

Potencjały związane ze zdarzeniem (ERP) – obiektywne narzędzie do oceny procesu rozumienia mowy

Event Related Potentials (ERP) – an objective tool for assessment of language processing

Andrzej Senderski

Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, Warszawa

Streszczenie

W pracy przedstawiono przegląd literatury dotyczący trzech potencjałów językowych: potencjału semantycznego N400, wczesnego potencjału syntaktycznego ELAN i późnego potencjału syntaktycznego P600.

Słowa kluczowe: potencjał semantyczny N400, wczesny potencjał syntaktyczny ELAN, późny potencjał syntaktyczny P600.

Summary

A review of the three language-related components in event-related brain potentials (ERPs) is provided. The different ERP components are functionally specified: the N400 component reflects semantic processes, the ELAN reflects early syntactic processes and the P600 reflects late syntactic reanalysis.

Key words: N400 semantic component, ELAN, P600.

Informacje ogólne i podział słuchowych potencjałów wywołanych

Potencjały wywołane (ang. *evoked potentials* – EP) stanowią wyraz swoistej odpowiedzi bioelektrycznej struktur mózgu na określony bodziec. W zależności od modalności bodźca (słuchowy, wzrokowy, dotykowy) możemy wyróżnić słuchowe, wzrokowe i czuciowo-ruchowe potencjały wywołane. Potencjały wywołane dzielimy na potencjały egzogenne i endogenne inaczej określane jako potencjały skorelowane z pobudzeniem (ang. *event related potentials* – ERP). Parametry słuchowych potencjałów egzogennych, takie jak latencja i amplituda, są ściśle zależne od parametrów bodźca akustycznego np. jego częstotliwości i intensywności. Potencjały egzogenne są generowane automatycznie po prezentacji bodźca, niezależnie od głębokości i jakości analizy bodźców dokonywanej przez pacjenta. Klasycznym przykładem słuchowych potencjałów egzogennych są potencjały wywołane pnia mózgu (ABR). Potencjały skorelowane z pobudzeniem (ERP) nie reprezentują bezpośredniej, nieuniknionej reakcji układów zmysłowych na obecność bodźca, ale są wyrazem „wewnętrznych” procesów analizy informacji zawartej w bodźcach, wywołanych nieoczekiwaną zmianą jego parametrów albo nawet nieoczekiwanym brakiem bodźca.

W obrębie słuchowych potencjałów wywołanych (AEP) w zależności od czasu ich powstawania po prezentacji bodź-

ca możemy wyróżnić potencjały o krótkich latencjach – do 20 ms (EcoG, ABR), potencjały o średnich latencjach od 20 do 90 ms (MLR) i potencjały długolatencyjne generowane w przedziale od ok. 90 ms do 200 ms (LAEP). Potencjały skorelowane z pobudzeniem (ERP) mają latencję powyżej 300 ms i obejmują potencjał poznawczy P300 oraz komponenty specyficzne dla bodźców językowych, z których N400 jest markerem analizy ich zawartości semantycznej, a komponenty ELAN i P600 odzwierciedlają ich analizę pod względem gramatycznym. Potencjały egzogenne mają udokumentowaną wartość diagnostyczną, natomiast potencjały endogenne są ciągle w fazie badań klinicznych.

Klasycznym przykładem potencjału endogennego jest fala P300, która powstaje w odpowiedzi na bodziec nowy, nieoczekiwany lub niosący ważną informację. Chociaż psychologiczne znaczenie fali P300 jest nadal przedmiotem dyskusji, uważa się na ogół, że jej latencja jest miarą czasu poświęconego na opracowanie bodźca (odkodowanie, rozpoznanie, klasyfikowanie), amplituda świadczy o rozmiarach zaangażowanych struktur poznawczych, a sam załamek powstaje w momencie rozwiązania problemu [Szelenberger 2001]. Do czynników, które wpływają na amplitudę i latencję fali P300 należą: stan świadomości pacjenta, rodzaj zadania postawionego przed pacjentem podczas badania, koncentracja uwagi (motywacja do wykonania zadania) oraz znaczenie bodźców dla pacjenta [Begleiter, Porjesz 1983; Johnson 1986; Squires, Squires 1975]. Fala P300

może być rejestrowana nawet w odpowiedzi na brak bodźca, jeżeli bodziec ten był oczekiwany, a nie pojawił się [Desmedt, Debecker 1979. Ruchkin, Sutton 1975]. Potencjał P300 jest często bimodalny – pierwszy szczyt, nazywany P3a, jest wyrazem procesu rozpoznania nowego lub nieoczekiwanego zjawiska akustycznego. Drugi szczyt, tzw. P3b, jest wyrazem świadomych procesów kategoryzacji bodźca (przyporządkowania bodźca do określonej kategorii według uzyskanej instrukcji) [Fuchigami, Okubo 1995]. Komponent P300 potencjałów poznawczych odzwierciedla intelektualne rozwiązanie sygnalizowanego przez bodziec problemu i dlatego znajduje zastosowanie jako obiektywny wskaźnik procesów poznawczych. W praktyce klinicznej jest stosowany w diagnostyce zaburzeń neurologicznych upośledzających procesy poznawcze (różne formy demencji, a szczególnie choroba Alzheimera, stwardnienie rozsiane, padaczka, autyzm, schizofrenia i alkoholizm [Butcher 1994].

W praktyce nie istnieje wyraźna granica oddzielająca składowe endogenne i egzogenne potencjałów wywołanych. Wiadomo, że potencjały egzogenne (szczególnie późne ich komponenty) są wrażliwe na stan emocjonalny i natężenie uwagi osoby badanej. Równocześnie modalność oraz cechy fizyczne bodźca mają pewien wpływ na potencjały endogenne.

Podział potencjałów wywołanych oraz informacje o podstawowych różnicach między nimi zawarto w tab. 1.

W poprzednim stuleciu prowadzono intensywne prace nad poznaniem mechanizmów rozumienia mowy wykorzystując metody behawioralne (głównie pomiary czasu reakcji), badając osoby zdrowe, jak i z różnego typu zaburzeniami językowymi. Efektem tych badań jest opracowanie wielu teorii próbujących usystematyzować złożone procesy zachodzące podczas rozumienia mowy, kiedy to system rozumienia mowy musi analizować i integrować szeroki zakres informacji w krótkim okresie czasu. Jaka dokładnie jest architektura tego systemu dotychczas definitywnie nie określono. Duże możliwości wglądu w procesy zachodzące podczas rozumienia mowy daje wykorzystanie potencjałów poznawczych czułych na manipulację zarówno zawartości semanty-

cznej jak i struktury gramatycznej materiału słownego. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie skrótowego przeglądu literatury dotyczącego potencjałów N400, ELAN i P600.

