

/ На правах рукописи



Фомина Анна Сергеевна

**НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ, ЛЕЖАЩИЕ В ОСНОВЕ
РЕШЕНИЯ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

03.03.01 - физиология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

АСТРАХАНЬ – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет»

Научный руководитель: кандидат биологических наук, профессор **Айдаркин Евгений Константинович**

Официальные оппоненты:

Латанов Александр Васильевич доктор биологических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», кафедра высшей нервной деятельности биологического факультета, заведующий кафедрой.

Александров Александр Алексеевич, доктор биологических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра высшей нервной деятельности и психофизиологии биологического факультета, заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва.

Защита состоится « 26 » декабря 2015 г. в 14.00 часов на заседании объединенного диссертационного совета ДМ 212.009.01 при ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный университет» по адресу: 414000, г. Астрахань, пл. Шаумяна, 1, ауд. 101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный университет» по адресу: 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а и на сайте: <http://www.asu.edu.ru>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2015 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Курьянова Евгения Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В настоящее время изучение психофизиологических и нейрофизиологических механизмов решения арифметических задач актуально в теоретическом и прикладном аспектах. Математическая задача рассматривается как латерализованная мыслительная деятельность, требующая изучения и применения определенных алгоритмов решения (Бияшева З.Г., Швецова Е.В., 1993; Свидерская Н.Е., Королькова Т.А., 1992; Dehaene S. et al., 2003), связанных с последовательным включением ряда когнитивных операций (Cohen L. et al., 2000; van Harskamp et al., 2002; Geary D. C. et al., 2004; Campbell J., Epp L., 2005; Metscfe A., Campbell J., 2008; Menon V., 2011; Thevenot C. et al., 2011; Zhou X., 2011; Darki F., Klingberg T., 2014; Trezise K., Reeve R. A., 2014 и др.). Существует несколько схем хранения математических данных (McCloskey M. et al., 1985, 1992; Dehaene S., Cohen L., 1995-1997; Dehaene S. et al., 2000-2003). Модель тройного кодирования (Dehaene S. et al., 1995-2007) основана на 3 представлениях чисел (словесное, количественное и знаковое), с учетом которых описываются различия психофизиологического базиса хранения и оперирования числами.

При исследовании нейробиологических механизмов математических задач показано вовлечение горизонтального сегмента интрапариетальной борозды, левой угловой извилины, билатеральной задней верхней теменной зоны (Dehaene S. et al., 1999; Pesenti M. et al., 2000; Pinel P. et al., 2001; Piazza M. et al., 2002), предильвиевой области (Dehaene S. et al., 1995-1999), левой нижней теменной борозды, прецентральной извилины (deJong B.M. et al., 1996), зон Брока и Вернике (Tohgi H. et al., 1995; Rickard T.C. et al. 2000).

В литературе отсутствуют исследования, посвященные анализу поэтапного решения математических задач. В ряде работ проводится хронометрическое разделение условия задачи на базовые операции (Barth H. et al., 2006; Fehr T. et al., 2007; Zhou X. et al., 2007). Сложность оценки структуры мыслительной деятельности связана с отсутствием объективных маркеров, позволяющих разделить процесс решения на ряд последовательных стадий, а также оценить

их количество и длительность. Поиск таких маркеров позволит детализировать механизмы, лежащие в основе решения математических задач.

Цель работы: исследование нейрофизиологических механизмов решения арифметических примеров на сложение и умножение двузначных чисел.

Задачи исследования:

1. Исследовать динамику решения примеров на умножение и сложение двузначных чисел в зависимости от сложности задачи, группы примеров и числа этапов решения.
2. По параметрам спектральных характеристик и когерентности ритмов ЭЭГ исследовать нейрофизиологические механизмы, лежащие в основе уровня общей активации, сопровождающей процесс решения примеров.
3. По параметрам амплитудно-временных характеристик зрительного ССП исследовать специфику локальной корковой активации на начальном этапе решения примеров.

Научная новизна результатов исследования. Впервые показано, что решение примеров на сложение и умножение имеет разную зависимость длительности решения от числа этапов. Изменения значений спектральной мощности и функции когерентности ЭЭГ и амплитудно-временных характеристик ССП при решении задач приурочены к сходным областям коры. Выполнение сложной задачи на умножение приводит к перераспределению значений спектральной мощности дельта- и тета-диапазонов ЭЭГ и формированию 4 фокусов. Решение более простой задачи на сложение сопровождается увеличением значений спектральной мощности ЭЭГ в большинстве зон коры. Эффективное решение сопровождается небольшими изменениями значений спектральной мощности и функции когерентности диапазонов ЭЭГ в сравнении с неэффективным. Уровень локальной активации, отражающийся в амплитудно-временных характеристиках компонентов ССП, был выше при выполнении сложной задачи на умножение в сравнении со сложением. Это отражало уровень вовлечения произвольного внимания и связано с увеличением амплитуды компонентов CNV, P3, N400.

Научно-практическая значимость работы. Показано, что в основе сложения и умножения лежат разные психофизиологические алгоритмы. Время решения примеров на сложение линейно зависит от количества этапов и имеет куполообразную зависимость при умножении. Увеличение количества этапов сопровождалось снижением вероятности ошибки при сложении и увеличением при умножении. На основании данных, полученных с использованием методов ЭЭГ и связанных с событием потенциалов, показано, что начальный этап решения, связанный с восприятием задачи, сопровождается последовательной активацией передней и задней систем внимания, что отражалось в динамике компонентов ССП с негативным и позитивным максимумом. В дальнейшем происходила активация сети ментальной арифметики, что отражалось в формировании четырех фокусов ЭЭГ в лобной, теменной и височной зонах коры обоих полушарий с выраженной асимметрией. Полученные результаты могут применяться для моделирования операторской или образовательной деятельности, в которой задача используется как модельная, с доступными для анализа в реальном времени психофизиологическими коррелятами.

Материалы и методы исследования. В исследовании приняли участие 53 человека (31 женщина, 22 мужчины), в возрасте 20-32 лет (25.14 ± 0.46 лет), праворукие. Исследование состояло из двух частей: Тест 1 и Тест 2. Каждый Тест состоял из двух блоков: «Сложение» и «Умножение». Блок включал 100 примеров, в качестве стимулов использовались двузначные цифры. Операнды предъявлялись в течение 700 мс каждый в программе «Аудиовизуальный слайдер» на экране компьютера на расстоянии 60 см. Для решения примера на сложение отводилось 25 с, для умножения – 50 с. Ответы набирались в текстовом документе с помощью компьютерной клавиатуры. В Тесте 1 после набора ответа участники однократно нажимали на кнопку мыши». 40% примеров предъявлялось однократно, 30% дважды (с интервалом 4 примера), 30% имели одинаковые операнды. В Тесте 2 участники нажимали на кнопку «мыши» каждый раз при получении промежуточного результата и при получении итогового (рис. 1).

