

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ МЕЖПОЛУШАРНОЙ АСИММЕТРИИ МОЗГА ПРИ РЕШЕНИИ ПРИМЕРОВ С ДВУЗНАЧНЫМИ ОПЕРАНДАМИ

Айдаркин Е.К., Богун А.С.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

a_bogun@mail.ru

В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных анализу механизмов реализации арифметических задач разного уровня сложности [1,5,12 и др.], однако лишь небольшой пласт исследований выполнен в условиях разделения операций и их дальнейшего последовательного анализа [4,11,12]. Это усложняет оценивание временного хода процесса расчетов, а также когнитивных процессов, сопровождающих анализ каждого члена примера, представляющего собой распознавание числа, модулируемое процессами расчетов.

Целью работы стало исследование нейрофизиологических коррелятов решения примеров на умножение и сложение по параметрам времени и качества решения, ЭЭГ и ССП. В исследовании приняли участие 30 человек (25.14 ± 0.46 лет). Обследование включало фоновую пробу (спокойное бодрствование с открытыми глазами в течение 5 минут), и поочередное решения блоков примеров на умножение и сложение двузначных чисел. Операнды и знаки арифметических операций предъявлялись последовательно в течение 700 мс. После решения примера обследуемые набирали ответ на клавиатуре, а затем нажимали на кнопку. В каждом блоке было 100 примеров, разделяемых на однократно предъявляемые, повторяющиеся (соответственно 1 и 2 предъявление), примеры с одинаковыми операндами. Стимулы предъявлялись на экране компьютера на расстоянии 60 см в программной среде «Аудиовизуальный слайдер», а регистрация комплекса электрофизиологических показателей осуществлялась с помощью компьютерного электроэнцефалографа-анализатора «Энцефалан-131-03» (НПКФ «Медиком-МТД», г. Таганрог) по системе 10-20 в 21 стандартном отведении. Оцифрованная ЭЭГ экспортировалась в Matlab, где рассчитывались время и качество решения примеров, спектральная мощность ритмических диапазонов ЭЭГ и суммарные ССП, усредненные относительно момента предъявления стимула. Достоверность различий поведенческих показателей оценивалась с использованием t-критерия Стьюдента.

На рис.1 представлены значения времени и качества решения. Видно, что время решения было достоверно выше при выполнении умножения для всех подгрупп примеров. Для сложения различия между подгруппами были недостоверны или

присутствовали на уровне тенденций. Повторение примера не приводило к облегчению его решения и качество решения достоверно не возрастало. Следовательно, можно говорить об отсутствии сохранения результатов в кратковременной памяти и процесса обучения, т.к. повтор примера не облегчает задачу. Аналогичная картина показана для примеров с одинаковыми операндами, где уменьшение загрузки оперативной памяти ввиду идентичности операндов не способствовало упрощению расчетов.

Иная картина наблюдалась для умножения, где длительное время решения однократных примеров связано со значимой активацией ресурсов кратковременной памяти, где сохраняются результаты промежуточных расчетов. Снижение времени решения повторяющихся примеров, и возрастание качества решения может объясняться сохранением итоговых/промежуточных результатов и стратегии решения в кратковременной памяти, что облегчает вычисления. Для примеров с одинаковыми операндами укорочение времени решения, и рост качества расчетов связан с идентичностью операндов и возможностью извлечения результата из долговременной памяти, т.к. примеры являются усложненным вариантом таблицы умножения [5].

