

КАРТИРОВАНИЕ МОЗГА ПРИ ВОСПРИЯТИИ ЦЕЛЕВОЙ И НЕЦЕЛЕВОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

С.А. Лытаев

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
199178, Санкт-Петербург, 14-я линия ВО, д.39
<slytaev@spiiras.nw.ru>

УДК 612.821 : 612.822.3.08 : 612.825.54

С.А.Лытаев. **Картирование мозга при восприятии целевой и нецелевой акустической информации** // Труды СПИИРАН, Вып. 2, т. 2. — СПб.: Наука, 2005.

Аннотация. *Статья посвящена оценке взаимоотношений между среднелатентными и длиннелатентными слуховыми потенциалами в модели избирательного внимания. В таких условиях топографическое картирование мозга служит аппроксимацией прямых и обратных влияний нейронных популяций на процессы обработки акустической информации. Обсуждаются механизмы восприятия целевых и нецелевых акустических сигналов в головном мозгу на различных временных интервалах.* — Библ. 22 назв.

UDK 612.821 : 612.822.3.08 : 612.825.54

S.A.Lytaev. **Brain mapping during perception of target and non-target acoustic information** // SPIIRAS Proceedings. Issue 2, vol. 2. — SPb.: Nauka, 2005.

Abstract. *In this paper the relationships between of middle- and long-latency acoustical evoked potentials on model of selective attention are estimated. Topographical brain mapping in this situation is model for approximation of direct and back influences in neural networks at processing the acoustic information. The mechanisms of perception of target and non-target acoustic signals in the brain on various epoch of the analysis are estimated.* — Bibl. 22 items.

Введение

На протяжении последних более чем 100 лет головной мозг является классической моделью «черного ящика». Мы можем оценивать параметры акустических сигналов, поступающих в мозг. С другой стороны можно регистрировать некоторые выходные данные анализа акустической информации. Ответные реакции мозга, а именно, слуховые вызванные потенциалы (СВП) (event-related potentials) являются выходными данными. Современные методы картирования головного мозга позволяют исследовать пространственно-временные характеристики ответных реакций мозга на акустические сигналы, а также оценивать механизмы обработки акустической информации [3, 8, 10, 18].

Топическая организация слуховой системы свидетельствует о многоканальной передаче информации в высшие отделы мозга. Кроме того, имеются специализированные каналы, связанные с локальными слуховыми рецепторными полями. Эти каналы способны трансформировать большое количество первичных признаков акустического сигнала [13, 17, 20]. Таким образом, формирование избирательного реагирования нервных сетей на сложные акустические образы обусловлено взаимодействием нейронов разных каналов.

Если в зрительной системе функционирование нейронных сетей — детекторов и механизмов инвариантного опознания образов не вызывает сомнений, то в слуховой системе эти механизмы не работают. В настоящее время рассматриваются два принципиальных варианта кодирования сложных сигналов. Первый из них основан на предположении о возможной локализации таких "де-

текторов" в других "несенсорных" структурах мозга. В качестве второго способа (не обязательно альтернативного) описания сложных акустических стимулов рассматривается его реализация на основе интегративной деятельности нейронов [9, 12].

Исследования механизмов "ранней" фильтрации слуховых сигналов, поступающих в мозг, позволяют говорить об участии стволовых и подкорковых образований в селекции информации. На возможность обеспечения механизмов произвольного внимания переключающими ядрами ствола указывают последние исследования коротколатентных и среднелатентных СВП [4, 6, 19, 22]. Активно разрабатываются представления об обратной эфферентной регуляции нижележащих образований со стороны коры больших полушарий [18, 21, 22].

Целью настоящего исследования заключалась в изучении механизмов восприятия целевой информации на различных интервалах обработки акустического сигнала по данным топографического картирования средне- и длинноталентных слуховых вызванных потенциалов.

1. Методы исследования

Было обследовано 26 здоровых испытуемых (мужчины, возраст 20–22 года) с нормальными пороговыми абсолютной слуховой чувствительности. Регистрацию СВП осуществляли на компьютерных нейросистемах "Brain surveyor" and "Viking IV" в соответствии с Международными требованиями [1]. Предъявляемыми (девиантными) стимулами служили сигналы с уровнем звукового давления (УЗД) 70 дБ, частотой тона 1000 Гц и длительностью 70 мс, подаваемые бинаурально через головные телефоны TDH 39P. Интервал между стимулами составлял 1000 мс. СВП усредняли по 50 накоплениям. В качестве целевых (релевантных) использовали звуковые сигналы с частотой тона 2000 Гц (УЗД и длительность те же), подаваемые бинаурально через динамик фоностимулятора "Sanei". Интервал между целевыми стимулами — 3000 мс.

