

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛОБНО-ЗАТЫЛОЧНОЙ И БИЛАТЕРАЛЬНОЙ АСИММЕТРИИ В УСЛОВИЯХ СЕНСОМОТРОНОЙ ИНТЕГРАЦИИ**

*Айдаркин Е.К., Павловская М.А.*

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

[aek@sfedu.ru](mailto:aek@sfedu.ru)

Современная операторская деятельность с использованием психофизиологических экспериментальных парадигм базируется на решении сенсомоторных задач, состоящих из периодически повторяющихся элементарных реакций, включающих в себя ряд стадий: ожидание пускового стимула, его восприятие, принятие решения в соответствии с инструкцией, подготовка и реализация требуемой двигательной реакции, оценка эффективности выполненной реакции [1]. Каждая из указанных стадий обеспечивается рядом когнитивных функций, наиболее изученной из которых и включенной во все этапы сенсомоторной интеграции (СМИ), является произвольное и непроизвольное внимание [2], обеспечивающее механизмы локальной активации и деактивации корковых структур, участвующих в организации, реализации и модификации СМИ. Особенности взаимодействия этих двух видов внимания определяются лобно-затылочным (лобная и теменная системы внимания) и билатеральным (межполушарные отношения) взаимодействием. Лобная и левополушарная системы доминируют в организации произвольных процессов, теменная и правополушарная – непроизвольных [3]. В настоящее время достаточно глубоко изучен каждый из этих механизмов, но отсутствуют публикации об особенностях их взаимодействия в процессе реализации СМИ. Последовательная смена стадий СМИ приводит к изменению баланса лобно-затылочной и билатеральной асимметрии, которая эффективно может быть оценена при анализе динамики изопотенциальных карт ССП в условиях изменения физических параметров и значимости стимулов, что и явилось целью настоящей работы.

Каждый испытуемый проходил обследование в нескольких тестовых процедурах с использованием зрительных и слуховых стимулов: а) пассивное восприятие; б) простая сенсомоторная реакция (СМР); в) сложная СМР различения зрительных и слуховых стимулов (choice reaction). В качестве зрительных стимулов применялись вспышки красного светодиода яркостью свечения 9 Кд. Расстояние от источника стимуляции до поверхности глаза составляло 70 см. Слуховыми стимулами служили щелчки длительностью 1 мс и интенсивностью 60 дБ, которые предъявлялись одновременно двумя динамиками, располагающимися в 5 см от каждого уха,

соответственно. При реализации сенсомоторных реакций в зависимости от вида задания испытуемый должен был нажимать соответствующей рукой на клавиши манипулятора типа «мышь». В каждой серии предъявлялось 60-120 стимулов при средней частоте стимуляции 0,5; 1; 2; 4; 8 и 16 с и девиацией от средней частоты 20%, интервал между сериями составлял 30-40 с. Для активации произвольного внимания использовалась тестовая «odd-ball» процедура, где в качестве редких и частых использовались пары разномодальных стимулов (зрительные и слуховые), вероятность которых была 0,85; 0,15 и 0,5. Выбор и реализация режимов стимуляции, регистрация ЭЭГ и времени реакции (ВР) осуществлялись при помощи компьютерного энцефалографа-анализатора «Энцефалан – 131-03» (изготовитель - НПКФ «Медиком - ЛТД», г. Таганрог). При этом регистрировалась ЭЭГ-активность головного мозга в 21 стандартном отведении (система 10-20) с шагом дискретизации 4 мс и частотой пропускания 0,5–70 Гц относительно объединенных ушных электродов. Индифферентный электрод располагался на лбу. Оцифрованная ЭЭГ и ВР экспортировались в MATLAB, где получали суммарные ССП (эпоха анализа 1000 мс – 100 мс до и 900 мс - после стимула) и проводилась их дальнейшая обработка.