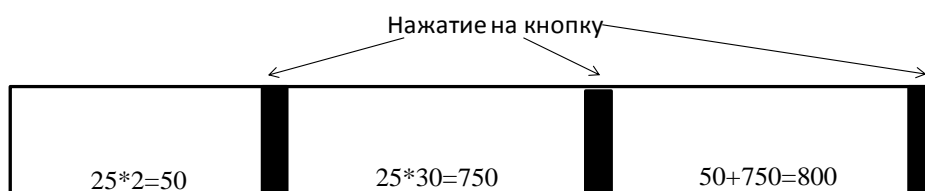


Рисунок 1. Пример выделения этапов при решении примера на умножение $25 \cdot 32$ в Тесте 2

Электрофизиологические показатели регистрировались с использованием электроэнцефалографа-анализатора «Энцефалан-131-03» монополярно в 21 отведении по системе 10-20 с шагом дискретизации 4 мс и частотной полосой пропускания 0,5-70 Гц. Референтные электроды располагались на мочках ушей, индифферентный-на лбу. Оцифрованная ЭЭГ экспортировалась в MATLAB, где вычислялись время и качество решения, число этапов, значения спектральной мощности и функции когерентности диапазонов ЭЭГ, амплитудно-временные характеристики компонентов ССП. В качестве фонового (Фон-ГО) выступало спокойное бодрствование с открытыми глазами. При анализе ЭЭГ Теста 1 выделены 3 стадии решения. «Чтение примера» (предъявление условия), «Решение примера» (вычисления), «Отдых» (интервал после нажатия). Анализ ЭЭГ Теста 2 проводился на фрагментах записи, соответствующих решению в разное число этапов. Анализ ЭЭГ проводился для ритмических диапазонов дельта (1-3.5 Гц), тета (4-8 Гц), альфа (8-13 Гц), бета (13-35 Гц). Вычислялись средние значения КОГ 25 пар отведений (≥ 0.5). Достоверность различий оценивалась с помощью дисперсионного анализа MANOVA ($p \leq 0,05$). Для получения ССП проводилось усреднение ЭЭГ относительно стимула (-100 мс- 900 мс). Методом экстраполяции значений в 21 отведении строились изопотенциальные карты. Анализировались компоненты CNV (-100-0 мс), C100 (0-100 мс), P100 (0-100 мс), N100 (100-200 мс), P200 (200-300 мс), N200(200-300 мс), P300 (300 -450 мс), N400(400-500 мс), N500 (>500 мс).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Выполнение арифметических примеров определяется количеством и длительностью элементарных этапов в алгоритме решения. Решение примеров на сложение зависит от количества этапов; длительность

решения примеров линейно возрастает с увеличением их числа. Решение примеров на умножение зависит от длительности этапов, уменьшающейся с увеличением их количества.

2. В условиях выполнения сложной арифметической задачи в ЭЭГ формировалось четыре фокуса активности в лобной, теменной и височной зонах обоих полушарий. По результатам анализа функции когерентности выполнение примеров на умножение сопровождается более выраженной асимметрией и значительной десинхронизацией колебаний и связывается с перераспределением и концентрацией активации; тогда как при выполнении сложения происходит только ее перераспределение.
3. Конфигурация связанных с событием потенциалов при предъявлении 1 и 2 операндов характеризуется увеличением амплитуды компонентов CNV, P3, N400, что связано с увеличением локальной активации коры и привлечением дополнительных ресурсов произвольного внимания. Уровень вовлечения произвольного внимания был выше при распознавании первого операнда независимо от задачи
4. Уровень общей активации был выше при выполнении простой задачи на сложение. Уровень локальной активации были выше при выполнении сложной задачи на умножение.

Апробация диссертационной работы. Результаты исследования обсуждались на XV-XXII Международных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2008-2015), III-VI международных конференциях по когнитивной науке (Москва, Томск, Калининград, 2008-2014), XV-XVI Международных конференциях по нейрокибернетике (Ростов-на-Дону, 2009, 2012), XXI-XXII Съездах Физиологического общества им. И.П. Павлова (Калуга, 2010, Волгоград, 2013), «Современные направления в исследовании функциональной межполушарной асимметрии и пластичности мозга» (Москва, 2010), IV Съезде физиологов СНГ

(Сочи, 2014), 8-11 Международных конгрессах «Нейронаука для медицины и психологии» (Судак, 2012-2015) и ряде других.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 55 работ, в т.ч. 2 статьи в журналах, входящих в базу Scopus, 8 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в журнале, входящем в базу РИНЦ, и 5 свидетельств о регистрации электронных образовательных ресурсов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, методики, главы результатов исследований, обсуждения, заключения и выводов. Работа изложена на 204 страницах машинописного текста, иллюстрирована 25 рисунками и 19 таблицами. Библиографический указатель включает 401 источников, из которых 302 иностранных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Показатели времени и качества решения при интегральном и поэтапном анализе. Анализ эффективности решения при интегральном анализе (Тест 1) показал, что процессы сложения и умножения существенно различаются. При сложении изменений ВРеш и КРеш не выявлено (рис. 2). При умножении ВРеш однократных примеров была достоверно выше в сравнении с повторяющимися и примерами с идентичными операндами. КРеш увеличивалось для примеров с идентичными операндами и повторяющихся.

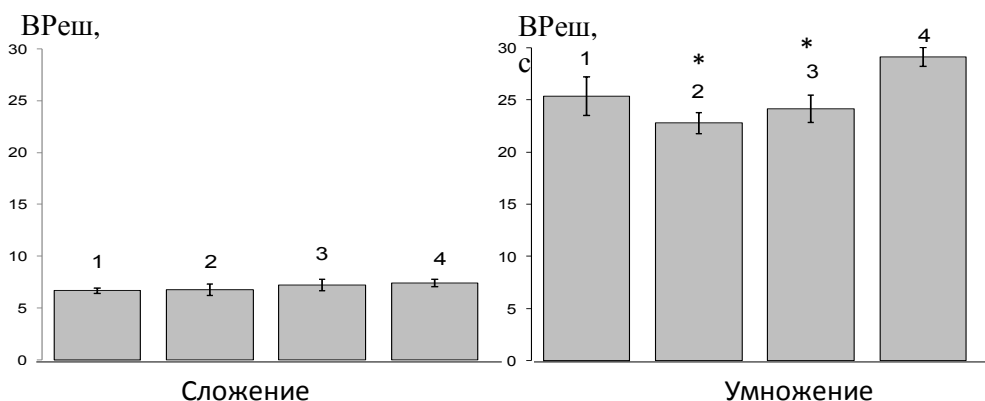


Рисунок 2. Усредненные значения времени решения примеров при интегральном анализе (Тест 1). Обозначения: по оси ординат – время решения, с. Цифры «1-4» обозначают группы примеров: 1 и 4 – однократные, 2 – повтор, 3 – примеры с идентичными операндами.

Динамика времени и качества решения при сложении свидетельствует о слабом влиянии загруженности рабочей памяти на эффективность деятельности (Ashcraft M.H., 1995; De Rammelaere S. et al., 2001; Hecht S.A., 2002). При умножении укорочение ВРеш доказывало важность рабочей памяти для эффективного решения (Furst A.J., Hitch G.J., 2000; Seitz K., Schumann-Hengsteler R., 2002), поскольку ее вовлечение критично при манипулировании промежуточными результатами расчетов (Passolunghi M. C., Siegel L. S., 2001).

На основании значений времени и качества решения при поэтапном анализе (Тест 2) показано наличие ряда алгоритмов, лежащих в основе решения двух арифметических задач. Количество и длительность последовательных этапов позволило проанализировать сложность и вариативность алгоритмов. Усредненное ВРеш примеров для обеих задач представлены на рис. 3. При сложении использовалось от 1 до 4 операций с линейной зависимостью ВРеш от их числа. Это предполагает ригидность психофизиологического алгоритма, лежащего в основе сложения (Anderson K.L. et al., 2010). Доминировали комбинации из 2 и 3 операций с небольшой вероятностью ошибки. Решение в 1 этап приводило к значительной доле ошибочных решений. Наиболее редкими были комбинации из 4 этапов с небольшой вероятностью ошибки.

При умножении использовалось от 1 до 5 операций с куполообразной зависимостью ВРеш от их числа. Поскольку при увеличении количества этапов в комбинации снижалась их длительность, можно предполагать ограниченность времени удержания в рабочей памяти промежуточных результатов (Костандов Э. А. с соавт., 2010), и ростом потребности в ее ресурсах. Доминировали комбинации из 3, 2 и 4 операций. Решение в 1 и 5 этапов встречалось редко, и было связано с высокой долей ошибок. С этой позиции эффективным было решение в 2 и 3 этапа (Костандов Э. А. с соавт., 2010), что подтверждается частотой их использования и возрастанием доли правильных ответов.

