

**ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ (ПСИХИЧЕСКОЙ)
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА**

УДК 612.821+612.822.3+612.825.1+ 612.825.2+612.825.5

**ПОЗДНЯЯ НЕГАТИВНОСТЬ В ЗРИТЕЛЬНЫХ ВЫЗВАННЫХ
ПОТЕНЦИАЛАХ У ЧЕЛОВЕКА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТОПОЛОГИИ
ПРОСТЫХ НЕВЕРБАЛЬНЫХ СТИМУЛОВ**

© 2007 г. А. Я. Каплан, Е. В. Левичкина

*Биологический факультет Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова,
e-mail: akaplan@mail.ru*

Поступила в редакцию 24.01.2007 г.

Принята в печать 16.05.2007 г.

Поздняя негативность, возникающая в вызванном потенциале на семантическое рассогласование последовательно предъявляемых стимулов, обычно связывается с вербальной или символической репрезентацией стимулов в процессе восприятия. В настоящей работе показано, что характерная для семантического рассогласования поздняя негативность возникает даже в контексте несимвольных и невербализуемых стимульных сред, например, состоящих всего из четырех точек, различающихся между собой только по топологии или по угловому размеру. При этом отвлечение внимания от пробных стимулов полностью нивелирует эффект поздней негативности. Делается предположение, что для любой композиции стимулов мозг находит свою содержательную (смысл) и свою формальную (форма, паттерн) трактовку, которые при сравнении стимулов в условиях odd/ball-парадигмы проявляются в большей или меньшей выраженности N400 в зависимости от объема внимания к самим стимулам.

Ключевые слова: зрительные вызванные потенциалы, поздняя негативность, семантическая рассогласованность, N400, парадигма odd/ball.

**Late Negativity in Visual Event-Related Potentials in Humans to Changes
in Topology of Simple Nonverbal Stimuli**

A.Ya. Kaplan, E.V. Levichkina

*Department of Animal Physiology, Lomonosov State University, Moscow,
e-mail: akaplan@mail.ru*

Late negativity arising in ERP in response to a semantic mismatch of consistently presented stimuli is usually considered to be related with verbal or symbolic representation of stimulus during perception. It is shown in this work that the late negativity typical of the semantic mismatch develops even in the context of non-symbolic and nonverbal, for example, four-point stimulus compositions which differ only in topology or angular size. Attention distraction from trial stimuli completely eliminates the effect of the late negativity. It is suggested that the brain finds semantic and formal (physical) descriptions for any stimulus composition. This phenomenon is reflected in the N400 amplitude depending on the attention volume to the stimuli per se.

Key words: visual evoked potentials, late negativity, semantic mismatch, N400, "odd-ball" paradigm.

Известно, что процессы восприятия у человека находятся под контролем его прежнего опыта [1, 2]. Одним из аспектов этого опыта являются семантические конструкции. Было показано, что моменты перестройки этих конструкций сопряжены с увеличением негативности в зрительных вызванных потенциалах (ВП) в области 400 мс после предъявления

вербализуемых стимулов, не вписывающихся в текущую семантическую схему. В то же время предъявление физически различающихся слов (большие буквы) в том же ряду вызывало в ВП лишь известную позитивность в области 300 мс (P300). Полученный эффект семантического рассогласования, вызывающего в ВП позднюю негативность, или "семантической

негативности” не был связан с фактором неожиданности, но именно с обработкой семантики [3]. В последующем было показано, что компонент N400 во многом является инвариантным в отношении модальности и даже символического представления (буквы, эмблемы, рисунки) набора стимулов (см обзор [6]). Так называемую семантическую негативность можно было получить даже при использовании в качестве стимулов невербализуемых комбинаций жестов [5], а также при сравнении пар отдельных слов [4] или пар стилизованных букв [7]. В этой связи можно полагать, что когнитивные семантические построения выходят далеко за пределы лексических, пиктографических и других символических конструкторов сознательного опыта, охватывая также сферу феноменов невербального и несимвольного восприятия.