Исследование зависимости ВР от физических параметров и значимости чередующихся в серии пусковых стимулов (всего альтернатив  $N$ ), выявило следующее соотношение [1]:

$$В P_i = k_i \lg \frac{T_i}{I_i - I_{i0}} + b_i \quad (1)$$

где  $В P_i$  – время реакции на  $i$ -й вариант стимул;  $k_i$  – коэффициент пропорциональности, определяющийся модальностью  $i$ -го стимула;  $T_i$  – интервал между предшествующим и текущим одинаковыми ( $i$ -ми) стимулами;  $I_i$  – интенсивность  $i$ -го стимулами;  $I_{i0}$  – порог восприятия  $i$ -го стимула, характеризующий функциональное состояние испытуемого;  $b_i$  – свободный член, определяющийся субъективной сложностью (значимостью)  $i$ -го стимула.

Было показано, что  $b_i$  может определяться формулой Хика-Нормана

$$b_i = a_i \lg(N + 1) \quad (2)$$

где  $a_i$  - коэффициент субъективной сложности  $i$ -го стимула, который ниже для ведущей руки.

Сравнение последовательных изопотенциальных карт ССП (рис. 1 и 2) показало, что их конфигурация в значительной степени зависит от стадии реализации СМИ и характеризуется различной лобно-затылочной и билатеральной асимметрией.

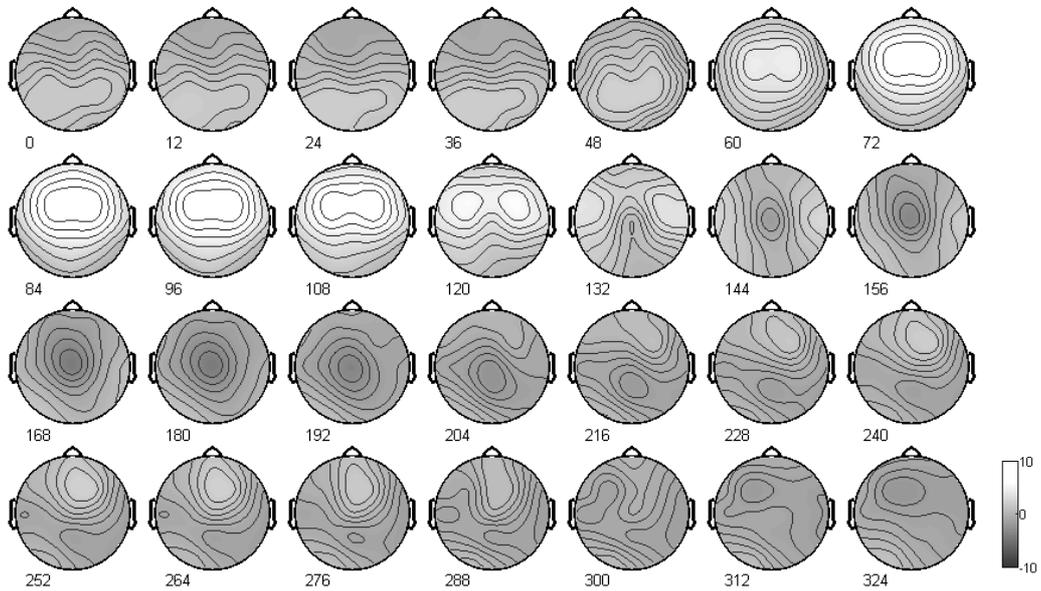


Рисунок 1 - Динамика изопотенциальных карт в условиях экспериментальной парадигмы odd-ball на частый слуховой стимул

Белым цветом показана негативность, темным – позитивность. Цифры под каждой картой – время ее возникновения от момента подачи стимула в мс.

