах семантического прайминга, где в случае замаскированного предъявления прайма наблюдается генерация компонента N400, что интерпретируется как автоматическая природа волны N400 и контролируемая – волны LPC [32]. С другой стороны, при выполнении задания со смещен-

ным вниманием был обнаружен эффект, имеющий топографическое сходство с волной P600/LPC, который авторы связывают с отложенной сознательной оценкой арифметических фактов [20].

Взаимосвязь внимания и автоматических процессов достаточно противоречива. С одной стороны, наиболее общепринятой интерпретацией эффектов замаскированного прайминга является автоматическое распространение активации в нейрональных сетях, вызванное связанным контекстом стимулом [15]. С другой стороны, ряд исследований выявил, что для возникновения эффекта прайминга необходимо наличие внимания во временном окне предъявления маскированного стимула даже при отсутствии его осознаваемого восприятия [33, 34]. Также установлено, что такие компоненты ВП, как волна P300, традиционно связываемые с контролируемыми процессами, могут возникать при предъявлении стимулов на неосознаваемом уровне [35]. Таким образом, имеются данные о том, что эффекты прайминга могут быть связаны с уровнем внимания вне зависимости от того, являются ли эти процессы автоматическими или контролируемыми [33].

Эффект LPC, возникающий при распознавании стимулов в различном контексте, указывает на то, что эта волна отражает некоторый процесс, связанный с кодированием информации. Некоторые исследователи связывают семантическую волну LPC с попыткой пересмотреть первоначальный анализ предложения. В этом случае она часто возникает без предвещающей ее волны N400 при предъявлении синтаксически ошибочных предложений [36]. В арифметических задачах величина волны LPC и наличие арифметического эффекта LPC зависят от уровня арифметического навыка испытуемых. Испытуемые с более сформированным арифметическим навыком быстрее отклоняют неправильные решения, тогда как арифметически слабые испытуемые воспринимают неправильные ответы как возможные варианты на роль правильных и пытаются пересмотреть предложенное решение. Таким образом, предполагается, что LPC в такого рода задачах отражает степень несоответствия предъявляемого стимула предшествующему контексту и является индексом контекстуальной интеграции и пересмотра схемы, связанной с процессом категоризации стимулов [27, 37].

Полученный в нашем исследовании результат является, по нашим данным, первым свидетельством наличия арифметического эффекта LPC при отсутствии активного внимания. Следует отметить, что в нашем исследовании мы не просили испытуемых классифицировать ответы на правильные и неправильные, а также выполнять моторный ответ. Мы планировали максимально исключить вероятность интерференции моторных и когнитивных процессов при выполнении задания, а также обеспечили совпадение задач в осознаваемом и неосознаваемом блоках. Таким образом, в нашем исследовании влияние волны P300, частично совпадающей по времени возникновения с волной LPC, было минимально, что подтверждается снижением амплитуды ответа в париетальных областях. Волна, регистрируемая таким образом, не несет в себе вклада процессов категоризации стимула, которые в случае с неосознаваемым восприятием прайма также могут быть неверно классифицированы. Следовательно, можно предположить, что выявляемый в нашем исследовании эффект LPC при неосознаваемом восприятии прайма является непосредственным индикатором процессов кодирования и извлечения информации, отражающим нейрофизиологические особенности, связанные с уровнем арифметического навыка испытуемых.

ВКЛАДЫ АВТОРОВ

Идея работы и планирование эксперимента (А.А.А., В.М.К., Н.В.П.), разработка методики экспериментов (А.А.А., В.М.К., Н.В.П., Д.Г.Ф.), сбор данных (В.М.К., Н.В.П., Д.Г.Ф., Д.Д.С.), обработка данных (В.М.К., Д.Д.С.), написание и редактирование манускрипта (В.М.К., А.А.А., Н.В.П., Д.Г.Ф., Д.Д.С.).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет гранта Российского научного фонда № 23–78–01220, <https://rscf.ru/project/23–78–01220>. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Все исследования проводились в соответствии с принципами биомедицинской этики, изложенными в Хельсинкской декларации 1964 г. и последующих поправках к ней. Они также были одобрены Этическим комитетом Санкт-Петербургского психологического общества в области исследований с привлечением людей (протокол № 25 от 26.10.2023 г.).