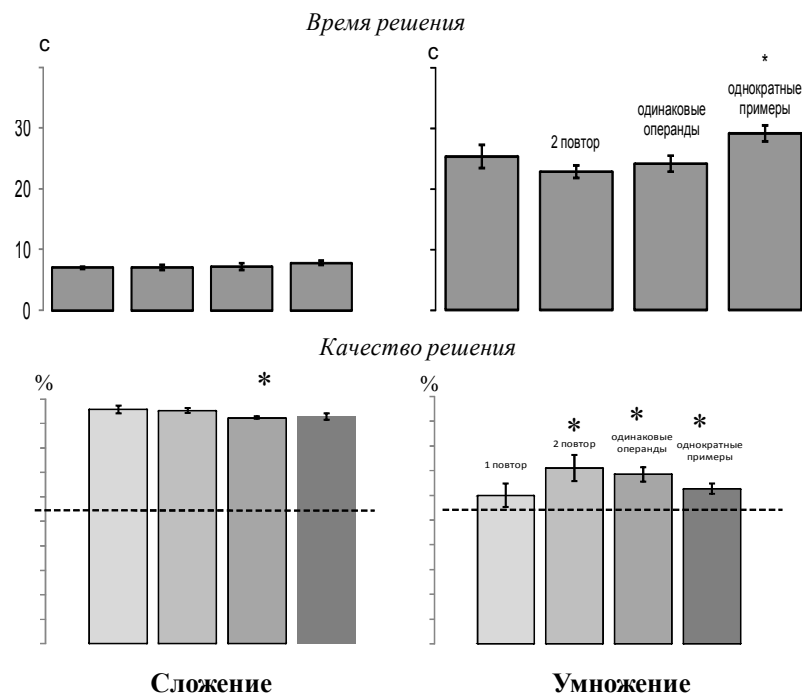


Рисунок 1. Показатели времени и качества решения примеров на сложение и умножение двузначных чисел.

Обозначения: по оси ординат представлены время решения и процент правильно решенных примеров в выделенных группах. Пунктирной линией показан уровень качества деятельности 55%. Звездочками отмечены достоверно различающиеся значения.

Можно предполагать обусловленность различий значений поведенческих показателей разными способами решения арифметических задач. Умножение связано с извлечением результатов из вербальной рабочей памяти, что требует интеграции языковых представлений чисел [5,11]. Сложные примеры на сложение решаются количественными манипуляциями с вовлечением мыслительной числовой линии [5].

Далее проводился анализ картины активации ЭЭГ на этапах чтения условия, решения и последующего отдыха (рис. 2). При сложении в дельта-диапазоне для всех этапов решения примеров показано наличие 4 фокусов активации: в лобно-центральной и теменной области левого полушария, а также в правых теменно-височной и лобной зонах. В данном ритмическом диапазоне асимметрия активации была наиболее выражена. Процесс решения сопровождался дальнейшим увеличением в ЭЭГ количества дельта-волн, что в итоге приводило к слиянию фокусов. В тета-диапазоне при решении левый лобный фокус усиливался и смещался в передние области с одновременным формированием фокуса в передних областях правого полушария. В итоге асимметрия тета-ритма сглаживалась. Для альфа-частот при решении происходило небольшое усиление колебаний в левой теменной области. Окончание процесса вычисления сопровождалось ослаблением мощности во всех диапазонах с сохранением всех 4 фокусов, т.е. восстановления фоновой картины активации не происходит.

При решении примеров на умножение картина ЭЭГ-активации отличалась. Во всех состояниях фокусы активации были менее выражены и более четко локализованы. Решение примера приводило к усилению фокусов дельта-частот, доминирующих в спектре, но не сливавшихся в отличие от аналогичного этапа для сложения. В тета-ритме за счет смещения лобного фокуса в центральные области сглаживается характер асимметрии. В отличие от сложения, на этапе решения происходила десинхронизация альфа-ритма, асимметрично локализованного в виде 2 фокусов в теменной и центральной областях левого полушария.

Значимый рост дельта-колебаний в лобных областях может связываться с активацией передней системы произвольного внимания, а распространение дельта-колебаний в теменные области - с активацией таламо-париетальной системы, отвечающей за создание визуального представления задания, его проговаривание, и ресурсы непроизвольного внимания [3,10]. Активация лобных областей также связывается с необходимостью осуществления сложной деятельности, опосредованной процессами рабочей памяти [12]. При этом активность лобных отделов по данным ЭЭГ

и нейропсихологическим представлениям [2] связана с организацией и регуляцией поиска решения. Асимметричная локализация дельта- и тета-фокусов в левой лобной области может отражать включение процессов внутренней речи [6], топографически локализованной в области нижней левой лобной извилины [2], что связано со способом хранения цифровых данных, в т.ч. посредством вербальных ассоциаций [5] и требует участия основных речевых центров. Обратная картина изменений альфа-ритма, отражает разную сложность арифметической деятельности, т.к. затрагивает теменные области, являющиеся в частности основными арифметическими зонами коры. Синхронизация альфа-частот при сложении связана с процессами избирательной модуляции корковой активности. В случае умножения присутствует десинхронизация альфа-частот под влиянием сложной мыслительной задачи.



Рисунок 2. Распределение активности по поверхности скальпа в различных состояниях.

Обозначения: по центру обозначены выделяемые состояния. На шкале белый цвет соответствует более высоким значениям спектральной плотности в соответствующих ЭЭГ-отведениях.