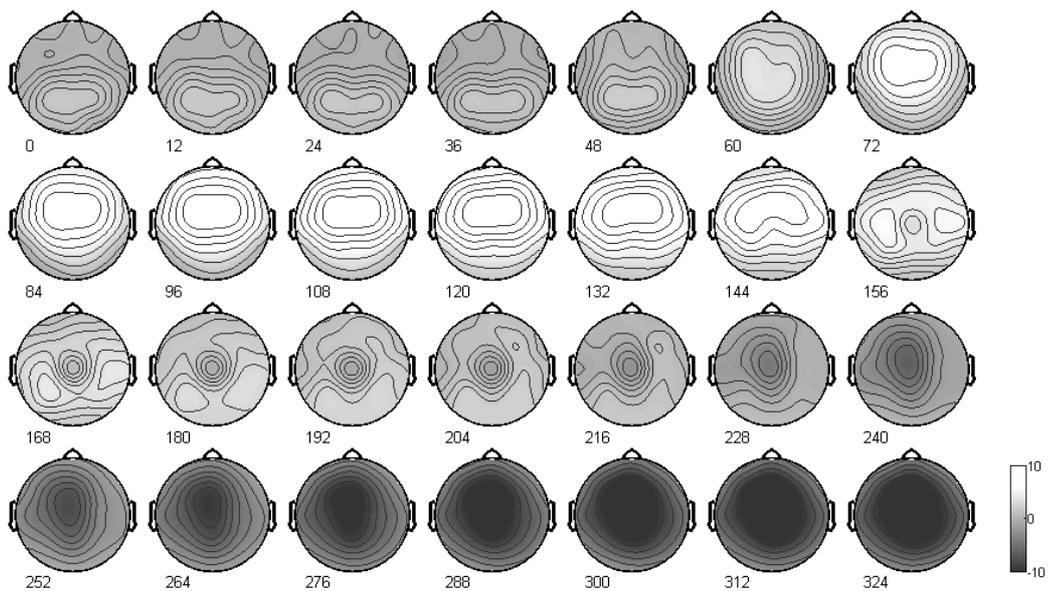


Рисунок 2 - Динамика изопотенциальных карт в условиях экспериментальной парадигмы odd-ball на редкий слуховой стимул.

Из рисунков 1 и 2 видно, что для стадии ожидания характерна активация теменно-центральных областей, с сагиттально представленным фокусом максимальной выраженности (ФМВ) негативных потенциалов в виде контингентной Е-волны. При увеличении интенсивности стимула ФМВ усиливается, но при формировании дискомфортных и болевых ощущений видоизменяется в положительное Е-колебание. При увеличении МСИ негативный ФМВ смещается в теменно-затылочном направлении. Слуховые стимулы при увеличении МСИ дополнительно приводят к формированию позитивного ФМВ в лобной области. Усложнение задачи связано с формированием из сагиттального ФМВ двух симметричных ФМВ в относительно простых тестовых процедурах или асимметричных (количественно – по амплитудным показателям и/или качественно – по локализации) ФМВ в сложных экспериментальных ситуациях.

Стадия восприятия (передний фронт волны N1) в значительной степени зависит от модальности стимуляции (на рис. 1 и 2 интервал 60-120 мс). При зрительном воздействии негативный ФМВ увеличивался по амплитуде и смещался в теменно-затылочном сагиттальном направлении, а при слуховом - в лобном. Рост интенсивности увеличивал амплитуду и укорачивал пиковый латентный период данного ФМВ, увеличение МСИ также приводило к усилению амплитуды с одновременным увеличением латентного периода. Усложнение СМИ сочетает в себе указанные выше тенденции.

Стадия принятия решения (задний фронт волны N1, негативность рассогласования - НР, Р2) также определяется в первую очередь модальностью стимула (на рис. 1 и 2 интервал 120-180 мс) и характеризуется переходом от сагиттальных негативных ФМВ к латерализованным. При слуховой стимуляции лобный негативный ФМВ, сформированный на этапе восприятия, расщепляется на 2 латеральных, которые смещаются в височные области соответствующих полушарий. При зрительной стимуляции билатеральные негативные фокусы мигрируют в теменно-верхневисочные области обоих полушарий. Увеличение интенсивности стимуляции практически не влияет на указанную динамику. Рост МСИ, наоборот, приводит к усилению амплитуд латерализованных фокусов. Усложнение СМИ связано с дополнительным проявлением количественной и качественной асимметрии латерализованных негативных ФМВ. Конфигурация изопотенциальных карт ССП на данном этапе совпадает с таковой на стадии ожидания. Параллельно с развитием компонента Р2, формируется сагиттальный позитивный ФМВ в лобных областях.