В настоящей работе проверяется гипотеза о том, что даже самые простые паттерны стимулов имеют семантический контекст, который можно выявить методом ВП при парном сравнении минимально различающихся стимулов, и что выраженность электрографических проявлений этого контекста зависит от уровня внимания к различиям между стимулами.

МЕТОДИКА

Исследование выполнено с участием 13 студентов-добровольцев. ЭЭГ регистрировали монополярно в 15 отведениях: (*O1, O2, P3, P4, T5, T6, T3, T4, C3, C4, Cz, F3, F4, F7, F8*) относительно объединенного ушного электрода с частотой дискретизации 500 в 1 с. Зрительные стимулы представляли собой вспышки ($0.15 \text{ мкд} \times 4.20 \text{ мс}$) четырех красных светодиодов AL307, составляющих разные композиции. В этих композициях пятый светодиод располагался в центре поля зрения и служил точкой фиксации, а четыре остальных составляли вершины четырехугольников, располагаясь по одному в каждом квадранте поля зрения. Композиции имели два комплекта топологического расположения диодов на плоскости, каждый из которых имел два угловых размера. В проекции на сетчатку светодиодные стимулы из маленьких и больших композиций располагались на расстоянии соответственно 2.3–4.6 и 4.6–9.1 град. от центра, т.е. в обоих случаях проецировались во внефовеальную область сетчатки.

Длительность однократной пробы составляла 900–1100 мс, в рамках которой ЭЭГ регистрировали в течение 100 мс до и 700 мс после предъявления стимула. Отдельная сессия со-

стояла из многократного предъявления двух композиций стимулов, чередующихся случайным образом, но с разной средней частотой и различающихся по одному из параметров: либо по форме, либо по размеру, либо по обеим характеристикам одновременно. В качестве инструкции испытуемым сообщалось, что в начале каждой записи ЭЭГ им будет предъявлена одна из двух композиций стимулов, число появлений которой нужно будет затем подсчитывать в ходе тестирования. Итоговый подсчет должен сообщаться экспериментатору по его запросу. В этих условиях, очевидно, испытуемый не имел возможности вербально обозначать две слабо различающиеся композиции из четырех точек, и это не было целесообразным для выполнения задачи.

Таким образом, запись ЭЭГ одной сессии содержала 315 индивидуальных ВП на два разных паттерна, причем 45 из них – ВП на одну картинку (“редкие стимулы”) и 270 – на другую (“частые стимулы”). При этом центральный светодиод светился постоянно с яркостью, сниженной по сравнению с другими диодами в 2 раза. Каждый испытуемый участвовал в 12 сессиях (12 записей ЭЭГ), в которых тестировались разные пары композиций стимулов.

Для контроля влияния уровня внимания испытуемого к стимулам проводились две серии записей. В первой серии (четыре сессии) внимание испытуемого специально отвлекалось от предъявляемых стимулов предварительным инструктированием о необходимости считать мигания (кратковременное увеличение интенсивности свечения) центрального светодиода. Эти мигания выполнялись с интервалом 10–20 с., причем между окончанием мигания и возникновением следующего стимула случайный интервал составлял не менее 1200 мс. Во второй серии (восемь сессий), напротив, внимание испытуемого привлекалось к одному из двух парных в данной сессии стимулов, для чего ему давалась инструкция считать в уме число именно редких стимулов.

Полученные однократные ВП предварительно сглаживались усреднением ЭЭГ в последовательных окнах шириной 8 мс (четыре отсчета) и далее усреднялись по каждому типу композиции стимулов и для каждого условия. Таким образом, каждый усредненный ВП был представлен временным рядом из 100 интегрированных отсчетов. Последующий анализ включал в себя построение для каждой пары сравнения разностных ВП (ВП на частый сти-

мул минус ВП на редкий стимул) со статистическим оцениванием (по критерию Стьюдента) гипотезы о неравенстве нулю полученных разностных значений для каждой из 100 точек оценивания временного ряда ВП. Оценивание по каждой паре сравниваемых стимулов проводили отдельно для каждого испытуемого и для каждого из 15 отведений ЭЭГ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