Potencjał semantyczny N400

Potencjał N400 jest rejestrowany w odpowiedzi na bodźce językowe niezależnie od modalności prezentacji. Najczęściej bodźcem są pary słów i zdania prezentowane na ekranie komputera jako tekst lub nawet w formie symboli języka migowego oraz w modalności słuchowej przez słuchawki lub w wolnym polu słuchowym. Po raz pierwszy zarejestrowano potencjał N400 prezentując badanym zdania na ekranie komputera. Jego amplituda wahała się w zależności od znaczenia ostatniego słowa tych zdań [Kutas i Hillyard 1980]. Słowa, których znaczenie nie pasowało do wcześniejszego kontekstu, wywoływały ujemną falę o latencji około 400 ms i rozmytej dystrybucji w okolicach centralnych i ciemieniowych. Natomiast słowa, które były logicznym uzupełnieniem wcześniejszego kontekstu, takiej fali nie wywoływały. I tak np. po zdaniu „Chłopiec rzucił piłką” nie rejestrowano fali N400, a po zdaniu „Chłopiec rzucił lodówką” pojawiała się wyraźna fala N400. Potencjał wywołany występujący między 300 a 500 ms od początku zaistnienia bodźca okazał się wrażliwy na zawartość semantyczną prezentowanego materiału językowego. Autorzy interpretowali ten potencjał jako zakłócenie w procesie analizy zdań wywołane przez słowa nieoczekiwane w danym kontekście.

Nieprawidłowość semantyczna nie jest jednak warunkiem koniecznym, aby powstał potencjał N400. Wykazano, że amplituda fali N400 jest odwrotnie proporcjonalna do stopnia dopasowania słowa do poprzedzającego je kontekstu również dla zdań poprawnych pod względem semantycznym [Kutas, Hillyard 1984]. W celu ilościowego pomiaru stopnia dopasowania słowa do określonego kontekstu opracowano specjalny współczynnik dopasowania (ang. *cloze probability index*). Procedura jego wyznaczenia wymaga, aby duża grupa osób uzupełniła ostatnie słowo w konkret-

Tab. 1. Słuchowe potencjały wywołane i potencjały związane ze zdarzeniem

Nazwa	Rodzaj	Komponenty i ich latencje	Typowe bodźce	Generator	Wpływ snu i anestezji	Wpływ koncentracji uwagi
EcoG	egzogenny	SP, AP (N1) 1–2,5 ms	trzask tony	ślimak i nerw VIII	brak	brak
ABR	egzogenny	I, II, III, V 1,8–15 ms	trzask tony	nerw VIII i pień mózgu	brak	brak
MLAP	egzogenny	Na, Pa, Nb, Pb 17–40 ms	trzask tony	słuchowe ośrodki podkorowe	obecny w III i IV fazie snu	brak
LAEP	egzogenny / endogenny	N1, P2 80–160 ms	trzask tony sylaby	górny zakręt skroniowy	obecny we wszystkich fazach snu	nieznaczny
MMN	egzogenny / endogenny	MMN 100–250 ms	tony sylaby	kora słuchowa	obecny w III i IV fazie snu	nieznaczny
P300	endogenny	N2, P300 250–700 ms	tony sylaby słowa	płaty skroniowe i czołowy, hypokamp	silny	silny
Potencjał semantyczny N400	endogenny	N400 400–450 ms	słowa zdania	złożony	silny	w trakcie badań
Wczesny potencjał syntaktyczny ELAN	endogenny	ELAN 300–400 ms	zdania	złożony	silny	niewielki
Późny potencjał syntaktyczny P600	endogenny	P600 500–700 ms	zdania	złożony	silny	znaczny

nym zdaniu, i określa się go jako procent osób, które użyły danego słowa w podanym zdaniu. Istnieją zdania, w których poprawne jest tylko jedno lub kilka słów kończących np. „Król włożył na głowę złotą ...koronę”. Są to tzw. zdania zawężone (ang. *high constraint sentences*). W zdaniach otwartych (ang. *low constraint sentences*) słów kończących zdanie w sposób poprawny może być bardzo dużo, np. „Kasia myślała o ...niebieskich migdałach, ...mamie, ...drzewie, ...słuchawkach” itp. Dla każdego zdania można wyznaczyć listę słów, które mają wysoki, średni i niski współczynnik dopasowania [Fischler, Bloom 1983]. Wykazano, że amplituda fali N400 jest największa dla słów o najmniejszym współczynniku dopasowania i liniowo zmniejsza się wraz ze wzrostem współczynnika dopasowania.

Późniejsze badania wykazały, że jeżeli jako bodźców używamy zdań to potencjał N400 jest generowany nie tylko dla ostatniego słowa zdania. Jeśli odpowiednio ustawimy czasy według których zachodzi uśrednianie to przekonamy się, że potencjał N400 powstaje po każdym słowie zdania, a jego amplituda stopniowo rośnie, od słowa pierwszego do ostatniego [Van Petten i Kutas 1990].

Fischler i Bloom [1983] rejestrowali potencjał N400 dla prawdziwych lub fałszywych zdań, które z kolei mogły być twierdzące lub przeczące (np. zdanie prawdziwe twierdzące – „Kanarek jest ptakiem”, zdanie fałszywe twierdzące – „Kanarek jest drzewem”, zdanie prawdziwe przeczące – „Kanarek nie jest drzewem” i zdanie fałszywie przeczące – „Kanarek nie jest ptakiem”). Pacjent musiał ocenić prawdziwość prezentowanych zdań. Amplituda fali N400 była większa dla zdań fałszywie twierdzących niż dla zdań prawdziwie twierdzących oraz była większa dla zdań prawdziwych przeczących niż dla zdań fałszywych przeczących, nie zależała natomiast od poprawności decyzji badanego. Fakt, że amplituda fali N400 nie zależy od tego, czy zdanie jest prawdziwe, czy fałszywe oraz od poprawności decyzji badanego, ale od tego czy istnieje bliskość semantyczna między słowem uprzedzającym i słowem celowym wskazuje, że potencjał N400 może być traktowany jako obiektywny wskaźnik zjawiska torowania semantycznego.

Zjawisko torowania semantycznego zachodzi nie tylko w zdaniach, ale także przy prezentacji par słów. Wykazano, że amplituda fali N400 jest odwrotnie proporcjonalna do bliskości semantycznej słowa torującego i słowa krytycznego [Bentin, McCarthy 1985]. Podobny efekt obserwowano dla modalności wzrokowej [Boddy 1986] oraz słuchowej [Holcomb, Neville 1990]. Wykazano również, że zarówno dla par słów jak i dla równoważnych zdań rejestruje się efekt N400 o podobnej amplitudzie, latencji i rozkładzie na powierzchni głowy. Sugeruje to, że ten sam proces jest odpowiedzialny za efekt torowania semantycznego dla par słów oraz dla zdań.

