



ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

Ермаков П.Н., Бабенко В.В., Явна Д.В.

Использование анализа независимых компонентов для локализации источников вызванной активности при различении текстурных модуляций

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФНФ в рамках научно-исследовательского проекта № 12–06–00169.

Пространственные модуляции текстур по контрасту, ориентации и пространственной частоте обнаруживаются зрительными механизмами второго порядка. Психофизические данные свидетельствуют о наличии избирательности (специфичности) этих механизмов к перечисленным видам модуляций. Данное свойство может иметь в своей основе различную мозговую локализацию этих механизмов. Целью настоящего исследования явилась психофизиологическая проверка данного предположения. Нами было показано, что источники вызванной активности, регистрируемой при решении задачи различения видов модуляции, локализованы в разных областях коры, что является психофизиологическим подтверждением специфичности зрительных механизмов второго порядка.

Ключевые слова: *текстура, модуляция, вызванные потенциалы, анализ независимых компонентов, дипольный источник.*

Введение

Зрительные механизмы второго порядка (МВП) осуществляют преаттентивное пространственное группирование локальной информации на ранних этапах зрительной обработки. Их изучение необходимо для понимания того, по каким правилам локальные признаки, отфильтрованные на уровне первичной зрительной коры, объединяются в когнитивные блоки.

Классические модели зрительных МВП, известные также как модели «второго порядка» [5], «не-Фурье» [7, 12], «функциональной воронки» [1], «заднего кармана» [6] или «сложного канала» [8], были *неспецифичными* к модулируемому параметру текстурного изображения (контрасту, ориентации или пространственной частоте (ПЧ)). Так, при снижении контраста элементов текстуры, попадающих на периферию рецептивного поля (РП) МВП, ответ фильтра второго порядка возрастает. Но такой же результат будет наблюдаться и при изменении ориентации или ПЧ этих элементов. Другими словами, фильтры 2-го порядка пропускают любую модуляцию. Впервые такую неспецифичность МВП подверг сомнению Ф. Кингдом с соавт. [9]. Его исследование, выполненное в психофизической



парадигме пространственной суммации, а также ряд более поздних исследований в парадигмах маскировки [4] и адаптации позволяют говорить о существовании в структуре МВП независимых каналов, избирательных (*специфичных*) к типу модуляции второго порядка.

Специфичность МВП ранее была показана только психофизически. Целью настоящего исследования является проверка предположения о специфичности МВП с помощью объективных показателей. Таким показателем выступила вызванная активность мозга, регистрируемая в ответ на предъявление модулированных и немодулированной текстур.

Анализ дипольных источников независимых компонентов ЭЭГ, связанных с вызванной активностью мозга, позволяет определить общие особенности пространственного распределения генераторов ВП при идентификации стимулов разного типа. Данные об их разной мозговой локализации могли бы стать дополнительным аргументом в решении вопроса о специфичности МВП.

Методика

В качестве стимулов использовались текстуры, составленные из расположенных в шахматном порядке габоровских микропаттернов и представленные в 256 оттенках серого. Размер клеток шахматного поля составлял 0,44 x 0,44 угл.град. Применялись четыре типа текстур: немодулированная (БМ) и модулированные по контрасту (МК), ориентации (МО), пространственной частоте (МЧ). Пространственная частота немодулированной текстуры составляла 3,5 цикл./град., ориентация габоровских элементов была вертикальной, контраст элементов равнялся 0,5. Средняя яркость стимулов была постоянной и равнялась 135 кд/м².

Модуляция производилась перемножением несущей и огибающей (двумерная синусоидальная функция модуляции; ось модуляции перпендикулярна ориентации микропаттернов). Амплитуда огибающей плавно снижалась к краям экрана посредством ее умножения на двумерную полуволну косинусоиды. Пространственная частота огибающей составляла 0,3 цикл./град. Огибающая не вносила существенных изменений в спектр стимула. Амплитуда модуляции (диапазон изменения локального признака в текстуре от исходного до максимального/минимального значения) составляла 1,5 Дб для контраста, 20 град. для ориентации и 3 Дб для пространственной частоты (см. рис. 1).