Стадия подготовки и реализации сенсомоторной реакции (компоненты N2 и P3) характеризуется преобладанием позитивных компонентов и начинается с перемещения сагиттального лобного позитивного фокуса (компоненты P2, P3a) в теменную область и последующим его симметричным или асимметричным расщеплением на два фокуса (компонент P3б) с параллельным формированием сагиттального негативного ФМВ в лобном отделе (компонент N2). Рост интенсивности усиливает компонент P2 и ослабляет компоненты P3. Рост МСИ, усложнения СМИ, влияет противоположным образом, одновременно усиливая компонент N2. Данная динамика слабо зависит от модальности стимула, однако, при зрительном воздействии преобладающими являются процессы, связанные с теменными и чаще асимметричными позитивными процессами (компонент P3б), для слухового - с лобными сагиттальными ФМВ (P2, N2, P3б). Часто латерализованные позитивные ФМВ совпадают по локализации и выраженности с негативными ФМВ, регистрируемыми на этапе принятия решения.

Моторный ССП, как правило, маскируется сенсорными ССП. Но, как показано в наших исследованиях [4], он представляет собой довольно сложный процесс, зависящий от латерализации двигательной реакции. ССП регистрируется на нажатие (on-реакция) и отжатие (off-реакция) клавиши, а длительность ее удержания варьирует от 200 до 400 мс. В связи с этим моторные ССП представляют собой суперпозицию on- и off- ответов, каждый из которых состоит из асимметричного тонического негативного потенциала готовности, асимметричного фазического негативного моторного компонента, симметричного позитивного реафферентационного компонента и симметричного позднего компонента, которые регистрируются в лобно-центральных областях. Анализ динамики ФМВ характеризуется развитием противофазных компонентов в теменно-затылочных областях.

На стадии оценки эффективности выполненной СМИ (задний фронт волны P3б, контингентная O-волна, позднее негативное колебание) характеризуется формированием двух сагиттальных ФМВ – негативного лобного (O-волна) и позитивного теменного (P3б). Данный процесс не зависит от интенсивности и модальности, а больше изменяется при варьировании МСИ и сложности СМИ. В особо сложных тестах формируются одновременно 2 негативных ФМВ – лобный (O-волна) и теменной (поздняя негативная волна).

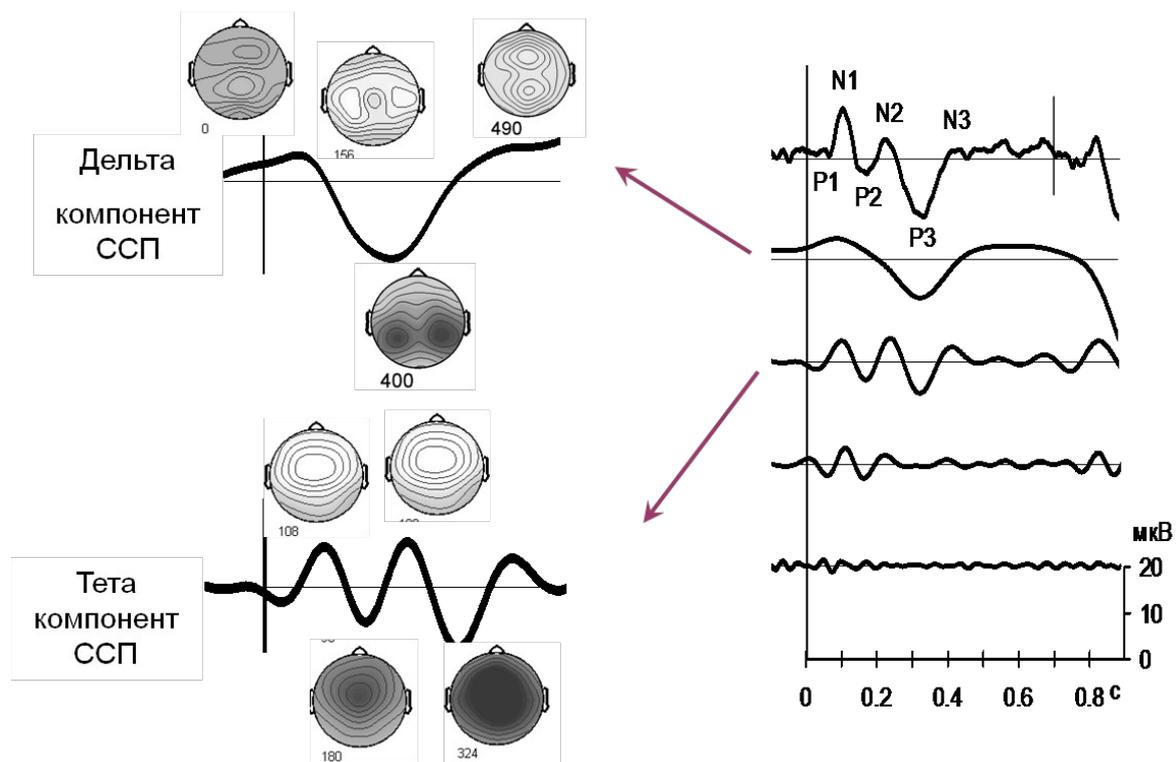
Следовательно, в простых СМИ преобладает последовательная динамика ФМВ в сагиттальном направлении, отражая лобно-затылочные отношения. Усложнение сенсорного стимула, инструкции, двигательной реакции приводит к возникновению