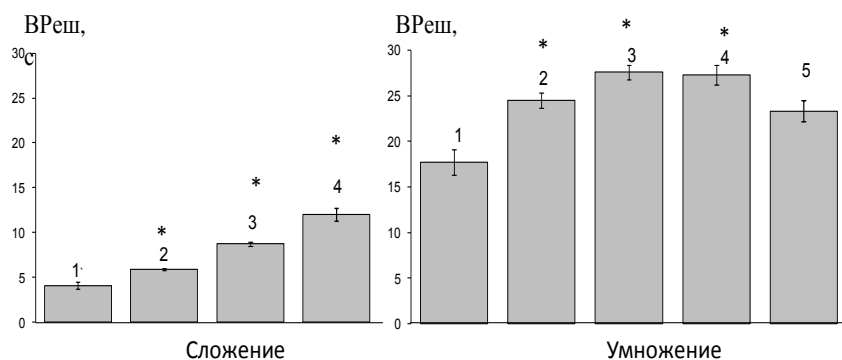


Рисунок 3. Усредненные значения времени решения примеров при поэтапном анализе (Тест 2). Обозначения: по оси абсцисс отмечено число операций, по оси ординат – время решения, с. Цифры «1-5» обозначают число операций.

При анализе динамики длительности операций (рис. 4) при решении примеров на сложение первый этап длился в два раза дольше второго (4 с и 2-3 с); длительность 3 этапа имела промежуточное значение. При решении примеров на умножение в 2 операции показано преобладание (на 1,5 с) первого. Для остальных вариантов наблюдалось снижение длительности операций.

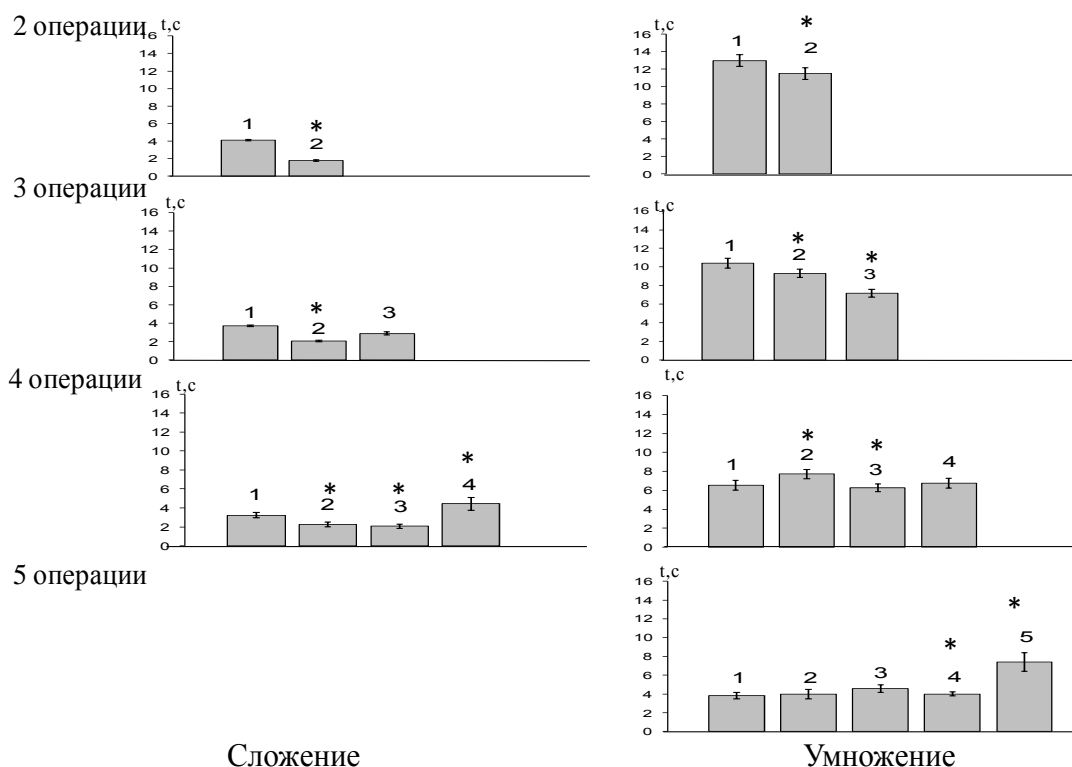


Рисунок 4. Усредненная длительность операций в зависимости от их количества при поэтапном анализе (Тест 2). Обозначения как на рис. 3.

Следовательно, выявлены различия эффективности и качества решения примеров на сложение и умножение по количеству этапов. При сложении

эффективным было решение примера в 2 этапа, а при умножении - в 3 этапа. Для комбинаций с небольшим числом этапов наиболее длительным был первый этап, а для комбинаций с большим числом этапов – последний. Исходя из длительности операций, можно предположить установочную роль первой в выборе стратегии решения. 2 этап связывается с промежуточными расчетами (его длительность была постоянной), а последний - с самопроверкой.

При сложении увеличение загруженности рабочей памяти отражалось в количестве операций, т.к. добавление каждой из них приводило к сходному увеличению значений ВРеш. При умножении уровень ее загруженности оставался высоким. Динамика ВРеш примеров с разным числом операций позволяет предполагать последовательное выполнение этапов при сложении и частичное перекрывание при умножении (Симонов П.В., 1981).

Исследование динамики спектральных характеристик ритмических диапазонов ЭЭГ на отдельных этапах решения примеров. При анализе стадий решения для групп примеров Теста 1 различий значений СМ ЭЭГ не выявлено, поэтому анализ проводился для всех групп примеров совместно. На рисунке 5 представлены карты распределения спектральных характеристик ЭЭГ при интегральном анализе решения. Из рисунка следует, что при решении примеров на сложение происходило формирование 4 фокусов ЭЭГ во всех диапазонах. На стадии «Чтение примера» асимметрия активации в дельта-частотах формировалась за счет увеличения СМ в отведениях F3, P3, F4, T5, T3, T6 и снижения в остальных. В тета-диапазоне различия наблюдались в лобных, центральных, теменных и затылочных отведениях левого полушария и в правых лобно-центральных, отличаясь меньшими значениями СМ. Увеличение СМ бета-частот показано для лобных, височных (T3, T4, T5) и теменных (P3, P4,) отведений. Стадия «Решение примера» сопровождалась дальнейшим слиянием левых лобного и теменного фокусов в дельта-полосе, и увеличением СМ во фронтальных (Fp1, Fp2, F3, Fz, F4), центральных (C3, Cz, C4), височных (T4, T5, T6, F7,) теменных (P4, Pz) и затылочных (O1) отведениях. В тета-частотах показано усиление левого лобного фокуса со смещением в

ростральном направлении. Увеличение СМ показано в центральных (С3, Сz, С4), височных (Т4, Т6), теменных (Р3, Р4) и затылочных (О1) регионах. В альфа-частотах показано увеличение уровня синхронизации в левых лобных (Fp1), теменных (Р3) и затылочных (О1) областях. СМ бета-частот была сходна с таковой для стадии «Чтение примера». Стадия «Отдых» сопровождалась уменьшением значений СМ.