Стимулы демонстрировались на мониторе LG Flatron 775 FT (размер зерна 0,24 мм), откалиброванном с помощью люксметра. При проведении опытов экранное разрешение устанавливалось равным 1024 на 768 пикселей, частота кадровой развертки – 85 Гц. Испытуемые располагались на расстоянии 130 см от экрана монитора, таким образом его размеры равнялись 14 x 10,5 угл. град.

Стимулы четырёх типов (БМ, МК, МО и МЧ), следуя друг за другом в случайной последовательности, предъявлялись на дисплее 120 раз каждый. Задачей испытуемого было определить тип предъявленной текстуры, подтвердив выбор нажатием определённой клавиши на пульте ответа. Время экспозиции стимула составляло



500 мс, интервал между ответом испытуемого и предъявлением следующего стимула случайно варьировался в диапазоне от 1 до 3 с.

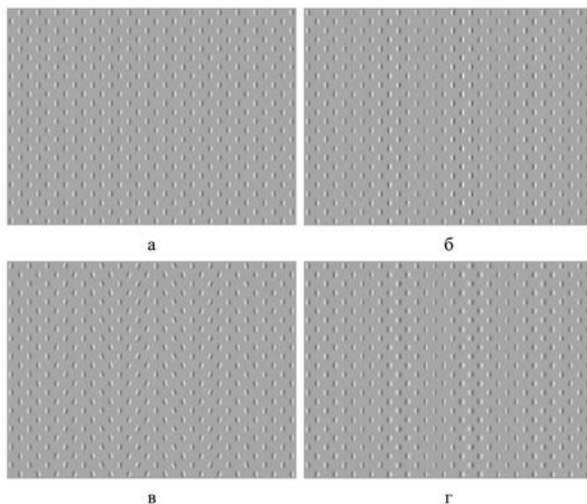


Рис. 1. Примеры текстур, использованных в экспериментах:

- а) немодулированная, б) модулированная по контрасту (амплитуда 1,5 дБ),
в) модулированная по ориентации (амплитуда 20 град.), г) модулированная
по пространственной частоте (амплитуда 3 дБ)

ЭЭГ записывалась в течение всего опыта монополярно по системе 10/20 без Frz, на месте которого располагался нулевой электрод. Использовался референтный монтаж «связанные уши». Одновременно велась запись триггерных меток, содержащих информацию о типе стимула и моменте его предъявления. Частота оцифровки ЭЭГ-сигнала составляла 1 кГц. Запись производилась с использованием энцефалографа «Нейровизор-БММ40» ООО «Нейроботикс».

В эксперименте приняли участие 24 испытуемых с нормальным зрением в возрасте от 20 до 34 лет. Все испытуемые были проинформированы о процедуре проводимых испытаний, убеждались в безопасности экспериментов для здоровья и давали согласие на участие в исследованиях.

Результаты

Запись ЭЭГ в виде нарезки из постстимуляционных эпох длительностью 500 мс подвергалась ICA-декомпозиции методом infomax. Декомпозиция проводилась отдельно для каждого испытуемого и типа текстурного стимула. После этого оценивалась степень вклада каждого из независимых компонентов в вызванную активность мозга, для чего использовался показатель, основанный на коэффициенте



корреляции Пирсона и соответствующий *условному коэффициенту накопления*. Условный коэффициент накопления может рассчитываться, например, как корреляция между эпохами, следующими за предъявлением чётного и нечётного стимулов [3]. Низкие значения этого показателя означают, что сигнал не содержит синхронных с подачей стимула (phase-locked) составляющих, т. е. формируется источником, не связанным с генерацией вызванных потенциалов [3].

В нашем случае в качестве условного коэффициента накопления применялось среднее значение корреляции Пирсона между всеми постстимуляционными эпохами независимого компонента. Фактически это означает оценку степени повторяемости формы сигнала от предъявления к предъявлению. Чтобы принять решение о том, обеспечивает ли данный компонент существенный вклад в вызванную активность, использовался пороговый критерий. Пороговым значением коэффициента накопления было критическое значение коэффициента корреляции Пирсона при $p < 0,05$.