Potencjał N400 może być rejestrowany także dla słów bez znaczenia, ale muszą one być poprawne fonologicznie (ang. *pronounceable nonword*), co więcej, jego amplituda jest w tym przypadku nawet większa niż dla słów posiadających znaczenie [Holcomb, Neville 1990].

Amplituda potencjału N400 jest największa w przypadku pierwszej prezentacji słowa lub zdania. W kolejnych prezentacjach amplituda ulega stopniowej redukcji. Redukcja amplitudy fali N400 dla powtórnej prezentacji maleje wraz ze zwiększaniem odstępu czasu pomiędzy pierwszą i powtórnią pre-

zentacją słowa [Rugg, Nagy 1989]. Potencjał N400 jest więc związany również z tzw. zjawiskiem torowania poprzez powtarzanie (ang. *repetition priming*). Zjawisko to polega na tym, że słowo jest rozpoznawane szybciej, jeżeli niedawno było usłyszane lub odczytane [Besson (i in.) 1992; Okita, Jibu 1998; Rugg 1987].

Amplituda fali N400 ulega redukcji w przypadku słów uprzedzających, które są podobne do słowa krytycznego pod względem fonologicznym (słowa rymowane). Inaczej mówiąc, fala N400 jest zależna również od efektu torowania fonologicznego (ang. *phonological priming*). Zależność od efektu torowania fonologicznego występuje zarówno dla realnych słów jak i dla słów bez znaczenia, co dowodzi, że fala N400 nie jest specyficzna dla analizy znaczenia słów (analizy na poziomie semantycznym), ale również odzwierciedla wstępną analizę mowy na poziomie fonologicznym [Rugg 1984; Radeau (i in.) 1998; Kim, Kwon 2001].

Zarówno dla par słów, jak i dla zdań słowa często używane wywołują falę N400 o mniejszej amplitudzie niż słowa rzadko używane [Rugg 1990]. Ten wpływ częstości używania słowa na amplitudę fali N400 jest najsilniejszy w przypadku słów występujących na początku zdania, nie występuje zaś prawie zupełnie w ostatnim słowie zdania [Van Petten, Kutas 1990].

Fala N400 – niezależnie od wrażliwości na znaczenie słowa torującego – może być również modulowana przez taki czynnik jak zgodność treści zdania z informacjami wcześniej przekazanymi w danym dyskursie. Określone słowa o przeciwstawnym znaczeniu, prezentowane w izolowanych zdaniach, wywołują falę N400 o jednakowej amplitudzie, natomiast amplituda fali N400 dla tych słów znacznie się różni jeżeli zdania te poprzedzimy kontekstem, który czyni jedno znaczenie bardziej prawdopodobnym. Na przykład słowa „szybki” i „wolny” w zdaniach: „Joanna powiedziała bratu że jest wyjątkowo szybki / wolny” wywołują falę N400 o takiej samej amplitudzie. Jeżeli jednak zdanie to jest poprzedzone zdaniem „O piątej rano brat Joanny był już wykąpany i ubrany” to słowo „wolny” wywołuje falę N400 o znacznie większej amplitudzie niż słowo „szybki” [Van Berkum (i in.) 1999; Van Berkum (i in.) 2003].

Parametry potencjału N400 zależą od wieku i ręczności osoby badanej. Dla tych samych zestawów bodźców młode osoby dorosłe generują falę N400 o większej amplitudzie niż osoby starsze. Również latencja fali N400 wydłuża się wraz z wiekiem [Gunter (i in.) 1998; Faustman (i in.) 2003]. Fala N400 rejestrowana w modalności wzrokowej u osób praworęcznych nie mających leworęcznych krewnych ma większą amplitudę nad prawą półkulą mózgu, natomiast u osób leworęcznych nie obserwuje się asymetrii w dystrybucji fali N400 na powierzchni głowy [Kutas (i in.) 1988; Nobre, McCarthy 1994]. Dla modalności słuchowej nie jest dokładnie ustalony wpływ ręczności na parametry fali N400, obserwuje się jednak, że generalnie fala N400 ma nieco większą amplitudę nad lewą półkulą mózgu [Connolly, Phillips 1992].

W literaturze można wyodrębnić dwie odmienne koncepcje opisujące istotę natury potencjału N400. Jedna z teorii zakłada, że potencjał N400 odzwierciedla procesy zachodzące podczas odkodowywania znaczenia słowa (analizę leksykalną, mechanizmy automatyczne torowania semantycznego) [Besson (i in.) 1992, Deacon (i in.) 2000]. Inne badania wskazują, że potencjał N400 głównie odzwierciedla

świadome procesy zachodzące już po odkodowaniu znaczenia słowa (analizę postleksykalną, świadome mechanizmy torowania semantycznego, procesy integracyjne weryfikowania poprawności przekazu słownego) [Hahne, Friederici 2002, McCarthy, Nobre 1993].

Proces analizy leksykalnej utożsamiany jest z procesem rozpoznawania znaczenia słów (ang. *recognition*), podczas którego materiał językowy zawierający informację fonologiczną lub ortograficzną jest na bieżąco porównywany i dopasowywany do wzorców słów w słowniku umysłowym (ang. *mental lexicon*). Proces analizy postleksykalnej obejmuje porównywanie znaczenia odkodowywanych słów z aktualnym kontekstem na poziomie zdania i dyskursu oraz z ogólnym stanem wiedzy w celu integracji nowych słów z budowaną w pamięci konstrukcją całego przekazu słownego.

Generalnie przyjmuje się, że zjawiska zachodzące podczas dostępu leksykalnego zachodzą wcześniej, automatycznie i szybko, z kolei analiza postleksykalna pozostaje w większym stopniu pod naszą kontrolą, a jej efektywność zależy od wysiłku umysłowego i przebiega wolniej. Wyniki większości eksperymentów wskazują, że nawet gdy zredukujemy lub wyeliminujemy możliwość świadomego odkodowania znaczenia słowa torującego, możliwe jest zarejestrowanie efektu N400.

Podsumowując, można stwierdzić, że na amplitudę potencjału N400 wpływają czynniki działające na poziomie analizy leksykalnej (torowanie semantyczne, torowanie fonologiczne, torowanie poprzez uprzedzanie, częstotliwość używania danego słowa), jak również czynniki uważane za postleksykalne (stopień dopasowania słowa do kontekstu zdania i zgodność słowa z kontekstem całego dyskursu). Zatem amplituda fali N400 jest ilościowym wskaźnikiem stopnia trudności, jakich doświadcza osoba badana, aby zintegrować słowo z poprzedzającym je kontekstem. Do dziś jednak trwa debata nad bardziej precyzyjnym określeniem procesów, które odzwierciedla potencjał N400.