Каждый участник исследования дал добровольное письменное информированное согласие после получения разъяснений о потенциальных рисках и преимуществах, а также о характере предстоящего исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Suárez-Pellicioni M, Prado J, Booth JR* (2022) Neurocognitive mechanisms underlying multiplication and subtraction performance in adults and skill development in children: a scoping review. *Current Opin Behav Sci* 48: 101228. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2022.101228>
2. *Vanbinst K, De Smedt B* (2016) Individual differences in children's mathematics achievement: The roles of symbolic numerical magnitude processing and domain-general cognitive functions. *Progr Brain Res* 227: 105–130. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2016.04.001>
3. *LeFevre J-A, Bisanz J, Daley KE, Buffone L, Greenham SL, Sadesky GS* (1996) Multiple routes to solution of single-digit multiplication problems. *J Exp Psychol: General* 125(3): 284–306. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.125.3.284>
4. *Thevenot C, Barrouillet P, Castel C, Uittenhove K* (2016) Ten-year-old children strategies in mental addition: A counting model account. *Cognition* 146: 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.09.003>
5. *Barrouillet P, Thevenot C* (2013) On the problem-size effect in small additions: Can we really discard any counting-based account? *Cognition* 128(1): 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.02.018>
6. *Núñez-Peña MI* (2008) Effects of training on the arithmetic problem-size effect: An event-related potential study. *Exp Brain Res* 190(1): 105–110. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1501-y>
7. *Núñez-Peña MI, Gracia-Bafalluy M, Tubau E* (2011) Individual differences in arithmetic skill reflected in event-related brain potentials. *Int J Psychophysiol* 80(2): 143–149. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.02.017>
8. *Jost K, Hennighausen E, Rösler F* (2003) Comparing arithmetic and semantic fact retrieval: Effects of problem size and sentence constraint on event-related brain potentials. *Psychophysiology* 41(1): 46–59. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.00119>
9. *Prieto-Corona B, Rodríguez-Camacho M, Silva-Pereyra J, Marosi E, Fernández T, Guerrero V* (2010) Event-related potentials findings differ between children and adults during arithmetic-fact retrieval. *Neurosci Lett* 468(3): 220–224. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2009.10.094>
10. *Avancini C, Galfano G, Szűcs D* (2014) Dissociation between arithmetic relatedness and distance effects is modulated by task properties: An ERP study comparing explicit vs. implicit arithmetic processing. *Biol Psychol* 103: 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2014.10.003>
11. *Szűcs D, Soltész F* (2010) Event-related brain potentials to violations of arithmetic syntax represented by place value structure. *Biol Psychol* 84(2): 354–367. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2010.04.002>

12. *Kutas M, Federmeier KD* (2011) Thirty years and counting: finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annu Rev Psychol* 62: 621–647.
<https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.131123>
13. *Heidekum AE, Grabner RH, De Smedt B, De Visscher A, Vogel SE* (2019) Interference during the retrieval of arithmetic and lexico-semantic knowledge modulates similar brain regions: Evidence from functional magnetic resonance imaging (fMRI). *Cortex* 120: 375–393.
<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.06.007>
14. *Neely JH* (2012) Semantic priming effects in visual word recognition: A selective review of current findings and theories. In: Besner D, Humphreys GW (eds) *Basic Processes in Reading*. 1st edn. Routledge. New York. 264–336.
15. *Posner MI, Snyder CR, Solso R* (2004) Attention and cognitive control. In: Balota D, Marsh EJ (ed) *Cognitive Psychology: Key Readings*. 1st edn. Psychol Press. London. 55–85.
16. *Marcel AJ* (1983) Conscious and unconscious perception: Experiments on visual masking and word recognition. *Cogn Psychol* 15(2): 197–237.
[https://doi.org/10.1016/0010-0285\(83\)90009-9](https://doi.org/10.1016/0010-0285(83)90009-9)
17. *García-Orza J, Damas-López J, Matas A, Rodríguez JM* (2009) “2 x 3” primes naming “6”: evidence from masked priming. *Attent Percept Psychophys* 71(3): 471–480.
<https://doi.org/10.3758/APP.71.3.471>
18. *Ric F, Muller D* (2012) Unconscious addition: When we unconsciously initiate and follow arithmetic rules. *J Exp Psychol Gen* 141(2): 222–232.
<https://doi.org/10.1037/a0024608>
19. *Van Opstal F, de Lange FP, Dehaene S* (2011) Rapid parallel semantic processing of numbers without awareness. *Cognition* 120(1): 136–147.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2011.03.005>
20. *Strauss M, Dehaene S* (2019) Detection of arithmetic violations during sleep. *Sleep* 42(3): zsy232.
<https://doi.org/10.1093/sleep/zsy232>
21. *Полякова НВ, Александров АА* (2019) Использование компонента N400 для анализа математических вычислений на бессознательном уровне. *Журн высш нерв деятелън им ИП Павлова* 69(3): 325–333. [*Polyakova NV, Aleksandrov AA* (2019) N400 component for analysis of unconscious mathematical calculations. *Zhurn vyssh nerv deyateln im IP Pavlova* 69(3): 325–333. (In Russ)].
<https://doi.org/10.1134/S0044467719030109>
22. *Sowinski C, Dunbar K, LeFevre J* (2014) Calculation fluency test (Unpublished technical report). Math Lab. Carleton Univer. Ottawa. Canada.
23. *Wilson AJ, Revkin SK, Cohen D, Cohen L, Dehaene S* (2006) An open trial assessment of "The Number Race", an adaptive computer game for remediation of dyscalculia. *Behav Brain Funct* 2: 1–16.
<https://doi.org/10.1186/1744-9081-2-20>
24. *Blankenberger S* (2001) The arithmetic tie effect is mainly encoding-based. *Cognition* 82(1): B15–B24.
[https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(01\)00140-8](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(01)00140-8)
25. *Zbrodoff NJ, Logan GD* (1990) On the relation between production and verification tasks in the psychology of simple arithmetic. *J Exp Psychol: Learning, Memory, and Cognition* 16(1): 83.
<https://doi.org/10.1037/0278-7393.16.1.83>
26. *Dickson DS, Wicha NYY* (2019) P300 amplitude and latency reflect arithmetic skill: An ERP study of the problem size effect. *Biol Psychol* 148: 107745.
<https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2019.107745>
27. *Niedeggen M, Rösler F* (1999) N400 effects reflect activation spread during retrieval of arithmetic facts. *Psychol Sci* 10(3): 271–276.
<https://doi.org/10.1111/1467-9280.00149>
28. *Zbrodoff NJ, Logan GD* (2005) What everyone finds: The problem-size effect. In: Campbell JID (ed) *The Handbook of Mathematical Cognition*. 1 edn. Psychol Press. London. 331–345.
29. *Jost K, Khader PH, Burke M, Bien S, Rösler F* (2011) Frontal and parietal contributions to arithmetic fact retrieval: a parametric analysis of the problem-size effect. *Hum Brain Mapp* 32(1): 51–59.
<https://doi.org/10.1002/hbm.21002>
30. *Imbo I, Vandierendonck A* (2008) Practice effects on strategy selection and strategy efficiency in simple mental arithmetic. *Psychol Res* 72: 528–541.
<https://doi.org/10.1007/s00426-007-0128-0>
31. *Pauli P, Lutzenberger W, Rau H, Birbaumer N, Rickard TC, Yaroush RA, Bourne Jr LE* (1994) Brain potentials during mental arithmetic: effects of extensive practice and problem difficulty. *Cogn Brain Res* 2(1): 21–29.
[https://doi.org/10.1016/0926-6410\(94\)90017-5](https://doi.org/10.1016/0926-6410(94)90017-5)