При умножении показаны меньшие значения СМ анализируемых диапазонов ЭЭГ и более четкая локализация фокусов. На стадии «Чтение примера» дельта-фокусы были сформированы в левых лобно-центральных (Fp1, С3, Сz,) и теменных (Р3) областях и в правой лобно-височной (F4, Т4) области. Сходная картина показана и для тета-диапазона. Десинхронизации альфа-частот была более выражена в сравнении с аналогичной стадией для сложения. Стадия «Решение примера» сопровождалась увеличением асимметрии активации в дельта-диапазоне за счет роста значений СМ в левых лобных (F3) и теменных (Р3) отведениях. Тета-и бета-фокусы были сходны на стадиях «Чтение примера» и «Отдых». Окончание решения, отличалось от других стадий снижением СМ дельта-частот.

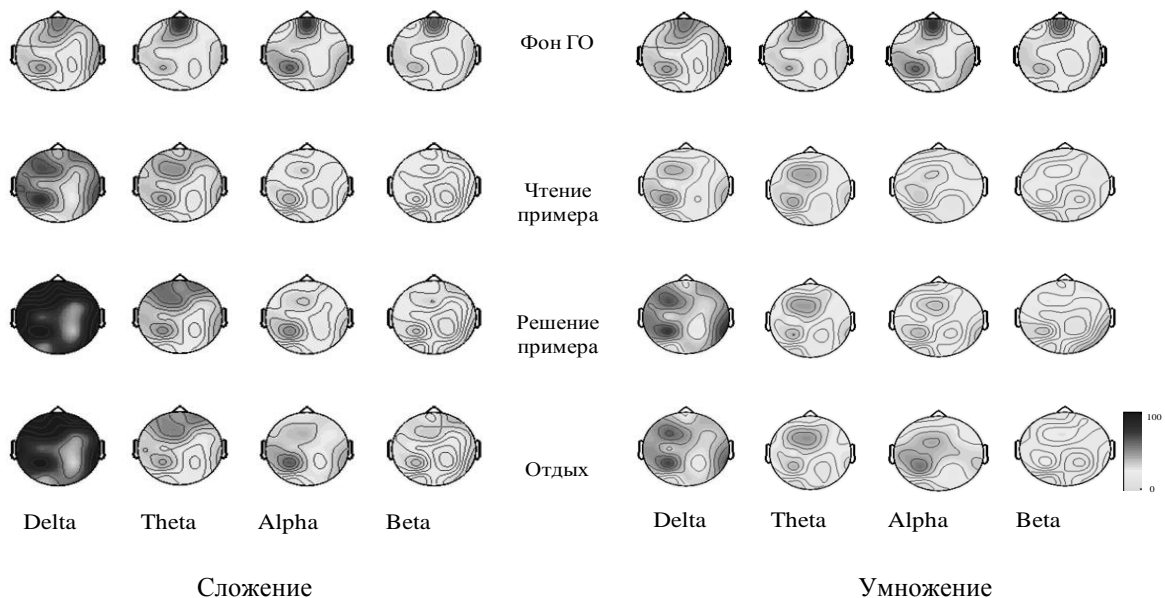


Рисунок 5. Распределение спектральных характеристик диапазонов ЭЭГ по поверхности скальпа при интегральном анализе (Тест 1). Обозначения: по центру отмечены стадии решения. Темный цвет соответствует высоким значениям спектральной мощности диапазонов ЭЭГ.

В условиях поэтапного анализа (рис. 6) происходило формирование картины активации, сходной с таковой для интегрального. Эффективное решение сопровождалось небольшими изменениями СМ ЭЭГ в сравнении с состоянием «Фон ГО, в то время как наибольшие изменения СМ ЭЭГ были связано с увеличением числа операций и отсутствием ответа. Для обеих задач решение в 2 и 3 операции сопровождалось разделением дельта-фокуса на левой лобной, височный и теменной. Эти стадии характеризовались наименьшими значениями СМ дельта-диапазона. При решении примера в 4 и 5 операций СМ дельта-частот сходна с таковой при отсутствии ответа. Независимо от числа операций решение примера приводило к формированию сходных фокусов в альфа-диапазоне в левых теменно-затылочных, лобных и правых затылочно-височных зонах. Аналогичная картина показана и для бета-частот. В передних областях преобладала активность левого полушария, а в задних – правого.

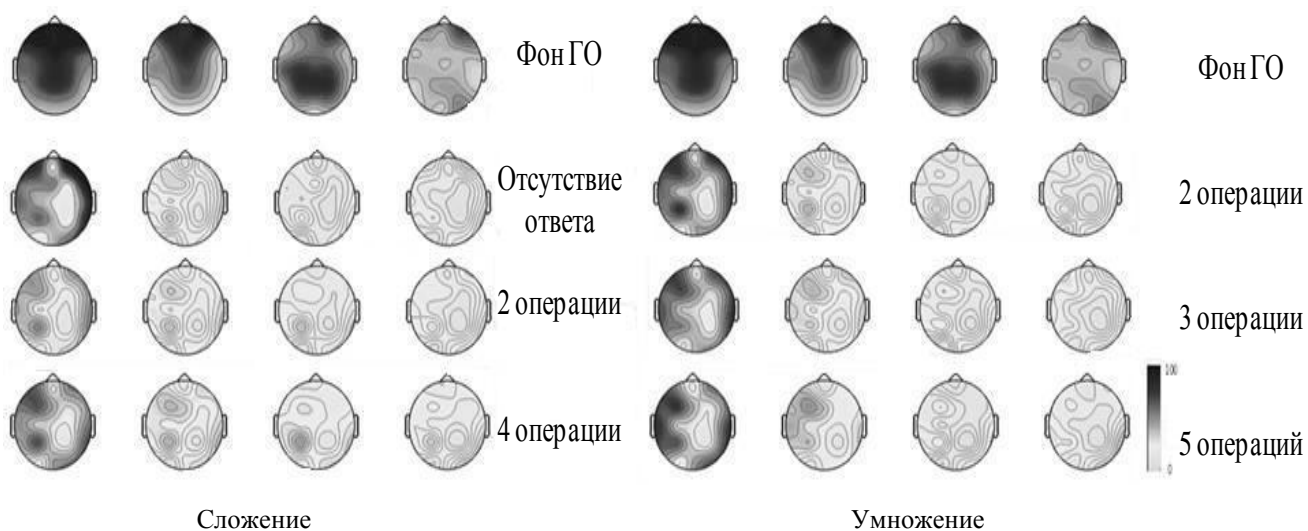


Рисунок 6. Распределение спектральных характеристик ЭЭГ по поверхности скальпа при поэтапном анализе (Тест 2). Обозначения как на рис. 5.

Следовательно, анализ динамики характеристик ЭЭГ позволил выявить, что задача на сложение характеризовалась более высокими значениями СМ дельта- и тета-диапазонов ЭЭГ и их диффузным распределением. Вероятно, наблюдается перераспределение и концентрация активности при умножении и перераспределение при сложении. Локализация фокусов ЭЭГ отражала протекание сходных процессов расчетов для примеров с разной структурой решения, модулирующегося числом операций, т.к. семантические сети

сложения и умножения взаимосвязаны (Campbell J., Thompson V.A., 2012). Локализация ряда фокусов ЭЭГ в лобной, теменной и височной зонах отражала вовлечение общемозговой сети, связанной с процессами памяти (медиальная височная доля, префронтальная кора) (Anderson K.L. et al., 2010). Отсюда различия между задачами отражали степень вовлечения системы рабочей памяти (S. Dehaene et al., 2003; Thevenot C. et al., 2010).