Lokalizacja struktur nerwowych, w których zachodzi generacja potencjału N400, jest bardzo trudna. Próby ustalenia źródeł potencjału za pomocą równań Laplace'a z danych uzyskanych z wysokiej rozdzielczości EEG nie dały satysfakcjonujących rezultatów [D'Arcy (i in.) 2003]. Stosunkowo dokładne dane uzyskano za pomocą bezpośrednich pomiarów śródczaszkowych u pacjentów przygotowywanych do operacyjnego usunięcia ogniska padaczkowego [Elger (i in.) 1997; Nobre, McCarthy (1995); Smith, Halgren 1989]. Powyższe badania wykazały generalnie, że potencjał N400 powstaje obustronnie w przednio przyśrodkowej części płata skroniowego (ang. *anterior medial temporal lobe* – AMTL). Wykazano również, że generatory potencjału znajdują się także w tylnio brzusznej części kory przedczołowej [Guillem (i in.) 1999; Marcinkovic (i in.) 2000] oraz w tylnej części kory ciemieniowej [Guillem (i in.) 1999; Halgren (i in.) 1994]. Ten brak zgodności wyników badań może wynikać ze specyfiki pacjentów z padaczką, u których aktywność mózgu nie jest fizjologiczna, oraz z faktu, że w różnych badaniach stosowano różnego typu materiał słowny, jak również odmiennego typu anomalie semantyczne.

Większe możliwości oceny źródeł potencjału elektrycznego występują w sytuacji gdy mierzymy jego składową magnetyczną. Badania z użyciem magnetoencefalografii (MEG) potwierdziły, że generator potencjału N400 znajduje

się w obu płatach skroniowych, z tym że większa aktywność została zarejestrowana w półkuli lewej [Halgren 2002]. Również najnowsze badania przy zastosowaniu funkcjonalnego rezonansu magnetycznego (fMRI), prowadzone podczas analizy zdań z niewłaściwym ostatnim słowem, w porównaniu ze zdaniami prawidłowymi wykazały większą aktywację w przedniej okolicy kory skroniowej i sąsiadującym z nią zakręcie czołowym dolnym, szczególnie w lewej półkuli mózgu [Kiehl (i in.) 2002; Ni (i in.) 2000].

Potencjał N400 jako obiektywne narzędzie pozwalające na wgląd w procesy zachodzące podczas rozumienia mowy ma ogromną potencjalną wartość kliniczną w diagnostyce osób z różnego rodzaju zaburzeniami językowymi. Mimo, że wciąż trwają prace nad określeniem, jakie procesy ten potencjał odzwierciedla, oraz określeniem wpływu różnych czynników na jego parametry, równolegle podejmowane są próby zastosowania tego potencjału jako testu diagnostycznego.

Badania Byrne'a i wsp. [1995] wskazują, że potencjał N400 może służyć do oceny zasobu słownictwa u dzieci z różnego typu zaburzeniami motorycznymi i w komunikowaniu się. Potencjał N400 rejestrowano u 17-letniego pacjenta z porażeniem mózgowym oraz u trzech 17-letnich zdrowych osób. Jako bodźców używano list słów ze standardowego amerykańskiego testu do oceny słownictwa u dzieci (Peabody Vocabulary Test-Revised). Test ten ma trzy poziomy trudności: dla dzieci w wieku przedszkolnym, szkolnym i osób dorosłych. Po wizualnej prezentacji piktogramu pacjent słyszał jego właściwą lub niewłaściwą nazwę. W przypadku listy piktogramów/słów dla dzieci w wieku przedszkolnym i szkolnym, zarówno dla pacjenta z porażeniem mózgowym, jak i osób kontrolnych zarejestrowano wyraźny efekt N400 (fala N400 o większej amplitudzie dla słów zgodnych z piktogramem niż dla słów niezgodnych z piktogramem). U obu grup badanych osób dla list słów należących do zasobu słownictwa osób dorosłych nie zarejestrowano statystycznie istotnego efektu N400. Późniejsze badania [Byrne (i in.) 1999] wykazały wysoką korelację wyników elektrofizjologicznych (amplitudy efektu N400) i wyników uzyskanych w badaniach behawioralnych, przeprowadzone na grupie 56 prawidłowo rozwijających się dzieci. Autorzy pracy zaproponowali gotowy protokół do prowadzenia dalszych badań klinicznych.

Stosując podobną metodologię, podjęto udane próby wykorzystania potencjału N400 do wykrycia oraz pomiaru ilościowego zaburzeń recepcji mowy. Prowadzono rejestrację potencjałów wywołanych u pacjentów z różnego stopnia afazją Wernickiego oraz w grupach kontrolnych. Obserwowano redukcję amplitudy oraz wydłużenie latencji efektu N400 u pacjentów z zaburzoną recepcją mowy w porównaniu do grupy kontrolnej [D'Arcy (i in.) 2003; Kojima, Kaga 2003; Miyamoto (i in.) 2000].

Potencjał N400 może również służyć jako test pozwalający na wczesne wykrycie osób z dysleksją, u których – jak wykazały badania – upośledzona jest automatyczna analiza znaczenia słów. Coch i Holcomb [2003] rejestrowali potencjał N400 w modalności wzrokowej u dwóch grup dzieci: bez trudności w czytaniu oraz z trudnościami w czytaniu wyodrębnionych na podstawie testów behawioralnych. Potencjał N400 występował wyłącznie w grupie dzieci bez trudności w czytaniu.

Potencjały syntaktyczne (ELAN, P600)

W ostatniej dekadzie prowadzono intensywne badania nad elektrofizjologicznymi metodami odzwierciedlającymi procesy analizy struktury gramatycznej mowy. Efektem prac, w których rejestrowano potencjały wywołane dla różnego typu anomalii syntaktycznych, było odkrycie dwóch głównych typów potencjałów poznawczych: grupy potencjałów o polaryzacji ujemnej i latencji od 200 do 400 ms rejestrowanych w okolicach czołowych, głównie po stronie lewej, czyli tzw. lewostronnego potencjału ujemnego (ang. *left anterior negativity* – LAN) i wczesnego lewostronnego potencjału ujemnego (ang. *early left anterior negativity* – ELAN) oraz dodatniej fali o latencji 600 ms i maksymalnej amplitudzie w okolicy potylicznej (fali P600). W zależności od rodzaju nieprawidłowości gramatycznych w zdaniu rejestruje się te potencjały występujące razem lub oddzielnie.

Odkrycie potencjału P600 było związane z próbami znalezienia empirycznych elektrofizjologicznych dowodów pozwalających na weryfikację istniejących modeli rozumienia mowy. Wcześniej odkryty potencjał N400 okazał się specyficzny dla analizy anomalii semantycznych. Rejestracja potencjału, specyficznego dla anomalii syntaktycznych wskazuje na słuszność modelu szeregowego rozumienia mowy, który zakłada, że cechy semantyczne i syntaktyczne mowy analizowane są niezależnie [O'Seaghdha 1997].