Реализация отдельных стадий решения находила отражение в характере зрительного вызванного ответа, полученного на 1 и 2 операнды, и опосредовалась разными когнитивными процессами (Рис 3). ССП на знак арифметической операции имел характер стандартного зрительного ответа, модулированного удержанием в оперативной памяти 1 операнда.

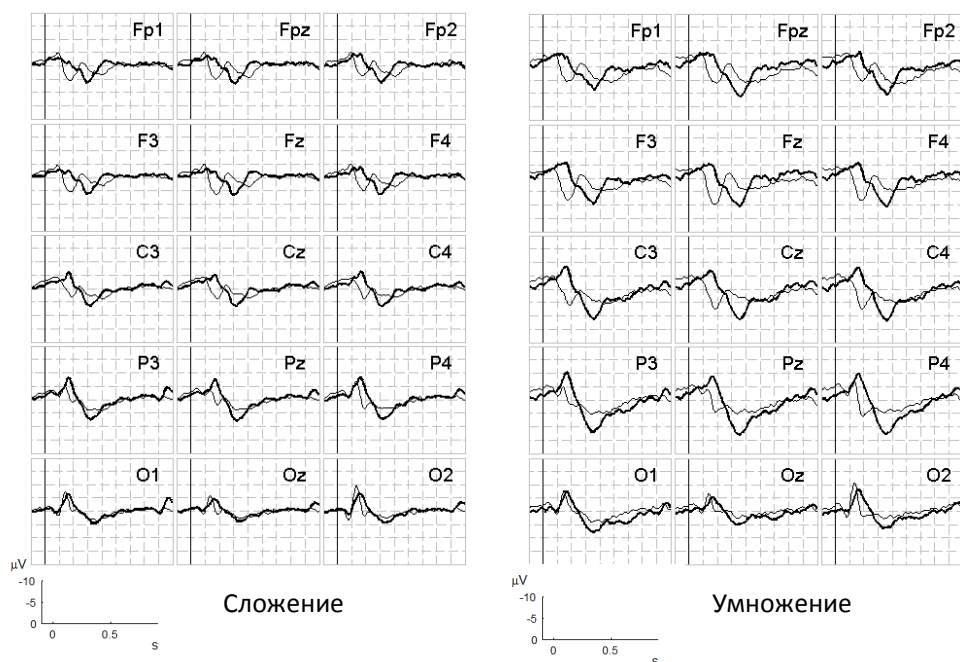


Рисунок 3. Конфигурация ССП при выполнении примеров на сложение и умножение.

Обозначения: сплошной линией показана конфигурация ССП при восприятии 1 операнда, пунктирной – конфигурация ССП при восприятии 2 операнда.

При восприятии и запоминании 1 операнда в теменной области в достимульный период фиксировалась E-волна, переходящая затем в ранний зрительный компонент С1, связанный с началом обработки зрительной информации в первичной зрительной коре [7]. Его усиление при выполнении умножения связано с модуляцией восприятия стимула процессами внимания, отражающее раннее влияние этого когнитивного процесса на обработку информации в коре [7]. Сенсорный компонент N100, формировавшийся в обоих случаях в правой теменно-затылочной области с распространением влево, связан со зрительным распознаванием [11]. Далее происходило вытеснение негативности за счет формирования в лобных областях небольшого компонента P200, переходящего в P300. В данном когнитивном компоненте отражалось включение процессов кратковременной памяти при запоминании и сохранении в ней первого операнда (более выраженного при умножении за счет субъективной сложности) [8]. Далее P300 в лобных областях начинает вытесняться формирующейся левосторонней негативностью, некоторое время существовавшего в противофазе с P300. При умножении данный компонент регистрировался дольше. Природа этого компонента неоднозначна. В нашем случае его появление связано с активацией передней системы произвольного внимания [3,10],

обусловленной необходимостью удержания в памяти первого операнда. Большая выраженность и необходимость притормаживания таламо-париетальной системы произвольного внимания также опосредовано сложностью деятельности. В зарубежной литературе лобную негативность в промежутке 400-500 мс и сопровождающую решение семантических задач, трактуется как компонент N400, связываемый с активацией внутренней арифметической ассоциативной сети и семантического языкового пути обработки цифр [9].