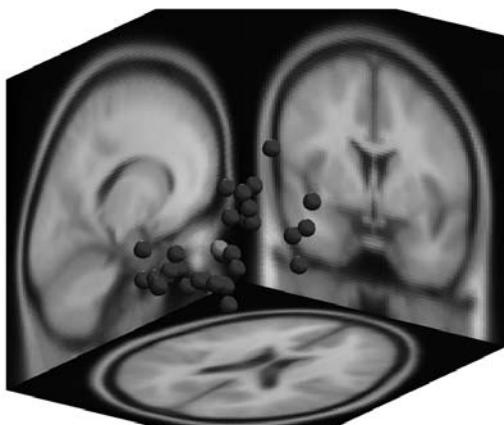


Рис. 2. Разброс дипольных источников (синие сферы) и центрoид (красная сфера) компонентов, имеющих существенный вклад в вызванную активность при предъявлении МО

Характеристики дипольных источников отобранных компонентов рассчитывались с использованием однодипольной модели. Для дальнейшего анализа отбирались только те компоненты, источники которых располагались в пределах мозга или непосредственной близости от него (с учётом сведений о погрешностях, изложенных в [2]). Оказалось, что «облака» источников отобранных независимых компонентов имеют значительный разброс для всех типов экспериментальных условий. В то же время источники в затылочной области расположены существенно более плотно, образуя «сгустки» (рис. 2). С целью извлечения дополнительной информации из распределения дипольных источников их координаты были подвергнуты автоматической классификации с применением алгоритма k-эталонов



в системе EEGLAB. Локализации источников разбивались на 2 кластера для каждого типа экспериментальных условий.

Кластерный анализ позволил выделить затылочные «сгустки» дипольных источников в отдельные классы. Остаточная дисперсия модели для центраида (средняя дисперсия по кластеру) была невелика: 9% для МК, для МО – 8%, для МЧ – 8%, для БМ – 11%. Центральные кластеры объединили сравнительно небольшое число источников с несколько большим разбросом.

Полученный результат иллюстрируется рис. 3, на котором показана локализация центраидов затылочных кластеров для каждой из использованных текстур. Из рисунка видно, что затылочные кластеры независимых компонентов, обеспечивающих высокий вклад в вызванную активность при разных экспериментальных условиях, имеют несколько различную локализацию. Центраиды затылочных кластеров расположены в следующих точках пространства атласа J. Talairach [11] (X; Y; Z): 6; -70; 9 (МК), 6; -86; 8 (МО), 3; -59; 5 (МЧ) и 5; -71; 21 (БМ). Центраид для МЧ отстоит от центраида для БМ на 20,1 мм, центраид для МО – на 19,87 мм, центраид для МК – на 12,08 мм. Расстояние между центраидами для МО и МЧ составляет 27,33 мм. Таким образом, центраид затылочного кластера для МЧ расположен значительно фронтальнее остальных.

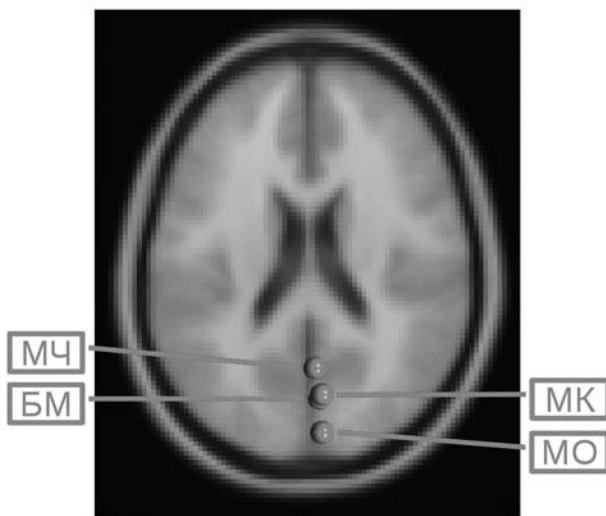


Рис. 3. Центраиды затылочных кластеров дипольных источников для МК, МО, МЧ и БМ

Статистическая значимость различий разброса затылочных облаков дипольных источников ВП оценивалась по результатам дискриминантного анализа. Для



пары облаков МК:БМ значение лямбды Уилкса (λ_w) составило 0,9, приближенный $F = 1,0016$, откуда $p < 0,4$, что может служить основанием непризнания различий разброса значимым. Напротив, для пар МО:БМ и МЧ:БМ результаты составили соответственно $\lambda_w = 0,58977$, $F = 6,0283$, $p < 0,01$ и $\lambda_w = 0,82883$, $F = 2,5816$, $p < 0,1$, что позволяет говорить о неслучайности различий в распределении источников.