Falę P600 zarejestrowano dla specyficznego rodzaju zdań występującego wyłącznie w języku angielskim tzw. *garden path sentences* (zdania, które w zależności od rodzaju kolejnego słowa mogą mieć różne znaczenie wcześniejszej części). Fala P600 w tego typu zdaniach powstaje po słowie, które zmienia wcześniej antycypowaną strukturę gramatyczną zdania; np. w zdaniu „The broker persuaded ... to sell the stock” falę P600 rejestrujemy około 600 ms od początku słowa „to”, gdyż diametralnie zmienia ono wcześniejszą koncepcję słuchacza dotyczącą struktury gramatycznej zdania. Zamiast oczekiwanego zdania w stronie czynnej: „Broker przekonywał ... kogoś do czegoś...” po wstawieniu słowa „to” jedynym możliwym znaczeniem zdania jest „Broker ... był zmuszony do sprzedania akcji”. Tym samym, kiedy osoba usłyszy słowo „to”, zostaje ona w pewien sposób zaskoczona nieoczekiwaną zmianą struktury gramatycznej oraz znaczenia zdania. Potencjał P600 jest generowany również dla zdań z przestawionym szykiem wyrazów. [Osterhout, Holcomb 1990].

Późniejsze badania prowadzone zarówno w modalności wzrokowej, jak i słuchowej, potwierdziły występowanie fali P600 w przypadku różnego typu zdań o niejednoznacznej strukturze syntaktycznej [Friederici (i in.) 1996; Hagoort (i in.) 1993; Mecklinger (i in.) 1995; Osterhout, Holcomb 1993] oraz praktycznie dla wszelkich innych rodzajów nieprawidłowości syntaktycznych, np. niezgodności liczby podmiotu i orzeczenia, błędów w odmianie czasowników i rodzaju przymiotników, niepoprawnego zastosowania przyimków czy niewłaściwego szyku zdania [Coulson (i in.) 1998; Friederici, Mecklinger 1996; Gunter (i in.) 1997; Hagoort, Brown 2000; Kaan (i in.) 2000; McKinnon, Osterhout 1996; Osterhout, Nicol 1999].

Kiedy jako bodźców używano zdań, w których występowała niezgodność liczby podmiotu i orzeczenia, oprócz fali P600 obserwowano ujemną falę nad okolicami czołowymi lewej półkuli o latencji od 300 do 500 ms (ang. *left anterior*

or negativity – LAN) [Coulson, Federmeier 2004; Friederici (i in.) 1996; Hagoort, Brown 2000; Munte (i in.) 1997]. Dla zdań o niepoprawnym szyku fala ujemna występowała wcześniej (latencja około 150–250 od początku krytycznego słowa) i dlatego wyodrębniono ją jako oddzielny komponent (ang. early LAN – lub ELAN) [Friederici (i in.) 1993; Neville (i in.) 1991].

Nie jest jednoznacznie ustalone czy fala P600 jest specyficzna dla analizy bodźców językowych, czy być może jest w rzeczywistości dobrze znaną falą P3b tyle, że o wydłużonej latencji. Za tym, że fala P600 jest identyczna z falą P3b, przemawia podobna topografia tych fal na powierzchni głowy oraz podobne latencje. Analiza i wykrycie niepoprawności gramatycznych jest zadaniem bardziej skomplikowanym niż odróżnianie prostych dźwięków, co tłumaczy dłuższą latencję fali P300 dla bodźców językowych. Badania wykazały, że identyczny jest również wpływ prawdopodobieństwa wystąpienia bodźca celowego na amplitudę fali P3b i fali P600 [Coulson (i in.) 1998; Gunter (i in.) 1997; Hahne i Friederici 1999]. Istnieje jednak możliwość, że różne potencjały, mające różne generatory mogą mieć identyczny rozkład amplitud na powierzchni głowy [Fender 1987]. Ostatnie badania potwierdzają tę możliwość i wskazują, że źródła generacji fali P300 i P600 nie są identyczne.

Frisch [2003] u pacjentów z afazją rejestrował klasyczną falę P300 dla bodźców tonalnych oraz falę P600 dla zdań niepoprawnych gramatycznie. Połowa pacjentów miała wyłącznie uszkodzenia okolic skroniowo-potylicznych kory mózgowej, u drugiej połowy uszkodzenie obejmowało też jądra podstawne mózgu. Falę P300 zarejestrowano u obu grup pacjentów, natomiast falę P600 wyłącznie u pacjentów bez uszkodzeń jąder podstawnych. Wynika z tego, że jądra podstawne odgrywają znaczącą rolę w generacji fali P600, natomiast nie przyczyniają się do powstawania fali P300. To z kolei jest dowodem na to, że mamy do czynienia z dwoma różnymi funkcjonalnie komponentami.

Wyniki pierwszych prac wskazywały, że fala P600 jest specyficzna dla analizy syntaktycznej zdań [Hagoort (i in.) 1993]. Ten pogląd jednak podają w wątpliwość wyniki nowszych badań [Gunter (i in.) 1997; Gunter, Friederici 1999; Munte, Heinze 1998]. Munte, Heinze. [1998] przeprowadzili eksperyment, w którym zarejestrowano podobne fale o polaryzacji dodatniej i latencji około 600 ms dla nieprawidłowości syntaktycznych, semantycznych i ortograficznych. Obserwowano jednak różnice między tymi falami w dystrybucji na powierzchni głowy: dla nieprawidłowości semantycznych fala P600 miała maksymalną amplitudę w okolicy ciemieniowej, z kolei dla nieprawidłowości syntaktycznych fala P600 była szeroko rozprzestrzeniona również na okolice czołowe, potyliczne i skroniowe. Podsumowując wyniki swej pracy autor pisze: „Pogląd, że fala P600 jest specyficzna dla nieprawidłowości syntaktycznych nie może być dłużej utrzymany. Raczej późne fale dodatnie mogą być wywołane przez nieprawidłowości językowe (lingwistyczne) różnego typu, włącznie z nieprawidłowościami semantycznymi i ortograficznymi”

Przyglądając się bliżej badaniom w których dla nieprawidłowości semantycznych nie zarejestrowano potencjału P600, można stwierdzić, że często zakres latencji obejmujących potencjał P600 nie był w ogóle analizowany [Kutas, Hilliard 1984; Kutas 1993]. Inni badacze rejestrujący potencjały wywołane dla anomalii semantycznych, analizując dłuższy

zakres latencji, obserwowali współwystępowanie fali N400 i pojawiającej się później fali dodatniej [Friederici (i in.) 1993; Holcomb 1988; Juottonen (i in.) 1996; O'Halloran (i in.) 1988; Revonsuo i Laine 1996; Revonsuo (i in.) 1998].