В первой серии испытуемому подавали 50 ритмических сигналов через наушники, а во второй — на фоне этих 50 (deviant) стимулов, предъявляли 17 целевых (relevant), которые по инструкции необходимо было подсчитать с последующим вербальным ответом. У всех 26 испытуемых по количеству целевых сигналов ответы были правильными.

СВП анализировали по данным топографического картирования мозга и оценки пространственно-временных характеристик наиболее стабильных составляющих СВП [18,19] в семи отведениях — $P_4, P_3, C_4, Cz, C_3, F_4, F_3$. Для выбора значимых информативных показателей использовали пошаговый дискриминантный анализ. Оценку параметров проводили по критерию F -статистики $F > 4.0$.

2. Результаты исследования

Данные регистрации коротколатентных СВП (КлСВП) показывают, что акустический сигнал вовлекается в обработку структурами мозга через 3 мс с момента его предъявления. Обычно на этом отрезке анализируемой эпохи (3-10 мс) по данным разных авторов выделяют 6–8 компонентов [11, 15], в нашем случае — 6 волн (рис. 1).

Топографическое картирование мозга осуществляли на отрезке анализируемой эпохи 10–400 мс. Через 16–18 мс с момента предъявления сигнала наибольшая разность потенциалов при целевой стимуляции отмечается в передних отделах левого полушария, в то время как в затылочных и теменных отведениях отмечается незначительная симметричная активация (рис. 2а, б).

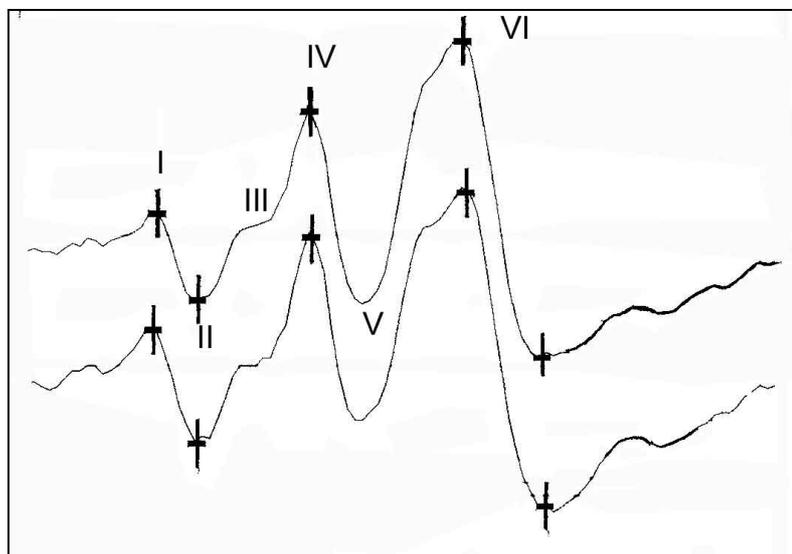


Рис. 1. Компоненты КЛСВП, I–VI. Эпоха анализа — 10 мс; по шкале ординат — в 1 см 1 мкВ.

Среди среднелатентных СВП (СлСВП) наиболее стабильными в обеих пробах являются 4 волны — $P_{16}, N_{30}, P_{40}, N_{60}$, соответствующие по классификации Т.Пиктона с соавт. [15] компонентам P_0, Na, Pa, Nb . Амплитудно-временные характеристики комплекса Pa/Nb значительно не отличаются в вариантах тестирования ($F < 4.0$, рис. 3). Некоторые особенности наблюдаются в формировании волн P_0 и Na при релевантной стимуляции. Значимо возрастает амплитуда P_0 в теменных (P_3, P_4), а также левополушарных C_3 и F_3 отведениях ($F > 4.0$).