При распознавании 2 операнда большая выраженность E-волны отражала подготовку мозговых структур к процессу восприятия и различения стимула. Компонент C1 имел большие значения мощности в сравнении с 1 операндом, что также отражало раннюю модуляцию процесса восприятия и распознавания процессами внимания [7]. N100 был похож на аналогичный компонент при распознавании 1 операнда. Он формировался асимметрично в виде фокуса в правой теменно-затылочной области, находясь в противофазе с лобным P200. Усиление N100 связано с активацией сети представления арифметических данных, локализованной в теменной области и происходящей при предъявлении двузначных операндов [5], а одновременное формирование P200 - с оценкой размерности цифр [6], что подтверждает его большую выраженность при анализе 2 операнда при умножении, где размерность получаемых промежуточных результатов превышает размерность операндов. Показано, что переход между ранними компонентами N100 и P200 может отражать абстрактную семантическую обработку чисел [11,12].

В обоих случаях в лобных областях отмечался низкоамплитудный асимметричный компонент N200, отсутствующий при обработке 1 операнда. Его появление, также как и наличие левосторонних лобных фокусов дельта- и тета-частот, вносящих, вероятно, вклад в его формирование, отражало включение процессов внутренней речи за счет необходимости одновременного удержания в памяти 1 операнда и реализации процесса расчетов [6,9,10]. N200 находился в противофазе с небольшим P3, большая выраженность которого для 2 операнда отражала процесс выбора стратегии решения и сложность задачи. Данный компонент более выражен при выполнении умножения; для сложения длительность его существования меньше.

Таким образом, различная направленность динамики межполушарной асимметрии ЭЭГ и ССП подтверждает исходно разное содержание двух латерализованных задач. Четко выраженная на начальных этапах асимметрия ритмов ЭЭГ в виде большей активации левого полушария сглаживалась при решении простой

задачи и усиливалась при выполнении сложной. Характер асимметрии компонентов ССП имел обратную тенденцию в виде исходной локализации компонентов в правом полушарии с последующим смещением влево. Поскольку в ССП отражались начальные стадии решения, а отдельные компоненты представляют собой суперпозицию волн ЭЭГ, можно предполагать, что и в ЭЭГ исходно наблюдается сходная динамика асимметрии, сглаживаемая за счет усреднения. Соответственно, умножение сопровождается большей выраженностью данного процесса, тогда как при сложении как более простой задачи данный процесс останавливается на более ранних стадиях.

Литература

1. Бияшева З.Г., Швецова Е.В. Информационный подход к анализу возрастной динамики ЭЭГ мальчиков и подростков 7-18 лет при решении в уме арифметических задач // Физиология человека. - 1993 г, т. 19, № 5, - с. 5-11.
2. Лурия А.Р. Основы нейропсихологии. М.: Издательский центр «Академия», 2002. 384 с.
3. Мачинская Р.И. Нейрофизиологические механизмы произвольного внимания (аналитический обзор) // Журнал высшей нервной деятельности. 2003. т.53. № 2, С. 133-150.
4. Campbell J.I.D., Metcalfe A. W.S. Arabic digit naming speed: Task context and redundancy gain // *Cognition* 107 (2008) 218–237
5. Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., Cohen, L. Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 2003, 20(3–6), 487–506.
6. Domahs F., Domahs U., Schlesewsky M., Ratinckx E., Verguts T., Willmes K., Nuerk H. Neighborhood consistency in mental arithmetic: behavioral and ERP evidence // *Behavioral and Brain Functions*, 2007, Vol.3, № 66, PP..1-42.
7. Fu S, Fedota J, Greenwood PM, Parasuraman R. Early interaction between perceptual load and involuntary attention: An event-related potential study. *Neurosci Lett*. 2009 Oct 27. [Epub ahead of print]
8. Honda M, Barrett G, Yoshimura N, Ikeda A, Nagamine T, Shibasaki H. Event-related potentials during paired associate memory paradigm // *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1996 Sep;100(5):407-21.
9. Niedeggen M, Rösler F, Jost K: Processing of incongruous mental calculation problems: Evidence for an arithmetic N400 effect // *Psychophysiology* 1999, V. 36, p. 307-324.

10. Posner M.I., Peterson S.E. The attention system of the human brain // *Ann. Res. Neurosci.* 1990, Vol. 13. PP. 25-42
11. Szucs D., Soltesz, F. Event-related potentials dissociate facilitation and interference effects in the numerical Stroop paradigm // *Neuropsychologia*, 2007, № 45, pp. 3190–3202
12. Zhou X, Jiang X, Ye Z, Zhang Y, Lou K, Zhan W. Semantic integration processes at different levels of syntactic hierarchy during sentence comprehension: An ERP study. *Neuropsychologia*. 2010 Feb 6. [Epub ahead of print]