Pojawia się zatem pytanie: jakie procesy poznawcze odzwierciedlają fale P600 i ELAN? Ogólnie uznane jest, że fala P600 jest związana z procesem reanalizy i „próby naprawy” nieprawidłowości gramatycznych. Wcześniej występujące fale ELAN i LAN odzwierciedlają z kolei proces wykrywania nieprawidłowości syntaktycznych. Przyjmuje się, że procesy wykrywania nieprawidłowości syntaktycznych, których markerem są fale ELAN i LAN zachodzą automatycznie, natomiast procesy reanalizy i próby znalezienia sensu w nieprawidłowych zdaniach, których markerem jest fala/grupa fal P600, są zależne od uwagi. Dowodów na prawdziwość tej teorii dostarczyły prace w których jako bodźców używano syntaktycznie poprawnych i niepoprawnych zdań złożonych z pseudosłów (słów zgodnych z zasadami fonetyki danego języka, ale nie mających znaczenia). Dla tego typu zdań niepoprawnych syntaktycznie rejestrowano potencjał LAN, natomiast nie zarejestrowano potencjału P600. Wiadomo, że proces ponownej analizy sensu zdania może zachodzić wyłącznie w sytuacji, gdy słowa zdania mają znaczenie. Wyniki te sugerują, że wstępna analiza syntaktyczna zachodzi zanim odkodowane zostaje znaczenie słów i proces ten mogą odzwierciedlać fale ELAN/LAN, natomiast fala P600 może być odzwierciedleniem świadomych procesów reanalizy i próby naprawy niepoprawności gramatycznych i semantycznych. Badania te przeprowadzono dla języka niemieckiego [Munte (i in.) 1997] oraz dla języka angielskiego [Conseco-Gonzales i Love 1997].

Inną możliwością jest to, że fala P600, a ściślej mówiąc wielkość jej amplitudy, odzwierciedla wielkość wysiłku włożonego w proces ponownej analizy i znalezienia sensu zdania. Pogląd ten potwierdza eksperyment, w którym amplituda fali P600 była największa dla zdań niepoprawnych gramatycznie, mniejsza dla zdań poprawnych gramatycznie ale raczej niepreferowanych w potocznym języku, najmniejsza zaś dla zdań poprawnych gramatycznie i często używanych. Im trudniejsze jest skonstruowanie reprezentacji gramatycznej zdania, tym większa jest amplituda fali P600 [Osterhout (i in.) 1994].

Friederici, Hahne i Mecklinger [1996] opierając się na wynikach badań z zastosowaniem potencjałów wywołanych, zaproponowali model opisujący procesy analizy semantycznej i syntaktycznej zachodzących podczas rozumienia zdań. Jest on w wielu aspektach zgodny z opisaną wcześniej teorią szeregową rozumienia zdań zaproponowaną przez Frazier [1978]. Prawdziwość tego modelu potwierdzają eksperymenty przeprowadzone przez innych badaczy [Gunter (i in.) 1997; Jerger (i in.) 2000].

Model przedstawiony przez Friederici obejmuje trzy etapy analizy. Podczas pierwszego etapu oceniana jest struktura syntaktyczna zdania, wyłącznie na informacji dotyczącej składni (określenie podmiotu, orzeczenia, dopełnienia itd.). Ten proces odzwierciedla potencjał ELAN. Podczas drugiej fazy dochodzi do analizy innych informacji: z jednej strony jest to odkodowanie znaczenia poszczególnych słów, który to proces odzwierciedla potencjał semantyczny N400 o największej amplitudzie w okolicach ciemieniowych, z drugiej zaś strony równolegle zachodzi proces dokładniejszej anali-

zy gramatycznej obejmującej wszelkie inne możliwe nieprawidłowości, czego markerem jest grupa potencjałów LAN o latencji również około 400 ms ale o największej amplitudzie w okolicach czołowych. Podczas trzeciej fazy wcześniej uzyskane informacje o znaczeniu słów oraz o dokładnej budowie gramatycznej zdania są integrowane ze sobą. W przypadku wykrycia jakichkolwiek niepoprawności zachodzi proces ponownej integracji (reanalizy), co odzwierciedla potencjał P600 – LPC [Friederici i Mecklinger 1996]. Późniejsze badania Hahne i Friederici [1999] w których oceniano wpływ prawdopodobieństwa wystąpienia nieprawidłowych zdań na obecność potencjałów językowych wykazały, że procesy odzwierciedlone przez potencjały ELAN i LAN są automatyczne, natomiast procesy, których markerem jest potencjał P600 – LPC, są w dużym stopniu kontrolowane.

Z przedstawionego przeglądu literatury widać ogromne możliwości wykorzystania przedstawionych badań elektrofizjologicznych opartych na rejestracji słuchowych potencjałów korowych, zarówno w aspekcie poznawczym procesów fizjologicznych zachodzących podczas rozumienia mowy jak i w aspekcie praktycznym w diagnostyce różnego rodzaju zaburzeń mowy. Zagadnienia te są niezwykle ważne w obliczu wdrażania do praktyki klinicznej programów wczesnej interwencji słuchowej, które wymagają dużego udziału metod elektrofizjologicznych na etapie diagnostyki układu słuchowego.

Bibliografia

- Begleiter H., Porjesz B. [1983]. P3 and stimulus incentive value. „Psychophysiology” 20, 95–101.
- Bentin S., Mc Carthy G. [1985]. Event-related potentials, lexical decision and semantic priming. „Electroencephalography and Clinical Neurophysiology” 60, 343–55.
- Besson M., Fischler I., Boaz T., Raney G. [1992]. Effects of automatic associative activation on explicit and implicit memory tests. „Journal of Experimental Psychology Learning Memory and Cognition” 18, 89–105.
- Besson M., Kutas M., Van Petten C. [1992]. An event-related potential (ERP) analysis of semantic congruity and repetition effects in sentences. „Journal of Cognitive Neuroscience” 4, 132–149.
- Boddy J. [1986]. Event-related potentials in chronometric analysis of primed word recognition with different stimulus onset asynchronies. „Psychophysiology” 23, 232–245.
- Butcher J. [1994]. Cognitive auditory responses W: Principles & Applications in auditory evoked potentials Ed. J. Jacobson, Allyn and Bacon, Boston, 219–236.
- Byrne J., Dywan C., Connolly J. [1995]. An innovative method to assess the receptive vocabulary of children with cerebral palsy using event related brain potentials. „Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology” 17, 9–19.
- Byrne J., Connolly J., MacLean S., Dooley J., Gordon K., Beattie T. [1999]. Brain activity and language assessment using event-related potentials: development of a clinical protocol. „Developmental Medicine and Child Neurology” 41, 740–747.
- Coch D., Holcomb P. [2003]. The N400 in beginning readers. „Clinical Neurophysiology” 114(4) 662–72.
- Conseco-Gonzales E., Love T. [1997]. Processing of grammatical information in Jabberwocky sentences: An ERP study. Poster presented at the Fourth Annual Meeting of the Cognitive Neuroscience Society, Boston, MA, USA.
- Connolly J., Phillips N. [1992]. Event-related potential sensitivity to acoustic and semantic properties of terminal words in sentences. „Brain and Language” 43, 1–18.
- Coulson S., King J., Kutas M. [1998]. Expect the unexpected: Event related brain response to morphosyntactic violations. „Language and Cognitive Processes” 13, 21–58.