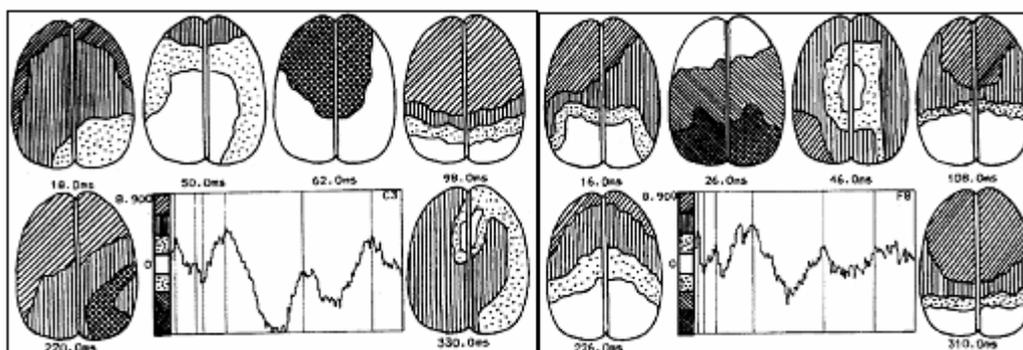


Рис. 2. Последовательные топокарты при маркировке компонентов СВП при: а — нецелевой, б — целевой стимуляции. Эпоха анализа — 400 мс. Цифры — время, мс.

Похожая тенденция сохраняется и на временном интервале формирования волны Na в левосторонних P_3 и F_3 ($F > 4.0$) точках регистрации. В усло-

виях подачи релевантного сигнала наблюдается тенденция к укорочению пиковой латентности (ПЛ) волны Na , что значимо проявляется в отведениях P_4 и O_2 (рис. 3). Картирование мозга (рис. 2б; 26 мс) показывает отчетливую симметрию с максимальной активацией затылочно-теменных долей, в меньшей степени центральных отделов и, практически, отсутствие возбудимости фронтальных отделов неокортекса.

Далее приводятся только значения "положительных" компонентов СВП, располагающихся выше изолинии, поскольку статистически значимых отличий среди "негативных" волн на эпохе 100–400 мс не отмечалось.

Как правило, позитивная волна СВП с ПЛ 90–110 мс обладает максимальной амплитудой среди всех колебаний слуховых ВП и наиболее стабильным проявлением. В настоящем исследовании амплитудно-временные характеристики этого компонента имеют наиболее выраженные различия практически во всех областях мозга. Они имеют две тенденции. Во-первых, укорачивается ПЛ в пробе с релевантным сигналом в задних и центральных отделах головного мозга. Во-вторых, во всех отведениях ($F > 4.0$) редуцируется амплитуда компонента P_{90} (рис. 3). Маркировка этих волн дает в обоих случаях симметричные карты с более заметной активацией коры в ситуации без целевого раздражителя (рис. 2а, б).

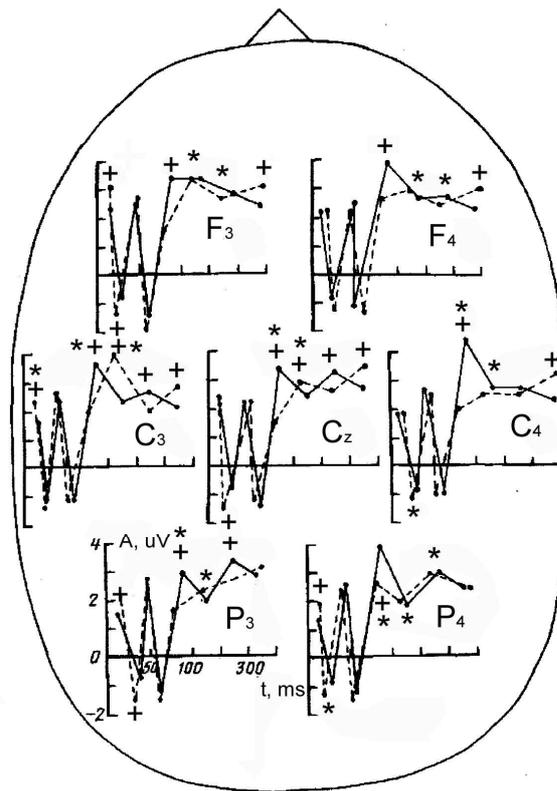


Рис. 3.

На рисунке 3 представлены усредненные значения амплитуд и пиковых латентностей компонентов СВП при девиантной (сплошная линия) и релевантной (пунктирная линия) стимуляции. (+) and (*) — значимые различия ($F > 4.0$) соответственно для амплитуд и пиковых латентностей. P_4, P_3, \dots, F_3 — отведения по системе 10/20, ПЛ P_{140} значимо выше ($F > 4.0$) во всех отведениях в условиях девиантной стимуляции. При действии релевантного сигнала отмечается

увеличение амплитуды P_{140} в C_3 и Cz ($F > 4.0$), в остальных отделах мозга различия являются статистически незначимыми (рис. 3). Временные параметры поздних волн (200–400 мс) выравниваются в обеих пробах. Только ПЛ волны P_{250} .