Рассмотрим возможный вариант привязки найденных источников к анатомическим структурам коры. Для этого был использован электронный атлас Talairach [10], позволяющий выполнять поисковые запросы нескольких типов по анатомическим координатам. Для центроидов затылочных кластеров нами был использован поиск в пределах куба со стороной 11 мм, центр которого расположен в точке, описываемой искомыми координатами. В таблицах 1, 2, 3 и 4 приводятся результаты поиска соответственно для МК, МО, МЧ и БМ. Столбец «Вес» отражает число точек («вокселей») в пределах куба, имеющих одинаковую анатомическую метку. В данном случае значения в столбце «вес» могут рассматриваться как оценки степени вовлечённости структуры в генерацию вызванной активности. С другой стороны, они могут использоваться и для оценивания *вероятности* вовлечённости структуры в этот процесс.

Таблица 1

**Анатомические метки в пределах куба со стороной 11 мм
вокруг центроида затылочного кластера для МК (6, -70, 9)
по электронному атласу Talairach [10] (серое вещество)**

Вес	Полушарие	Доля	Извилины	Поле по Бродману
140	Правое	Затылочная	Cuneus	23
116	Правое	Лимбическая	Gyrus Cinguli Posterior	30
100	Правое	Затылочная	Cuneus	30
64	Правое	Затылочная	Gyrus Lingualis	18
58	Правое	Затылочная	Cuneus	18
31	Правое	Лимбическая	Gyrus Cinguli Posterior	31

Центроид затылочного кластера дипольных источников компонентов, участвующих в генерации ВП на МК, расположен праволатерально (смещение 6 мм вправо) в 1 мм от серого вещества 30-го поля по Бродману, в области клиновидной извилины (cuneus) затылочной коры. Как следует из табл. 1, в непосредственной близости от центроида находится также серое вещество 23, 18 и 31 полей.

Центроид затылочного кластера дипольных источников компонентов, участвующих в генерации ВП на МО, расположен праволатерально в сером веществе 17-го поля по Бродману, в области клиновидной извилины, неподалёку от границы 18-го поля (табл. 2).



Таблица 2

**Анатомические метки в пределах куба со стороной 11 мм
вокруг центра затылочного кластера для МО (6, -86, 8)
по электронному атласу Talairach [10] (серое вещество)**

Вес	Полушарие	Доля	Извилина	Поле по Бродману
298	Правое	Затылочная	Cuneus	17
140	Правое	Затылочная	Cuneus	18
102	Правое	Затылочная	Gyrus Lingualis	17
27	Правое	Затылочная	Gyrus Lingualis	18

Центроид затылочного кластера дипольных источников компонентов, участвующих в генерации ВП на МЧ, расположен медиально (со смещением 3 мм) в 1 мм от серого вещества 30-го поля по Бродману, в задней части поясной извилины (posterior cingulate), неподалёку от 30, 18 и 19 и 29 полей (таб. 3).

Таблица 3

**Анатомические метки в пределах куба со стороной 11 мм
вокруг центра затылочного кластера для МЧ (3, -59, 8)
по электронному атласу Talairach [10] (серое вещество)**

Вес	Полушарие	Доля	Извилина	Поле по Бродману
111	Правое	Лимбическая	Gyrus Cinguli Posterior	30
44	Правое	Затылочная	Cuneus	30
36	Правое	Затылочная	Gyrus Lingualis	18
21	Правое	Затылочная	Gyrus Lingualis	19
12	Правое	Затылочная	*	19
9	Правое	Лимбическая	Gyrus Cinguli Posterior	29
7	Левое	Лимбическая	Gyrus Cinguli Posterior	30
4	Левое	Лимбическая	Gyrus Cinguli Posterior	29

Центроид затылочного кластера дипольных источников компонентов, участвующих в генерации ВП на БМ, расположен праволатерально (со смещением 5 мм влево) в сером веществе 18-го поля по Бродману, в области клиновидной извилины, неподалёку от границы 31-го поля (таб. 4).