Начальная стадия «Чтение условия» сопровождалась характерной для задачи фронто-париетальной и межполушарной асимметрией. На стадии «Решение примера» усиление дельта-частот в левом полушарии и снижение в правом отражало избирательное подавление сети ментальной арифметики, приводящее к активации необходимой части когнитивных ресурсов (Dimitriadis S.I. et al., 2010). Усиление дельта-диапазона в лобных областях связывается с активацией фронто-таламической системы произвольного внимания, а распространение дельта-колебаний в теменные области - с активацией таламо-париетальной системы непроизвольного внимания (Мачинская Р.И., 2003; Posner M. I., Peterson S. E., 1990). Сходная локализация фокусов дельта- и тета-диапазонов может отражать их взаимодействие, что является временной основой активации механизмов рабочей памяти (Núñez-Peña M., 2008), поиска информации в долговременной памяти (De Smedt B., Voets B., 2010) и поддержанием уровня произвольного внимания (Núñez-Peña M., 2008). Тета- и дельта-фокусы в левых теменно-затылочных и нижних лобных зонах связаны с вовлечением фонологической петли рабочей памяти (Baddeley A., 1998-2001) и активации внутренней речи (De Smedt B., Voets B., 2010). Распространение тета-частот в левые височные зоны отражало кодировку информации в памяти (т.к. в эту область проецируется активность гиппокампа (Bastiaansen M., Nagoort P., 2003; Klimesch W. et al., 2005)), а в область дорсолатеральной префронтальной коры - ее координирующую роль (D'Esposito M., et al., 1995; Harmony T. et al., 1999). Локализация фокусов ЭЭГ в дельта- и тета-диапазонах в правом полушарии связана с пространственной оценкой чисел.

Исследование динамики пространственной синхронизации частотных диапазонов ЭЭГ на этапах решения. На рисунке 7 показана динамика КОГ при сложении в зависимости от стадии решения при интегральном анализе. Картина распределения связей КОГ сходна с паттерном фокусов ЭЭГ. В состоянии «Фон-ГО» распределение связей во всех диапазонах было билатерально симметричным. На стадии «Чтение примера» происходило формирование асимметрии КОГ в дельта-диапазоне в виде увеличения синхронизации между билатеральными височными (Т3-Т4), левыми лобно-теменными (F3-P3), лобно-височными (F3-T3) и правыми центрально-теменными (С4-Р4) областями. В тета-диапазоне увеличение межполушарной КОГ показано между центральными (С3-С4) и височными (Т3-Т4) отведениями, в левом - между лобно-теменными (F3-P3) и лобно-височными (F3-T3). В правом полушарии сохранялся фоновый уровень КОГ. Описанная картина асимметрии показана и в альфа-диапазоне в виде увеличения значений КОГ между лобно-теменными (F3-P3), лобно-височными (F3-T3) и теменно-височными (P3-T3) отведениями. Это связано с подготовкой к следующей стадии. В бета-частотах изменения не выявлены. На стадии «Решение примера» в диапазоне дельта-частот показано увеличение КОГ левой лобной и теменной областей (F3-T3), что не выявлено на предыдущей стадии. КОГ достоверно увеличивалась между левыми лобно-теменными (F3-P3), лобно-височными (P3-T3), правыми центральными и теменными (С4-Р4) и билатеральными височными зонами (Т3-Т4). В тета-диапазоне различия заключались в увеличении КОГ билатеральных височных (Т3-Т4), центральных (С3-С4) и теменных (P3-P4) отведений, левыми лобно-височными (F3-T3), лобно-теменными (F3-P3) и теменно-височными (P3-T3). Асимметрия КОГ сходна с таковой для предыдущего этапа, и продолжалась в альфа-диапазоне. В бета-диапазоне изменения были локализованы в правом полушарии в парах отведений Т4-О2, С4-Р4, Т3-Т4. На стадии «Отдых» фоновые значения КОГ восстанавливалась в правом полушарии.

При умножении в отличие от сложения для всех стадий дельта-КОГ была увеличена в височных (Т3-Т4) областях. На стадии «Чтение примера» уровень синхронизированности снижался между левой лобной и височной областями в альфа-и тета-диапазоне. На стадии «Решение примера» изменения связаны с тета-и альфа-частотами; в дельта-диапазоне сохранялась фоновая КОГ. На стадии «Отдых» значения КОГ были ближе к фоновым, чем для сложения.

При поэтапном анализе изменения КОГ показаны также в бета- и альфа-диапазонах. Эффективное решение приводило к увеличению КОГ в левом полушарии в тета- и бета-частотах для обеих задач и сопровождалась небольшими изменениями в сравнении с состоянием «Фон ГО». В обоих полушариях происходило увеличение уровня синхронизированности теменной, лобной и височной зон. Эффективное решение связано с отсутствием изменений альфа-диапазона, а неэффективное - с увеличением взаимодействий билатеральных височных зон, что не наблюдается для тета- и дельта-частот. Изменения в бета-диапазоне заключались в увеличении КОГ билатеральных центральных и височных зон. Сохранение фоновых значений КОГ отражало включенность процессов интеграции, на базе которых происходили вычисления (Цицерошин М.Н., 2000; Шеповальников А.Н., Цицерошин М.Н., 2007).

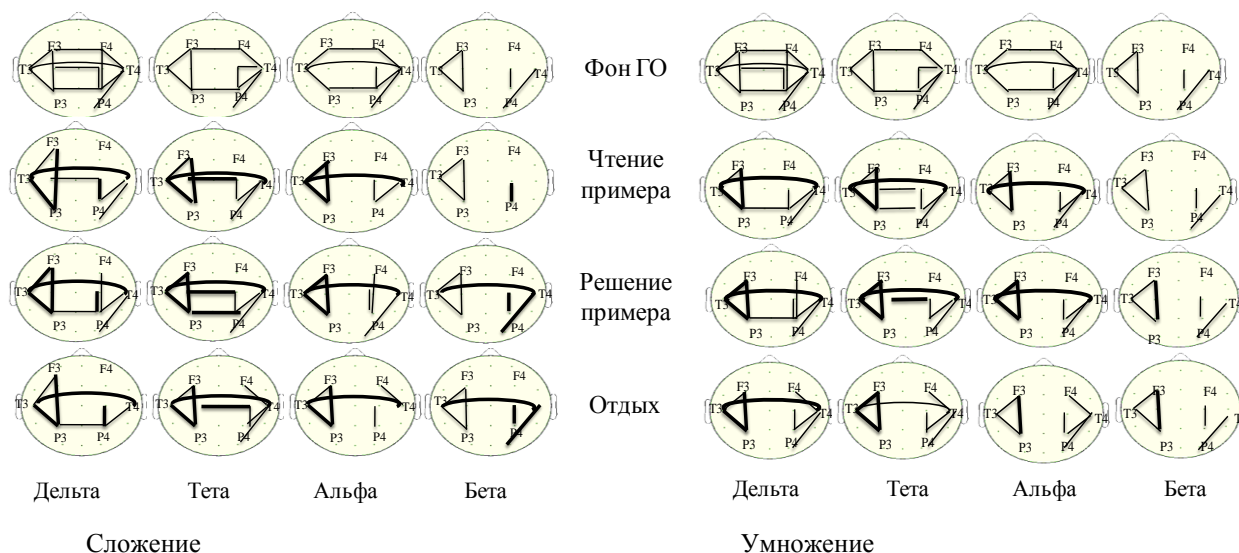


Рисунок 7. Динамика значений функции когерентности при выполнении примеров на сложение и умножение при интегральном анализе. Обозначения: толстыми линиями показано достоверное увеличение КОГ при выполнении задачи в сравнении с фоном, тонкими – фоновые значения КОГ.