- Coulson S., Federmeier K. [2004]. Words in context: ERPs and the lexical/postlexical distinction. wersja HTML dostępna w internecie
- D'Arcy R., Marchand Y., Eskes G., Harrison E., Phillips S., Major A., Connolly J. [2003]. Electrophysiological assessment of language function following stroke. „Developmental Psychobiology” 43, 146–166.
- Deacon D., Hewitt S., Yang C., Nagata M. [2000]. Event-related potential indices of semantic priming using masked and unmasked words: evidence that the N400 does not reflect a post-lexical process. „Cognitive Brain Research” 9, 137–46.
- Desmedt J., Debecker J. [1979]. Wave form and neural mechanism of the decision P350 elicited without pre-stimulus CNV or readiness potential in random sequences of near - threshold auditory clicks and finger stimuli. „Electroencephalography and Clinical Neurophysiology” 47, 648–70.
- Elger C., Grunwald T., Lehnert K., Kutas M., Helmstaedter C., Brockhaus A., Van Roost D., Heinze H. [1997]. Human temporal lobe potentials in verbal learning and memory processes. „Neuropsychologia” 35, 657–667.
- Faustman A., Murdoch B., Copland D. [2003]. The effect of aging on semantic and syntactic processing of spoken language. Poster presented at XVIII IERASG Biennial Symposium 8–12 June, 2003; Puerto de la Cruz – Tenerife – Canary Islands – Spain.
- Fender D. [1987]. Source localization of brain electrical activity W: Handbook of Electroencephalography and Clinical Neurophysiology Vol 1: Methods of Analysis of Brain Electrical and Magnetic Signals Ed. Gevins, S. & Remonds, A., Elsevier, Amsterdam, 355–399.
- Fischler I., Bloom P. [1983]. Brain potentials related to stages of sentence verification. „Psychophysiology” 20, 400–4009.
- Frazier L., Fodor J. [1978]. The sausage machine: A new two stage parsing model. „Cognition” 6, 291–325.
- Friederici A., Pfeifer E., Hahne A. [1993]. Event-related brain potentials during natural speech processing: effects of semantic, morphological and syntactic violations. „Brain Research Cognitive Brain Research” 1, 183–192.
- Friederici A., Mecklinger A. [1996]. Syntactic parsing as revealed by brain responses: First-pass and second-pass parsing processes. „Journal of Psycholinguistic Research” 25, 157–176.
- Friederici A., Hahne A., Mecklinger A. [1996]. The temporal structure of syntactic parsing: Early and late ERP effects elicited by syntactic anomalies. „Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition” 22, 1–31.
- Frisch S., Kotz S., Cramon D., Friederici A. [2003]. Why the P600 is not just a P300: the role of basal ganglia. „Clinical Neurophysiology” 114, 336–340.
- Fuchigami T., Okubo O. [1995]. Developmental changes in P300 wave elicited during two different experimental conditions. „Pediatric Neurology” 13, 25–28.
- Guillem F., Rougier A., Claverie B. [1999] Short- and long- delay intracranial ERP repetition effects dissociate memory systems in the human brain. „Journal of Cognitive Neuroscience” 11, 437–458.
- Gunter T., Stowe L., Mulder G. [1997]. When syntax meets semantics. „Psychophysiology” 34, 660–676.
- Gunter T., Jackson J., Mulder G. [1998]. Priming and aging: an electrophysiological investigation of N400 and recall. „Brain Language” 65, 333–355.
- Gunter T., Friederici A. [1999]. Concerning the automaticity of syntactic processing. „Psychophysiology” 36, 126–137.
- Hagoort P., Brown C., Groothusen J. [1993]. The syntactic positive shift as an ERP measure of syntactic processing. „Language Cognitive Processes” 8, 439–483.
- Hagoort P., Brown C. [2000]. ERP effects of listening to speech compared to reading: The P600/SPS to syntactic violations in spoken sentence and rapid serial visual presentation. „Neuropsychologia” 38, 1531–1549.
- Hahne A., Friederici A.D., [1999]. Electrophysiological evidence for two steps in syntactic analysis: early automatic and late controlled processes. „Journal of Cognitive Neuroscience” 11, 194–205.
- Hahne A., Friederici A.D., [2002]. Differential task effects on semantic and syntactic processes as revealed by ERPs. „Brain Research Cognitive Brain Research” 13, 339–356.
- Halgren E., Baudena P., Heit G., Clarke J., Marcinkovic K. [1994]. Spatio-temporal stages in face and word processing. 2. Depth-recorded potentials in the human frontal and Rolandic cortices. „Journal of Physiology (Paris)” 88, 51–80.
- Halgren E., Dhond R., Christensen N., Van Petten C., Marinkovic K., Lewine J., Dale A. [2002]. N400-like magnetoencephalography responses modulated by semantic context, word frequency, and lexical class in sentences. „Neuroimage” 17, 1101–1116.
- Holcomb P. [1988]. Automatic and attentional processing: an event-related brain potential analysis of semantic priming. „Brain Language” 35, 66–85.
- Holcomb P.J., Neville H. [1990]. Auditory and visual semantic priming in lexical decision – a comparison using event-related brain potentials. „Language and Cognitive Processes” 5, 281–312.
- Jerger J., Greenwald R., Wambacq I., Seipel A., Moncrieff D., [2000]. Toward a more ecologically valid measure of speech understanding in background noise. „Journal of American Academy of Audiology” 11, 273–282.
- Johnson R. [1986]. A triarchic model of P300 amplitude. „Psychophysiology” 23, 367–84.
- Juottonen K., Revonsuo A., Lang H. [1996] Dissimilar age influences on two ERP waveforms (LPC and N400) reflecting semantic context effect. „Cognitive Brain Research” 4, 99–107.
- Kaan E., Harris A., Gibson E., Holcomb P. [2000] The P600 as an index of syntactic integration difficulty. „Language and Cognitive Processes” 15, 159–201.
- Kiehl K., Laurens K., Liddle P. [2002]. Reading anomalous sentences: an event-related fMRI study of semantic processing. „Neuroimage” 17, 842–850.
- Kim M., Kim J., Kwon J. [2001]. The effect of immediate and delayed word repetition on event-related potential in continuous recognition task. „Cognitive Brain Research” 11, 387–396.
- Kojima T, Kaga K. [2003]. Auditory lexical-semantic processing impairments in aphasic patients reflected in event-related potentials (N400). „Auris Nasus Larynx” 30, 369–378.
- Kutas M., Hillyard S. [1980]. Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity. „Science” 207, 203–205.
- Kutas M., Hillyard S. [1984]. Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association. „Nature” 307, 161–163.
- Kutas M., Van Petten C., Besson M. [1988]. Event-related potential asymmetries during the reading of sentences. „Electroencephalography and Clinical Neurophysiology” 69, 218–223.
- Kutas M. [1993] In the company of other words: Electrophysiological evidence for single word and sentence context effects. Special Issue – Event related brain potentials in the study of language. „Language and Cognitive Processes” 8, 533–572.
- Marcinkovic K., Trebon P., Chauvel P., Halgren E. [2000]. Localized face processing by human prefrontal cortex 2. Face selective intracerebral potentials and post -lesion deficits. „Cognitive Neurophysiology” 17, 187–199.
- McCarthy G., Nobre A. [1993]. Modulation of semantic processing by spatial selective attention. „Electroencephalography and Clinical Neurophysiology” 88, 210–219
- McKinnon R., Osterhout, L. [1996]. Constraints on movement phenomena in sentence processing: Evidence from event-related brain potentials. „Language and Cognitive Processes” 11, 495–523.
- Mecklinger A., Schriefers H., Steinhauer K., Friederici A. [1995]. Processing relative clauses varying on syntactic and semantic dimensions: An analysis with event related potentials. „Memory and Cognition” 23, 477–494.
- Miyamoto T., Katayama J., Kohsaka M., Koyama T. [2000] Disturbance of semantic processing in temporal lobe epileps demonstrated with scalp ERPs. „Seizure” 9, 572–579.
- Munte T., Matzke M., Johannes S. [1997]. Brain activity associated with syntactic incongruities in words and pseudo-words. „Journal of Cognitive Neuroscience” 9, 318–329.