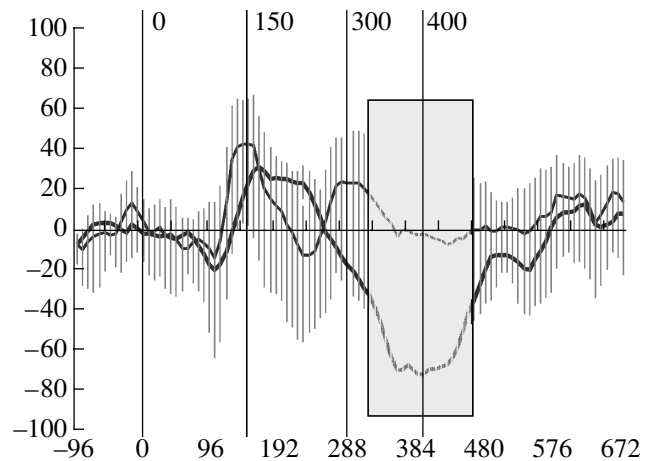
Результаты статистического анализа показали, что у подавляющего большинства испытуемых привлечение внимания к редким стимулам приводило к появлению статистически значимой (не более $p < 0.05$) негативности в разностных ВП в районе 400 мс после предъявления стимула. Выраженность этого негативного отклонения при сравнении двух композиций стимулов возрастала в ряду различий по топологии, размерам и по обоим признакам одновременно. Негативное отклонение было наиболее стабильным и достигало наибольшей амплитуды в затылочных, теменных и центральных отведениях ЭЭГ.

На рисунке представлены усредненные для всех испытуемых разностные ВП в области P4 для условий с привлечением и отвлечением внимания к редкой композиции стимулов, отличающейся от частого аналога угловым размером и измененным расположением светодиодов. До усреднения разностные ВП для каждого испытуемого нормировались в процентах на максимальное значение.

Как видно, негативность разностных ВП достигает статистически значимых значений ($p < 0.05$ и $p < 0.01$ по критерию Вилкоксона) в широком временном диапазоне от 340 до 460 мс со значениями пиков в области 360–430 мс ($p < 0.01$). Следует отметить, что для теменных отведений на всем протяжении ВП это единственная временная область, где наблюдаются статистически значимые различия между ВП на редкие и частые стимулы в нашей парадигме, за исключением небольшого временного окна в зоне компонента P2 (150 мс) и имеющего характер тенденции отклонения P300 (рисунок).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Какова же природа позднего негативного отклонения в разностных ВП, обнаруженного в настоящем исследовании при тестировании простейших невербализуемых стимулов? Наи-



Усредненные для 13 испытуемых разностные ВП (ВП на частый стимул минус ВП на редкий стимул) для отведения P4 в условиях отвлечения или привлечения внимания к редким стимулам (тонкая и толстая линии соответственно). До усреднения индивидуальные разностные ВП нормировались в процентах от максимального значения. По горизонтали показано время относительно момента предъявления стимула в мс. Моменты 0, 150, 300 и 400 мс дополнительно обозначены вертикальными черными линиями. По вертикали отложена амплитуда разностных ВП в процентах от максимального значения. Вертикальными отрезками показаны границы ошибки среднего значения, вычисленные из предположения о нормальном распределении индивидуальных измерений. Серым прямоугольником отмечена зона статистически значимого (не менее $p < 0.05$) различия двух кривых.

Averaged over 13 subjects differences of ERP (ERP for the frequent stimulus minus ERP for the rare stimulus), scalp site P4, on conditions of attention distraction and attraction to a rare stimulus (thin and thick lines, respectively). Before the averaging individual different VPs were normalized in percentage of the maximum value. Horizontal reflects the moment of stimulus presentation (in ms). The moments of 0, 150, 300 and 400 ms were indicated additionally by vertical black lines. The vertical reflects amplitude of ERP differences in percentage of the maximum value. Vertical sections show the limits of SEM calculated on the assumption of normal distribution of individual measurements. Gray rectangle marks statistically significant zone (at least $p < 0.05$) for two different curves.