Уменьшение количества связей при переходе от состояния «Фон-ГО» к решению являлось не снижением, а перераспределением уровня КОГ (Шеповальников А.Н., Цицерошин М.Н., 2007; Шарова Е.В. с соавт., 2009; Lee К.М., 2000; Domahs F. et al., 2005; Mihulowicz U. et al., 2014; Zhang X. et al., 2014 и др.), в особенности на стадии «Решение задачи». Сложные вычисления приводили к активацией вентральной зрительной системы и вовлечению фронто-таламической системы произвольного внимания (Костандов Э. А., Черемушкин Е.А., 2011). Асимметрия когерентности при решении объясняется доминированием левого полушария и притормаживанием структур правого (Разумникова О.М., 2007; Federmeier К.Д., Kutas М., 1999). Увеличение значений КОГ отражало актуализацию математических навыков в левом полушарии и пространственную оценку чисел в правом (Serrien D.J. et al, 2004). В соответствии с локализацией фокусов ЭЭГ, это связано со спецификой задач, требующих вовлечения дополнительных операций. Консолидация связей для лобно-височно-теменных отведений при интегральном анализе и височно-теменных при поэтапном рассматривается как характерное для решения мыслительных задач (Иваницкий Г.А. с соавт., 2002). Усиление височно-теменной связи в дельта- и тета-диапазонах на стадии «Решение примера» отражало оперирование семантическими конструкциями (Иваницкий Г.А. с соавт., 2002). Наличие в КОГ лобно-височной связи (F3-T3) отражало взаимодействие зоны Брока с левой зоной Вернике (Лурия А.Р., 2002; Menon V. et al., 2005) с формированием системы вербального кодирования чисел. Связь T3-T4 отражали координацию зон Вернике (De Smedt В., Voets В., 2010).

Усиление значений КОГ в альфа- и бета-диапазонах отражало активацию системы селективного внимания, сенсомоторной интеграции (Dehaene S. et al., 2003; Del Percio С. et al., 2009, 2010) и рабочей памяти (Jiang Z.Y. et al., 2008). Уменьшение альфа-синхронизации в передних и задних областях и увеличение связи F3-T3 на стадии «Решение примера» также связано с активацией лобно-теменной сети обработки чисел (Sauseng P. et al., 005). Усиление дистантных взаимодействий в тета- и альфа-полосе для любого количества операций (F4-

O2, C4-O2, P4-O2) обеспечивало зрительный контроль деятельности (Жаворонкова Л.А. с соавт., 2011), и облегчение обработки числовой информации (Костандов Э.А., Черемушкин Е.А., 2011; Summerfield C., Mangels J.A., 2005; Baddeley A. et al., 2011). Для арифметических задач наличие таких связей расценивается как признак формирования специализированных к задаче нейросетей (Цицерошин М.Н. с соавт., 2009; Mizuhara H., 2004; Dombrowe I., Hilgetag C.C., 2014). Смещение максимума изменений из дельта-диапазона при интегральном анализе в сторону тета- и бета-частот при поэтапном связано с усложнением деятельности добавлением нажатий на кнопку (Жаворонкова Л.А. с соавт., 2011). Это приводило к перераспределению КОГ в сторону быстрых частот (Жаворонкова Л.А. с соавт., 2011, De Rammelaere S. et al., 2001; De Rammelaere S., Vandierendonck A., 2002). Увеличение значений КОГ в правом полушарии для дистантных связей (особенно лобно-теменных), являлось признаком активации моторной программы (Жаворонкова Л.А. с соавт., 2011). Отсюда изменения бета-частот связаны также с корковым контролем ее выполнения (Жаворонкова Л.А. с соавт., 2011; Vysata O. et al., 2014).

Исследование динамики изопотенциальных карт компонентов ССП при реализации этапов решения. ССП, полученные на 1 и 2 операнды, отражал уровень локальной активации на стадии «Чтение примера». Для обеих задач при восприятии 1 операнда конфигурация ССП была сходна; для умножения различия заключались в увеличении амплитуды и снижении латентности компонентов. В достимульный период (-40-0 мс) в теменной области формировалась волна ожидания (CNV), при умножении сосуществовавшая с лобной О-волной. После подачи стимула появлялся компонент С100 и затылочный Р100 (с преобладанием негативности). Передний фронт N100 (120-180 мс) формировался в правой теменно-затылочной области в виде 2 фокусов. При умножении N100 был асимметричен. Одновременно в левой теменно-затылочной области возникал Р200, сливавшийся на 260-300 мс с теменным Р3б с образованием мощной позитивной волны с фокусом в теменных областях и распространением колебаний в передние области и

сообразованием P3a. На 380-420 мс N400 вытеснял позитивные колебания в левой лобной области. В постстимульный период в большинстве областей левого полушария формировалась мощная негативная волна, связанная с ожиданием знака операции. Распознавание 2 операнда сопровождалось увеличением амплитуды компонентов ССП. В достимульный период также существовала CNV. Значения амплитуд ранних компонентов P100, N100, P200 были выше. На 220-300 мс в лобных областях формировался отсутствовавший при распознавании 1 операнда N200 со сдвигом влево. На 340-400 мс в теменных областях формировался P3б, а в лобных - P3a; асимметричный P300 существовал на 100 мс дольше. В постстимульный период в теменных областях также формировалась мощная негативная волна.

Следовательно, анализ динамики амплитудно-временных характеристик ССП показал, что начальный этап решения задачи модулируется ее содержанием и необходимостью удержания в памяти первого операнда. Увеличение амплитуды CNV, P3б, N400 и негативного колебания в постстимульный период наблюдалось при решении обеих задач, и было более выражено при умножении. В левом полушарии выявлено доминирование негативных компонентов, а в правом – позитивных. Сходный набор компонентов связан со свойством волн ССП сохранять устойчивость при решении однотипных задач (Dong X. et al., 2007). Можно предполагать протекание на начальном этапе единых процессов, модулирующихся произвольным вниманием. Первый операнд являлся предупреждающим, а второй - императивным, запускающим процесс решения.

Формирование в каждой пробе CNV было обусловлено процессом ожидания стимула и концентрации внимания на нем ввиду данной инструкции. Это отражает подготовку мозговых структур к анализу стимула за счет активации таламо-париетальной системы произвольного внимания (Posner M.I., Peterson S.E., 1990). Увеличение значений амплитуды CNV и распространение в передние области при решении задач на умножение, и при восприятии 2 операнда связано с активацией фронто-таламической системы

произвольного внимания (Posner M.I., Peterson S.E., 1990). Увеличение амплитуды ранних компонентов при распознавании 2 операнда в сравнении с первым подтвердило возможность их модуляции семантическими процессами. Это согласуется с рядом работ (Fu S. et al., 2005, 2010; Ding Y. et al., 2014), в которых модуляция CNV-C100-P100 связывается с увеличением уровня локальной активации при взаимодействии процесса решения и вовлечения обеих систем внимания. Последовательная активация систем внимания проявлялась в миграции позитивных и негативных компонентов.

Увеличение амплитуды P300 при умножении и при восприятии первого операнда связано с перераспределением ресурсов произвольного внимания при необходимости обновления рабочей памяти (Hillman C. H. et al., 2012). Увеличение амплитуды P3a отражало вовлечение структур, связанных с рабочей памятью и тормозным когнитивным контролем (Kamarajan C. et al., 2005; Polich J., 2007; Yue C. et al., 2008; Jasinski E.C., Coch D., 2012), а P3b - с активацией и координацией таламо-париетальной системы внимания (Polich J., 2007). Формирование N400 при распознавании 1 операнда подтверждает роль этого фрагмента как предупреждающего (Galfano G. et al., 2004), связанного с актуализацией алгоритма решения и активационного когнитивного контроля (Niedeggen M. et al., 1999; Hinault T. et al., 2014). Возникновение N400 расценивается как изменение локальной активации передних областей за счет вовлечения арифметической ассоциативной сети (Niedeggen M. et al., 1999; Galfano G. et al., 2004; Duyck W. et al., 2008) и дополнительной активации в системе рабочей памяти (Niedeggen M. et al., 1999; Galfano G. et al., 2004; Zhou X. et al., 2006 -2011). Поскольку локализация компонентов ССП была сходна с таковой для фокусов диапазонов ЭЭГ, это отражало последовательную активацию лобно-теменной сети ментальной арифметики, и преднастройку алгоритма при высокой мыслительной нагрузке (Gontier E. et al., 2007).