-
32. Bakker I, Takashima A, van Hell JG, Janzen G, McQueen JM (2015) Tracking lexical consolidation with ERPs: Lexical and semantic-priming effects on N400 and LPC responses to newly-learned words. *Neuropsychologia* 79: 33–41.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.10.020>
 33. Kiefer M, Brendel D (2006) Attentional modulation of unconscious “automatic” processes: Evidence from event-related potentials in a masked priming paradigm. *J Cogn Neurosci* 18(2): 184–198.
<https://doi.org/10.1162/jocn.2006.18.2.184>
 34. Naccache L, Blandin E, Dehaene S (2002) Unconscious masked priming depends on temporal attention. *Psychol Sci* 13(5): 416–424.
<https://doi.org/10.1111/1467-9280.00474>
 35. Shevrin H (2001) Event-related markers of unconscious processes. *Int J Psychophysiol* 42(2): 209–218.
[https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(01\)00165-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(01)00165-9)
 36. Thornhill DE, Van Petten C (2012) Lexical versus conceptual anticipation during sentence processing: Frontal positivity and N400 ERP components. *Int J Psychophysiol* 83(3): 382–392.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.12.007>
 37. Núñez-Peña MI, Suárez-Pellicioni M (2012) Processing false solutions in additions: differences between high- and lower-skilled arithmetic problem-solvers. *Exp Brain Res* 218: 655–663.
<https://doi.org/10.1007/s00221-012-3058-z>

Conscious and Unconscious Processes in the Arithmetic Priming Task Depend on the Arithmetic Skill

V. M. Knyazeva^{a,*}, N. V. Polyakova^a, D. G. Fedorov^a, D. D. Sitnikova^a,
and A. A. Aleksandrov^a

^a*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

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

The study examined the role of conscious and unconscious processes depending on the level of arithmetic skill. The participants were divided into two groups according to their arithmetic skill based on the calculation fluency test results. Masked and unmasked single-digit addition problems (primes) followed by correct and incorrect results were presented on the screen. In a conscious perception task (unmasked priming), when large and small problem results were presented, an arithmetic N400 and LPC effects were observed in both groups. In the case of unconscious perception (masked priming), when small problem results were presented, the LPC effect was observed in the group with low arithmetic skill. The fact that the LPC arithmetic effect was discovered during the unconscious presentation may indicate the automatic nature of the encoding and retrieving information processes, reflecting neurophysiological characteristics associated with the level of arithmetic skill.

Keywords: arithmetic, masked priming, unconscious perception, addition, event related potentials, N400, late positive component (LPC)