более близким из известных феноменов поздней негативности в ВП по временной и пространственной локализации, видимо, является “семантическая негативность” или компонент N400, обнаруженный впервые в работе М. Кутас и С.А. Хильярд [8], где испытуемым предъявлялись не подходящие по смыслу окончания

предложений. Однако полученная в нашем случае “поздняя негативность” принципиально отличается от прежних аналогов тем, что она впервые обнаружена для очень простых композиций стимулов, которые не только не могут представлять вербальные или символичные конструкции, но даже не имеют очерченных контуров. Кроме того, эта негативность получена в наших опытах в классической odd/ball-парадигме, для которой наиболее характерно появление дополнительной позитивности в области 300 мс в ВП на редкие стимулы без последующего *N400* [2, 6, 10].

При ближайшем рассмотрении, однако, можно заметить, что открытие *N400* произошло тоже в условиях, очень похожих на odd/ball-парадигму, когда только в 25% предложений конечное слово заменялось другим словом, не подходящим по смыслу в данном предложении [8, 9]. С другой стороны, четко выраженный компонент *P300* наблюдался в разностных ВП и в наших опытах, оставаясь заметным даже при отвлечении внимания, что было нехарактерно для *N400* (рисунок).

В этой связи можно полагать, что для любой композиции стимулов мозг находит свою содержательную (смысл) и свою формальную (форма, паттерн) трактовку, которые в условиях odd/ball-парадигмы проявляются одновременно в большей или меньшей выраженности *N400* и *P300* в зависимости от результата трактовки и от степени привлечения внимания к самим стимулам. Очевидно, что “смысл” стимула подчеркивается тем более, чем больший объем внимания к нему привлекается. В то же время детектирование сдвига собственно формы стимула может быть обеспечено автоматическими механизмами восприятия, не требующими привлечения внимания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в настоящей работе данные подтверждают гипотезу, что привлечение внимания даже к самым простым стимулам, не имеющим явного символического или вербально-

го содержания, возможно, вскрывает в них семантический контекст, маркером которого служит появление в зрительных ВП на редкий целевой стимул поздней негативности в области 400 мс после предъявления стимула. При отвлечении внимания, по-видимому, остается значимым только сам факт “исключительности” данного стимула в ряду предъявлений всех стимулов, что демонстрируется остающимися в этих условиях заметными компонентами *P150* и *P300* в ВП на редкие стимулы.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского гуманитарного научного фонда (грант № 06-06-00150а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иваницкий А.М., Стрелец В.Б., Корсаков И.А.* Информационные процессы и психическая деятельность. М.: “Наука”, 1984. 301 с.
2. *Соколов Е.Н., Незлина Н.И.* Вызванный потенциал как мера перцептивных и семантических различий. Журн. высш. нерв. деят. 2006. 56 (2): 156–174.
3. *Bentin S.* Event-related potentials, semantic processes, and expectancy factors in word recognition. *Brain Lang.* 1987. 31(2): 308–327.
4. *Bentin S., McCarthy G., Wood C.* Event-related potentials, lexical decision and semantic priming. *EEG. a. Clin. Neurophysiol.* 1985. 60: 343–355.
5. *Gunter T.C., Bach P.* Communicating hands: ERPs elicited by meaningful symbolic hand postures. *Neurosci. Lett.* 2004. 372 (1–2): 52–56.
6. *Kotchoubey B.* Event-related potentials, cognition, and behavior: a biological approach. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2006. 30(1): 42–65.
7. *Kotchoubey B., Wascher E., Verleger R.* Shifting attention between global features and local details: an event-related potential study. *Biol. Psychol.* 1997. 46: 25–50.
8. *Kutas M., Hillyard S. A.* Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science.* 1980. 207: 203–205.
9. *Kutas M., Hillyard S. A.* Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association. *Nature.* 1984. 307:161–163.
10. *Patel S.Y., Azzam P.N.* Characterization of N200 and P300: selected studies of the event-related potential. *Int. J. Med. Sci.* 2005. 2: 147–154.