Значимо ниже при действии релевантного сигнала ($F > 4.0$). Одновременно генерализованно снижается амплитуда этого компонента в условиях целевой задачи. Значимые отличия наблюдаются в левосторонних P_3 и C_3 отведениях и области вертекса (рис. 3). Отмеченные факты отражаются в картировании мозга (рис. 2а, 220 мс; рис. 2б, 226 мс). При выполнении целевой задачи обращает внимание заметная полушарная симметрия процессов возбуждения.

Более выраженное симметричное возбуждение в пробе с релевантным раздражителем наблюдается при картировании компонента с латентным периодом 300–350 мс. Анализ пространственно-временных характеристик в этой задаче отмечает значимое облегчение амплитуды этой волны во всех отведениях, кроме теменных ($F > 4.0$; рис. 3).

3. Обсуждение результатов

$2D$ and $3D+t$ модели информационных процессов мозга в современных исследованиях представлены картированием ВП [3, 8, 19], методом дипольной локализации (МДЛ) [5, 12, 17, 20] и методом построения 3-х мерной траектории Лиссажу (3-МТЛ) [7, 14]. МДЛ представляет алгоритм расчета локализации и направления эквивалентного диполя для какой-либо временной точки по многоканальной записи с поверхности головы. Метод 3-МТЛ предполагает использование дипольной модели [5, 12], однако графика отличается от МДЛ. 3-МТЛ представляет метод определения большей информации о нейрональных генераторах, обеспечивающих возникновение стволовых ВП, по сравнению с многоканальными методами регистрации. Такой анализ применим к сетям, где селективно активируются группы нейронов, расположенные в определенном дистантно-пространственном направлении (сенсорные системы, генераторы альфа-ритма и т.п.) [7, 14].

Наиболее принятой в настоящее время считается следующая классификация генераторов негативных волн КлСВП [11, 12, 16]: I и II волн — слуховой нерв (колебание потенциала в улитке и колебание у входа слухового нерва в кохлеарное ядро соответственно), III волна — уровень трапецевидного тела, IV и V волны — уровень латерального лемниска и его дорсального ядра, а волны VI — уровень заднего холма. Между тем позитивные колебания потенциала между волнами II и III, III и IV, V и VI предположительно генерируются на уровне кохлеарных ядер, медиального ядра верхней оливы и заднего холма соответственно.

Некоторые исследователи полагают, что эффекты изменения активности структур слухового входа не связаны с процессами внимания [6]. Вместе с тем, имеются данные, полученные при регистрации электрокохлеограммы о значительном (в 10 раз больше, чем при регистрации КлСВП дальнего поля) увеличении амплитуды первой волны КлСВП при обеспечении задач селективного внимания [18]. На основании проведенных исследований рядом авторов высказано предположение о возможном центрифугальном влиянии на стволовые структуры, которое, как следствие, находит отражение в пространственно-временных характеристиках КлСВП [22].

Данные о точной локализации отдельных компонентов СлСВП (10–60 мс) являются более противоречивыми. Наиболее устоявшейся считается точка зрения, что СлСВП появляются на отрезке времени между ранними компонентами и поздними кортикальными когнитивными волнами [15,16]. В соответствии с этим СлСВП относятся как к входным транзиттерам слуховой системы, так и к процессам субкортикальной задержки [3], а также к ответам первичной слуховой коры [18]. Подтверждением в пользу нейронной природы СлСВП могут служить результаты экспериментов по изучению ранних механизмов избирательного внимания [6,22]. На основании полученных данных авторы сделали заключение о принадлежности компонентов СлСВП к механизмам избирательного внимания.

В наших исследованиях зарегистрировано увеличение амплитуды СлСВП на отрезке времени 15–40 мс при действии целевых сигналов наблюдаемое, главным образом, в теменных и левосторонних височных и фронтальных областях неокортекса. Этот факт расценивается с позиций кортикофугальных влияний этих отделов на стволовые структуры в обеспечении механизмов избирательного внимания.