На основании полученных результатов была предложена схема (рисунок 8), иллюстрирующая роль общей и локальной активации при решении задач.

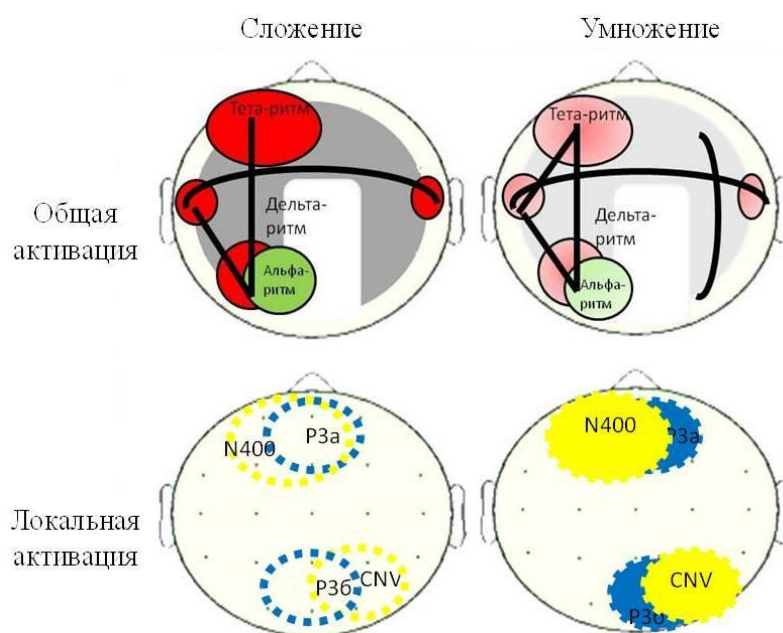


Рисунок 8. Схема соотношения общей и локальной активации при решении обеих задач

Из схемы следует, что, по результатам анализа значений спектральных характеристик и КОГ ЭЭГ уровень общей активации был выше при выполнении сложения. Основная роль в формировании картины ее распределения предполагается для неспецифических структур (Жирмунская Е.А., 1991). Локализация фокусов максимальной выраженности дельта-, тета- и бета-диапазонов при поэтапном анализе отражала активацию фронтоталамической системы произвольного внимания, подкорковых структур, зон ментальной арифметики в теменных областях, лобно-височных областей, и рабочей памяти, вовлечение которой отражалось в перекрывании активации префронтальной и теменной областей. Формирование «треугольника связей» в левом полушарии, к которому приурочены фокусы дельта- и тета-диапазонов, отражало поэтапное вовлечение указанных зон.

Локальная активация, связанная с вовлечением таламо-кортикальных путей, и отражавшаяся в значениях амплитуд компонентов CNV, P300, N400, была более выражена при выполнении умножения. В формировании специфичной для задач картины локальной активации коры происходило вовлечение избирательного нейронного ингибирования (Polich J., 2007; Hillman C. H. et al., 2012). Предполагается возможность модуляции P300 тета- и альфа-частотами ЭЭГ как отражение процессов регуляции произвольного внимания и

рабочей памяти (Polich J., 2007). CNV рассматривается как признак коркового возбуждения при активации произвольного внимания, ожидания 2 операнда (Nagai Y. et al., 2004) и запуска процесса решения. Увеличение амплитуды CNV и P3a связано с активацией соматосенсорной, островковой, цингулярной областей коры (Nagai Y. et al., 2004) и ретикулярных ядер таламуса, взаимодействия которого с корой являются механизмом регуляции произвольного внимания (Guillery R.W. et al., 1998) и периферической активации (Nagai Y. et al., 2004). Отсюда увеличение P300 опосредовано избирательным вовлечением систем внимания и рабочей памяти на начальной стадии (Nagai Y. et al., 2004). Динамика N400 опосредована активацией лобно-теменной сети ментальной арифметики, рабочей памяти (Galfano G. et al., 2004; Zhou X. et al., 2006, 2007; Duyck W. et al., 2008; Luo W. et al., 2009; Moore R.D. et al., 2014 и др.) и активационного когнитивного контроля (Niedeggen M. et al., 1999; Hinault C. H. et al., 2014).

ВЫВОДЫ:

1. При интегральном анализе время и качество решения примеров на сложение не зависели от повтора примера и идентичности операндов. При умножении данные факторы приводили к снижению времени решения и увеличению процента правильных ответов.
2. При поэтапном анализе время решения линейно зависело от количества операций при сложении и имело куполообразную зависимость при умножении. Эффективность решения примеров на сложение определялось количеством операций, а на умножение – их длительностью.
3. При интегральном анализе в ЭЭГ формировались 4 фокуса активации, присутствующие во всех исследуемых диапазонах. В диапазоне дельта- и тета-частот фокусы максимальной выраженности приурочены к лобным, теменным и височным зонам левого полушария, правым лобным и теменным. В альфа-диапазоне показана асимметрия активации за счет увеличения СМ ЭЭГ в левой лобной, височной и теменно-затылочных зонах. В бета-диапазоне показано увеличение спектральной мощности в левом полушарии.

4. При поэтапном анализе показаны различия динамики значений спектральной мощности ЭЭГ в зависимости от количества этапов решения. Для обеих задач эффективное решение сопровождалось небольшими изменениями ЭЭГ и КОГ в сравнении с неэффективным. При сложении минимальные значения СМ ЭЭГ показаны для решения примеров в 2 этапа, при умножении – в 2 и 3. Максимальные значения при сложении показаны при решении в 1 и 4 этапа, при умножении – в 1, 5 и при отсутствии ответа.

5. При анализе значений функции когерентности показано формирование специфической асимметричной картины активации и синхронизации уже на начальной стадии решения. На всех стадиях показано увеличение значений КОГ между билатеральными височными отведениями. При сложении изменения были локализованы в дельта- и тета-частотах между левыми лобно-теменными и лобно-височными областями, и правыми центрально-теменными областями. При умножении различия заключались в локализации изменений в тета-и альфа-частотах, концентрации связей в левом полушарии, и усилении взаимодействий височных зон.

6. Начальная стадия решения, отражавшаяся в ССП, зарегистрированном на каждый операнд, была сходна для обеих задач. Локализация фокусов максимальной выраженности компонентов ССП была сходна с таковой для ритмических диапазонов ЭЭГ. Увеличение амплитуды CNV, компонентов P3, N400 и негативного колебания в постстимульный период наблюдалось при решении обеих задач, и было более выражено при умножении.

Список работ по теме диссертации

Статьи в ведущих научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. Богун А.С. Некоторые особенности ЭЭГ школьников при интеллектуальной нагрузке различного содержания / Иваницкая Л.Н., Богун А.С. // Валеология.- 2007.- №3.- с. 68-77.
2. Богун А.С. Исследование нейрофизиологических механизмов процесса распознавания простых вербальных и невербальных стимулов / Айдаркин Е.К., Богун А.С.// Валеология.- 2009.- № 4.- с. 66-80.