билатеральных фокусов, которые часто являются результатом расщепления сагиттальных ФМВ. Наибольшая билатеральная асимметрия выражена на этапах принятия решения и ожидания пускового стимула.

Попытка проследить вклад корковых и подкорковых структур в организацию СМИ основывался на предположении, что ССП представляет собой суперпозицию активности ритмических ЭЭГ-генераторов (дельта, тета, альфа и бета) и показал (рис.3), что:

- тета колебания больше связаны с формированием компонентов N1, P2, N2, P3a и лежат в основе лобно-центральных отношений, формируя лобно-затылочный градиент, который, вероятно, связан с анализом специфической информации.

- дельта колебания связаны с формированием E- и O-волн, NP, P3b, поздней негативной волны и определяют в основном билатеральные взаимоотношения, связанные с модуляционными неспецифическими процессами локальной активации.



Полученные результаты ВР, показывают их существенную зависимость от:

- интенсивности пусковых стимулов, что отражает, в первую очередь, закон силовых отношений, который определяет распределение ресурсов внимания;

- МСИ, при увеличении которого растет вклад ориентировочной реакции, усиливая процессы непроизвольного внимания;

- модальности, что связано с изменением доминирования произвольного (зрительная стимуляция) и непроизвольного (слуховое воздействие) внимания;
- сложности СМИ, которая связана с увеличением количества когнитивных операций и возможных альтернатив.

В связи с этим различная латерализация механизмов произвольного и непроизвольного внимания, восприятия, принятия решения, двигательной реакции в конкретных альтернативах СМИ обеспечивает их оптимальную (или неоптимальную) интерференцию, которая в значительной мере определяет ВР.

На стадии ожидания за счет повышения возбудимости теменно-центральных структур (теменная система внимания, двигательные центры) формируется предпусковая СМИ с усилением асимметрии негативных ФМВ, что обеспечивает адекватное распределение ресурсов произвольного и непроизвольного внимания при ее усложнении. Для повышения эффективности СМИ (снижения количества ложных тревог) наблюдается притормаживание лобной системы внимания. Если пусковой стимул, в силу разных причин, должен игнорироваться (дискомфортная интенсивность, прямая маскировка и т.д.), то формируется позитивная Е-волна центрально-теменных областях, которая с одной стороны, повышает пороги восприятия пускового стимула, с другой – по принципу посттормозной отдачи - усиливает процессы, лежащие в основе принятия решения и формирования двигательного ответа, что может приводить к более короткому ВР, по сравнению с реакцией на оптимальный по интенсивности стимул [5].

Данный комплекс предпусковой интеграции разрушается на стадии восприятия в результате прихода информации о пусковом стимуле и формирования в соответствии с циклической теорией восприятия [6] ощущения о нем (его образа) в анализаторных структурах (интервал 130-180 мс). Данный процесс на первом этапе организуется за счет взаимодействия лобной и теменной систем внимания и формированием асимметричных негативных ФМВ в анализаторно-верхневисочных структурах – на втором.