- Munte T., Heinze H. [1998]. Brain potentials and syntactic violations revisited: no evidence for specificity of the syntactic positive shift. „*Neuropsychologia*” 36(3): 217–26.
- Neville H., Nicol J., Barss A., Forster K., Garret M. [1991]. Syntactically based sentence processing classes: Evidence from event-related brain potentials. „*Journal of Cognitive Neuroscience*” 3, 155–170.
- Ni W., Constable R., Mencl W., Pugh K., Fulbright R., Shaywitz S., Shaywitz B., Gore J., Shankweiler D. [2000]. An event-related neuroimaging study distinguishing form and content in sentence processing. „*Journal of Cognitive Neuroscience*” 12, 120–133.
- Nobre A., McCarthy G. [1994]. Language-related ERPs: scalp distribution and modulation by word type and semantic priming. „*Journal of Cognitive Neuroscience*” 6, 233–255.
- Nobre A., McCarthy G. [1995]. Language – related field potentials in the anterior-medial temporal lobe. II. Effects of word type and semantic priming. „*Journal of Cognitive Neuroscience*” 15, 1090–1098.
- O'Halloran J., Isenhardt R., Sandaman C., Larkey L. [1988]. Brain responses to semantic anomaly in natural continuous speech. „*International Journal of Psychophysiology*” 6, 243–254.
- Okita T., Jibu T. [1998]. Selective attention and N400 attenuation with spoken word repetition. „*Psychophysiology*” 35, 260–271.
- O'Seaghdha P. [1997]. Conjoint and dissociable effects of syntactic and semantic context. „*Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*” 23, 807–828.
- Osterhout L., Holcomb P. [1990]. Syntactic anomalies elicit brain potentials during sentence comprehension. „*Psychophysiology*” 27, 55–59.
- Osterhout L., Holcomb P. [1993]. Event-related potentials and syntactic anomaly: evidence of anomaly detection during the perception of continuous speech. „*Language and Cognitive Processes*” 8, 413–437.
- Osterhout L., Holcomb P., Swinney D. [1994]. Brain potentials elicited by garden-path sentences: Evidence of the application of verb information during parsing. „*Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*” 20, 786–803.
- Osterhout L., Nicol J. [1999]. On the distinctiveness, independence and time course of the brain responses to syntactic and semantic anomalies. „*Language and Cognitive Processes*” 14, 283–317.
- Radeau M., Besson M., Fonteneau E., Castro S. [1998]. Semantic, repetition and rime priming between spoken words: behavioral and electrophysiological evidence. „*Biological Psychology*” 48, 183–204.
- Revonsuo A., Laine M. [1996]. Semantic processing without conscious understanding in a global aphasic: evidence from auditory event related brain potentials „*Cortex*” 32, 29–48.
- Revonsuo A., Portin R., Juottonen K., Rinne J. [1998]. Semantic processing of spoken word in Alzheimer's disease – An electrophysiological study. „*Journal of Cognitive Neuroscience*” 10, 408–420.
- Ruchkin D., Sutton S. [1975]. Emitted and evoked P300 potentials and variation in stimulus probability. „*Psychophysiology*” 12, 591–595.
- Rugg M. [1984]. Event-related potentials and the phonological processing of words and non-words. „*Neuropsychologia*” 22, 435–443.
- Rugg M. [1987]. Dissociation of semantic priming, word and non-word repetition by event related potentials. „*Journal of Experimental Psychology*” 39, 123–148.
- Rugg M., Nagy M. [1989]. Event-related potentials and recognition memory for words. „*Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*” 72, 395–406.
- Rugg M. [1990]. Event-related brain potentials dissociate repetition effects of high- and low-frequency words. „*Memory and Cognition*” 18, 367–379.
- Squires K., Squires N. [1975]. Decision-related cortical potentials during an auditory signal detection task with cued observation intervals. „*Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*” 1, 268–279.
- Smith M., Halgren E. [1989]. Dissociation of recognition memory components following temporal lobe lesions. „*Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*” 15, 50–60.
- Sperry R., Gazzaniga M. [1967]. Language following disconnection of the hemispheres. W: *Brain Mechanisms Underlying Speech and Language*. Ed. C. H. Millikan, F. L. Darley, Grune & Stratton, Inc., New York, 177–184.
- Szelenberger W. [2001]. Morfologia potencjałów wywołanych. W: *Potencjały Wywołane*. Wydawnictwo Elmiko, Warszawa 14–33.
- Van Berkum J., Hagoort P., Brown C. [1999]. Semantic integration in sentences and discourse: evidence from the N400. „*Journal of Cognitive Neuroscience*” 11, 657–671.
- Van Berkum J., Zwitserlood P., Hagoort P., Brown C. [2003]. When and how do listeners relate a sentence to the wider discourse? Evidence from the N400 effect. „*Brain Research Cognitive Brain Research*” 17, 701–718.
- Van Petten C., Kutas M. [1990]. Interactions between sentence context and word frequency in event-related brain potentials. „*Memory and Cognition*” 18, 380–393.

Adres do korespondencji

Andrzej Senderski
Międzynarodowe Centrum Słuchu i Mowy
Instytutu Fizjologii i Patologii Słuchu
ul. Mokra 17, Kajetany
05-830 Nadarzyn
e-mail: a.senderski@ichs.pl