Тот факт, что процессы селективного внимания могут оказывать влияние на сенсорную трансмиссию в периферических отделах слухового анализатора у животных, было впервые отмечено более 30 лет назад. Впоследствии были получены достоверные доказательства в пользу модуляции селективной стимуляции на уровне восьмой пары черепных нервов и переключаяющих ядер ствола [18]. Также позволила обнаружить селективный контроль над паттернами нейронной разгрузки как функции релевантных стимулов регистрация одиночной вызванной активности в первичной слуховой коре котом и обезьян.

Намного позже появились данные относительно кортикофугальной модуляции структур слухового входа у человека. Сообщения о регистрации СлСВП при смешанной стимуляции зрительными и слуховыми сигналами указывают на возрастание их значимости на отрезке времени 20–50 мс [6]. Показано увеличение вероятности модуляции субкортикальных и кортикальных потоков посредством кортикофугальных механизмов. Такое предположение подтверждается данными, что проводимость через сенсорно-специфические цепи некоторых стволовых рефлексов может быть селективно модулирована вниманием [6].

В последние 5–8 лет получены интересные данные об источнике волн на отрезке анализируемой эпохи 20–30 мс. Эти волны соответствуют высокочастотной активности мозга — 40 Гц. Установлено, что эти осцилляции координируют активность слуховой системы вплоть до торможения коркового представительства. Однако эти волны находятся под модуляцией глубинных слуховых структур [2, 21].

Если изменения СлСВП на отрезке времени 15–35 мс по нашим данным имеют достоверный характер, то пространственно-временные параметры P_{40} и N_{60} практически не отличаются в обеих пробах. Эти факты расцениваются с точки зрения идентичности механизмов, обеспечивающих трансформацию слуховых сигналов разной сложности. Возможно, также отсутствие влияния выше лежащих образований на этом отрезке времени на процессы внимания. Картирование мозга показывает симметричное распределение диполей при маркировке ПЛ 62 мс, преимущественно, в передних отделах мозга.

Отчетливая симметрия в картах мозга отмечается и при маркировке компонента P_{90-100} в обоих случаях. Вместе с тем прослеживается заметная редукция этой волны в условиях предъявления целевой задачи во всех отделах мозга.

Часто компоненты СВП, генерируемые в слуховой коре на отрезке времени 70–100 мс, обозначаются понятием "негативность рассогласования" [18,22]. С точки зрения авторов, их выделяющих, они отражают автоматический, не связанный с функцией селективного внимания процесс сравнения физических признаков звукового стимула со следом стандартного сигнала, хранящегося в течение 5–10 с в сенсорной или эхо-памяти. При отклонении физических свойств стимула от характеристик следа многократно предъявляемого стандартного стимула развивается эта волна.

Рассмотренный механизм во многом объясняет полученные нами результаты, где амплитуда компонента P_{90-100} значительно выше при девиантной стимуляции. Очевидно, что эта волна отражает автоматический, не связанный с функцией селективного внимания процесс сравнения физических признаков звукового стимула со следом стандартного сигнала в эхо-памяти. Суммация выделяемого сигнала в таких условиях оказывается более адекватной, на что указывают и результаты картирования мозга, где области с максимальной разницей потенциалов симметрично занимают практически все передне-центральные отделы мозга.

Поздняя позитивная волна с ПЛ около 250 мс в центральных и левотемном отведениях в условиях целевой задачи редуцируется, но в то же время характеризуется более выраженной полушарной симметрией по данным картирования. Похожая тенденция с более выраженной симметрией топокарт наблюдается и для волны P_{350} . Однако, здесь во всех, кроме теменных областей, наблюдается увеличение амплитуды в задаче с релевантным сигналом по сравнению с простой ритмической стимуляцией.

Как правило, большинство исследователей указывает на повышение амплитуды P_{300} в задачах, связанных с решением психофизиологических нагрузок [16,20]. Вместе с тем, имеются данные и о возможной редукции ДлСВП как в отношении P_{300} , так и для волны N_{150} в ситуациях с целевыми сигналами [18]. Снижение амплитуды P_{300} авторы связывают с явлениями "деактивации", которую отражает P_{300} после фазической неспецифической активации. На наш взгляд при оценке поздних "когнитивных" колебаний СВП следует учитывать весь сложный комплекс этих волн, изменения пространственно-временных характеристик которых определяются не только заданием, но и техническими характеристиками стимуляции.

Выводы:

1. Облегчение амплитуды среднелатентных волн СВП на отрезке времени 15-40 мс при действии целевых сигналов наблюдаемое в теменных и левосторонних височных и фронтальных областях коры больших полушарий, по всей видимости, свидетельствует о кортикофугальном влиянии этих отделов на стволовые структуры в механизмах избирательного внимания.