Далее на стадии принятия решения (сенсорного, семантического, моторного и т.д.) восстанавливается исходная СМИ, наблюдаемая на стадии ожидания. Принятия решения характеризуется максимальной билатеральной асимметрией. Затем развиваются глобальные тормозные процессы (компоненты Р3а, Р3б) [1, 2, 4, 7], которые уменьшают количество степеней свободы и максимизируют ресурсы внимания на реализации уже подготовленной в период ожидания требуемой в соответствии с инструкцией двигательной реакции, которая слабо отражается в сенсорном ССП.

Однако в моторных ССП наблюдается четкая смена лобно-теменных и билатеральных отношений, которые возникают при нажатии клавиши, ее удержании и отжатии, что требует длительного времени (200-400 мс). Этап согласования (или наложения) сенсорного и моторного решения, вероятно, связан с формированием лобного негативного тета-фокуса (компонент N2).

Этап оценки эффективности выполнения СМИ происходит на этапе посттормозной отдачи после компонента РЗб и характеризуется развитием позднего негативного колебания, которое по своей сути является О-волной, сагиттальный негативный ФМВ которой находится в лобной области. При усложнении СМИ одновременно может возникать и Е-волна с ФМВ в теменно-центральной области. Их одновременное сосуществование (лобно-затылочная асимметрия), вероятно, является оптимальным для принятия решения об оптимальности выполнения текущей тестовой процедуры.

Таким образом, оптимальная реализация сенсомоторной реакции требует воспроизведение в достаточно полном виде требуемой СМИ на этапе ожидания с максимальным распределением ресурсов внимания. На этапе восприятия пускового стимула механизмы непроизвольного внимания разрушают исходную СМИ, переключая основные ресурсы произвольного внимания на его анализ, принятие решения, что в конечном счете восстанавливает исходную, сформированную на стадии ожидания СМИ, которая на фоне глобального торможения, снижающего количество степеней свободы, реализует требуемую двигательную реакцию. Увеличение интенсивности пускового стимула вводит оборонительные компоненты, которые деформируют исходную СМИ. Увеличение МСИ разрушает ее и требует дополнительных ресурсов для восстановления. Зрительная стимуляция требует перераспределения ресурсов внимания в пользу произвольного, звуковая – непроизвольного. Усложнение тестовой процедуры – приводит к увеличению количества операций и связей между ними, усложняя динамику последующих стадий СМИ, которые реализуется на базе динамичного перераспределения ресурсов произвольного и непроизвольного внимания, на основе взаимодействия нейрофизиологических механизмов лобно-затылочной и билатеральной асимметрии.

Список цитируемой литературы:

1. Айдаркин Е.К. Нейрофизиологические механизмы непроизвольного внимания в условиях сенсомоторной интеграции // Валеология, 2006. № 2. С. 39-51.

2. Айдаркин Е.К. Исследование особенностей взаимодействия зрительной и слуховой систем // Валеология, 2006. № 3. С. 82-93.
3. Posner M.I., Petersen S.E. The attention system of the human brain // Ann. Rev. Neurosci. – 1990. - V.13. - P.25–42.
4. Айдаркин Е.К., Айдаркина Е.С. Соотношение сенсорных и моторных компонентов связанных с событием потенциалов и их роль в организации механизмов произвольного внимания в условиях сенсомоторной интеграции // Валеология. - 2007. №2. - С.70-82.
5. Айдаркин Е.К., Павловская М.А. Исследование ритмических составляющих связанных с событием потенциалов в условиях слуховой последовательной маскировки // Валеология. - 2008, №4. - С. 63-79.
6. Иваницкий А.М. Синтез информации в ключевых отделах коры как основа субъективных переживаний // Ж.Высш.нерв.деят. - 1997. - Т.47, вып. 2. - С.209.
7. Polich J. Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b // Clinical Neurophysiology. – 2007. – Vol. 118. - P. 2128–2148.