Таблица 4

Анатомические метки в пределах куба со стороной 11 мм вокруг центра центра затылочного кластера для БМ (5, -71, 21) по электронному атласу Talairach [10] (серое вещество)

Вес	Полушарие	Доля	Извилина	Поле по Бродману
274	Правое	Затылочная	Cuneus	18
149	Правое	Затылочная	Precuneus	31
136	Правое	Теменная	Precuneus	31
42	Правое	Лимбическая	Gyrus Cinguli Posterior	31
2	Правое	Затылочная	Cuneus	*

Заключение

Центроиды затылочных кластеров для МК и БМ находятся сравнительно недалеко друг от друга, в области границы первичных и вторичных зрительных зон, тогда как центроид затылочного кластера для МЧ смещён в сторону лимбической коры, к ретроспленальной области и задней части поясной извилины. Напротив, центроид для МО смещён в область первичной зрительной коры. Отличия в локализации дипольных источников независимых компонентов в разных экспериментальных условиях могут свидетельствовать о различной локализации фильтров второго порядка в коре мозга человека, что согласуется с представлениями о специфичности зрительных МВП.

Литература

1. Бабенко В.В. Новый подход к вопросу о механизмах зрительного восприятия // Проблемы нейрокибернетики. – Ростов н/Д: ИРУ, 1989. – С. 10–11.
2. Гнездицкий В. Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография (картирование и локализация источников электрической активности мозга). – М.: МЕДпресс информ, 2004.
3. Чернінський А.О., Собіщанський С.О., Крижановський С.А., Зима І.Г., Піскорська Н.Г., Макарчук М.Ю. Виявлення джерел викликаного активності головного мозку людини за допомогою алгоритму аналізу незалежних компонентів // Фізика живого. – 2010. – Т. 18. – № 1. – С. 52–60.
4. Babenko V., Yavna D. Specificity of the visual second-order mechanisms // Perception 37 ECVF Abstract Supplement. – 2008. – P. 78.
5. Cavanagh P., Mather G. Motion: the long and short of it // Spat. Vis. – 1989. – Vol. 4. – no. 2–3. – P. 103–129.
6. Chubb C., Landy M. Orthogonal distribution analysis: A new approach to the study of texture perception // Computational Models of Visual Processing / Ed. by M.S. Landy, J.A. Movshon. – Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1991. – P. 291–301.



7. Chubb C., Sperling G. Drift-balanced random stimuli: a general basis for studying non-fourier motion perception // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 1988. – Vol. 5. – no. 11. – P. 1986–2007.
8. Graham N., Beck J., Sutter A. Nonlinear processes in spatial-frequency channel models of perceived texture segregation: effects of sign and amount of contrast // *Vision Res.* – 1992. – Vol. 32. – no. 4. – P. 719–743.
9. Kingdom F., Prins N., Hayes A. Mechanism independence for texture-modulation detection is consistent with a filter-rectify-filter mechanism // *Vis. Neurosci.* – 2003. – Vol. 20. – no. 1. – P. 65–76.
10. Lancaster J., Woldorff M., Parsons L., Liotti M., Freitas C., Rainey L., Kochunov P., Nickerson D., Mikiten S., Fox P. Automated talairach atlas labels for functional brain mapping // *Hum. Brain Mapp.* – 2000. – Vol. 10. – no. 3. – P. 120–131.
11. Talairach J., Tournoux P. Co-planar stereotaxic atlas of the human brain. –Thieme, New York, 1988.
12. Wilson H. Non-fourier cortical processes in texture, form, and motion perception // *Cerebral Cortex.* – 1999. – Vol. 13. – P. 445–477.