3. Богун А.С. Отражение реализации арифметического навыка в динамике уровня когнитивного напряжения и ЭЭГ в условиях параллельного выполнения двух задач / Айдаркин Е.К., Богун А.С., Щербина Д.Н. // Валеология.-2010.- № 3.- с 33-48.
4. Богун А.С. Нейрофизиологические механизмы решения примеров на умножение и сложение двузначных чисел/Айдаркин Е.К., Богун А.С // Валеология-2010.-№ 4.-с.77-100.
5. Фомина А.С Психофизиологические особенности решения арифметических примеров на сложение и умножение двузначных чисел / Айдаркин Е.К., Фомина А.С//Валеология.-2011.- № 3.- с. 85-98.
6. Фомина А.С Исследование динамики пространственной синхронизации биопотенциалов мозга при решении сложных арифметических примеров/ Айдаркин Е.К., Фомина А.С // Валеология.- 2012.- № 3.- с. 91-106.
7. Фомина А. С. Разработка метода оценки эффективности деятельности при решении арифметических задач/Айдаркин Е.К.,Фомина А.С// Валеология.-2013 г.-№ 3.- с 100-112.
8. Фомина А.С. Хронометрия самостоятельной работы студентов при выполнении вербальных и образных заданий на компьютере для оценки уровня сформированности образовательных компетенций / Айдаркин Е.К., Щербина Д.Н., Фомина А.С., Кундупьян О.Л., Кундупьян Ю.Л. //Валеология.- 2014.- № 3.- с.96-104

Статьи в журналах, входящих в базу данных Scopus и Web of Science

9. Bogun A.S. Influence of simple verbal and non-verbal stimuli on the brain electrical activity / Aydarkin E. K., Bogun A.S // Journal of Integrative Neuroscience.- 2009 - №4. - PP 417-424
10. Fomina A. S. Neurophysiological mechanisms of complex arithmetic task solving / Aydarkin E. K., Fomina A. S. // Journal of Integrative Neuroscience. - 2013 г. - № 1. - pp. 73-89.

Сертификаты на электронные учебные пособия

11. Богун А.С. Нейрофизиологические механизмы выполнения мыслительных операций при решении арифметических задач/ Айдаркин Е.К., Щербина Д.Н., Богун А.С. // Свид-во о регистрации электронного ресурса.- № 14082.- 13.07.2009 г.
12. Фомина А.С. Основы нейрофизиологии: сборник вопросов и задач/Айдаркин Е.К., Фомина А.С.//Свид-во о регистрации электронного ресурса-№ 19439 - 07.08.2013 г.
13. Фомина А.С. «Общие вопросы физиологии ЦНС и сенсорной физиологии» / Кундупьян О.Л., Фомина А.С. // Свид-во о регистрации электронного ресурса.-№ 20535.-20.11.2014г.

Работы, опубликованные в других изданиях

14. Богун А.С. Особенности изменения общей и локальной активации мозга при параллельном выполнении двух видов деятельности различного содержания / Богун А.С. // Тез. докл. XV Междун. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов».- Москва-2008- с 216-217.

15. Богун А.С. К вопросу от разработке систем предотвращения ошибок человека-оператора/ Щербина Д.Н., Богун А.С. // Тез. докл. Третьей международной конференции по когнитивной науке. Москва - 2008. – с. 502-503.
16. Богун А.С. Нейрофизиологические механизмы процесса дифференцировки вербальных и невербальных стимулов при разном числе альтернатив / Богун А.С // Тез. докл. Четвертой международной конференции по когнитивной науке – Томск.-2010.–с. 502-503.
17. Богун А.С. Исследование нейрофизиологических механизмов процесса решения примеров на умножение и сложение двузначных чисел / Богун А.С // Тез. докл. XVII Междун. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». - Москва. - 2010.- с. 217.
18. Богун А.С. Изучение нейрофизиологических коррелятов анализа числовых стимулов / Богун А.С. // Тез. докл. XXI Съезда Физиологического общества им. И.П. Павлова.- Калуга.- 2010 -с.74
19. Богун А.С. Изучение динамики межполушарной асимметрии мозга при решении примеров с двузначными операндами / Айдаркин Е.К., Богун А.С. // Тез. докл. Всеросс. конференции «Современные направления в исследовании функциональной межполушарной асимметрии и пластичности мозга.- Москва.- 2010.-с 62-67.
20. Богун А.С. Изучение нейрофизиологических механизмов, определяющих структуру решения примеров с двузначными числами /Богун А.С.//Тез.докл. XVIII Междун. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых«Ломоносов»-Москва-2011-с. 201.
21. Фомина А.С. Исследование динамики пространственной синхронизации потенциалов мозга при решении арифметических задач разного уровня сложности/ Фомина А.С. // Тез. докл. XIX Междун. научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». - Москва. - 2012 г. – с. 212-211.
22. Фомина А.С. Исследование нейрофизиологических коррелятов решения арифметических примеров с двузначными числами /Фомина А.С.// Тез. докл. 8-междун. междисцип. конгресса «Нейронаука для медицины и психологии».- Судак. – 2012 .- с.415.
23. Фомина А.С. Исследование нейрофизиологических механизмов решения сложных арифметических примеров / Фомина А.С. // Тез. докл. Пятой междун конференции по когнитивной науке. - Калининград.- 2012. – с. 708-710.
24. Fomina A.S. The investigation of the neurophysiologic mechanisms of the complex arithmetic task's decision / Fomina A.S., Aydarkin E.K. // Тез. докл. XVI Междун. конференции по нейрокибернетике. -. Ростов-на-Дону.- 2012. – с. 418-421.
25. Фомина А.С. Исследование нейрофизиологических коррелятов решения математических задач в условиях произвольной и обусловленной стратегии / Фомина А.С. // Тез. докл. XX

Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов».
- Москва.- 2013. – с. 261-262.

26. Фомина А.С. К вопросу о нейрофизиологическом обеспечении решения арифметических примеров на сложение и умножение / Айдаркин Е.К., Фомина А.С. // Тез. докл. XXII Съезда Физиологического общества им. И.П. Павлова. – Волгоград. - 2013.- с.13-14.
27. Фомина А.С. К вопросу о нейрофизиологическом обеспечении процесса решения сложных арифметических примеров на сложение и умножение / Айдаркин Е.К., Фомина А.С. // Тез. докл. 9-й междунар. междисциплинар. конгресса «Нейронаука для медицины и психологии». - Судак.- 2013 г. – с.47-48
28. Фомина А.С. Решение арифметических примеров на умножение в условиях парадигмы двойных задач / Фомина А.С // Тез. докл. XXI Междунар. научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». - Москва.- 2014. - с. 279.
29. Фомина А.С. Исследование специфики поэтапного решения арифметических примеров в условиях добавочной деятельности / Айдаркин Е.К., Фомина А.С. // Тез. докл. 10-й Юбил. Междунар. междисциплинар. конгресс «Нейронаука для медицины и психологии».- Судак. - 2014. – с. 98-99.
30. Фомина А.С. Исследование особенностей решения арифметических примеров и уровня когнитивного напряжения / Фомина А.С. // Тез. докл. Шестой междунар. конференции по когнитивной науке.- Калининград.- 2014 г. - с.601-603.
31. Фомина А.С. Нейрофизиологические механизмы решения арифметических примеров в условиях добавочной деятельности /Фомина А.С.// Тез. докл. IV Съезда физиологов СНГ. - Сочи.- 2014. - с.48.
32. Фомина А.С. Исследование нейрофизиологических коррелятов когнитивных процессов при решении сложных математических примеров / Фомина А.С. // Тез. докл. XXII Междунар. научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». - Москва.- 2015 г. - с. 303-304.
33. Фомина А.С. Психофизиологические корреляты поэтапного решения сложных математических примеров / Айдаркин Е.К., Фомина А.С.// Тез. докл. 11 Междунар. междисциплинар. конгресса «Нейронаука для медицины и психологии».- Судак.-2015 г.- с . 49.

Список сокращений

ВРеш – время решения

КРеш – качество решения

ССП – связанный с событием потенциал

СМ ЭЭГ – спектральная мощность ритмических диапазонов ЭЭГ

КОГ – функция когерентности ЭЭГ