2. Амплитудно-временные параметры компонентов P_{40} и N_{60} СВП не зависят от характера стимуляции, что можно расценить либо с позиции идентич-

ности механизмов, обеспечивающих трансформацию слуховых сигналов разной сложности, либо отсутствием влияния вышележащих образований на этом отрезке анализируемой эпохи на процессы внимания. Картирование мозга показывает симметричное распределение диполей преимущественно в передних отделах мозга.

3. Амплитуда компонента P_{90} СВП значительно выше при ритмической стимуляции в отсутствии релевантного сигнала. Очевидно, что эта волна отражает автоматический, не связанный с функцией селективного внимания процесс сравнения физических признаков звукового стимула со следом стандартного сигнала в эхо-памяти. Суммация выделяемого сигнала в таких условиях оказывается более адекватной, на что указывают и результаты картирования мозга, где области с максимальной разницей потенциалов симметрично занимают практически все передне-центральные отделы мозга.

4. Поздняя позитивная волна с ПЛ около 250 мс в центральных и левотемном отведениях в условиях целевой задачи редуцируется, но в то же время характеризуется более выраженной полушарной симметрией по данным картирования. Похожая тенденция с более выраженной симметрией топокарт наблюдается и для волны P_{350} . Однако, здесь во всех, кроме теменных областей, наблюдается увеличение амплитуды в задаче с релевантным сигналом по сравнению с простой ритмической стимуляцией.

Список литературы

- [1] American Electroencephalographic Society. Guidelines for clinical evoked potentials studies, *J.Clin.Neurophysiol.* **1** (1984) pp. 3–54.
- [2] Barth D.S., MacDonald K.D. Thalamic modulation of high-frequency oscillating potentials in auditory cortex, *Nature* **383** (1996) pp. 78–81.
- [3] Deiber M.P., Ibanez V., Fischer C. et al. Sequential mapping favours the hypothesis of distinct generation for Na and Pa middle latency auditory evoked potentials, *EEG Clin.Neurophysiol.* **71** (1988) pp. 187–197.
- [4] Giard M.-H., Perrin F., Pernier J., Bouchet P. Brain generators implicated in the processing of auditory stimulus deviance: a topographic event-related potential study, *Psychophysiol.* **27** (1990) pp. 627–640.
- [5] Grandory F. Dipole localization methods (DLM) and auditory evoked brainstem potentials, *Rev.Laryngol.* **105** (1984) pp. 171–178.
- [6] Hackley S.A., Woldorff M., Hillyard S.A. Cross-modal selective attention effects on retinal, myogenic, brainstem and cerebral evoked potentials, *Psychophysiol.* **27** (1990) pp. 195–208.
- [7] Jewett D.L., Martin W.H., Sininger G.S. et al. The 3-channel Lissajous' trajectory of the auditory brain-stem response, *EEG Clin.Neurophysiol.* **68** (1987) pp. 321–414.
- [8] Khil'ko V.A., Lytaev S.A., Ostreiko L.M. Clinical Physiological Significance of Intraoperative Evoked Potentials Monitoring, *Human Physiology.* **28** (2002) pp. 617–624.
- [9] Lytaev S.A., Shostak V.I. Image Perception and Noise Stability in Auditory System, *Human Physiology* **17** (1991) pp. 38–44.
- [10] Lytaev S., Shevchenko S. VEPs and AEPs Mapping of Occlusive Lesions in Cerebral Vessels, *Ann. New York Acad. Sci., New York Acad. Press* **821** (1997) pp. 524–528.
- [11] Matthies C., Samii M. Management of vestibular schwannomas (acoustic neuromas): the value of neurophysiology for evaluation and prediction of auditory function in 420 cases, *Neurosurgery* **40** (1997) pp. 919–929.
- [12] Moore J.K. The human auditory brain stem as a generator of auditory evoked potentials, *Hear.Res.* **29** (1987) pp. 33.
- [13] Pantev C., Hoke M., Lehnertz K. et al. Tonotopic organization of human auditory cortex revealed by transient auditory evoked magnetic fields, *EEG Clin. Neurophysiol.* **69** (1988) pp. 160–170.
- [14] Paquereau J., Ingrand P., Marilland A. Wave III of brainstem auditory evoked potentials analysed both with 3-channel Lissajous' trajectory and dipole localization method, *EEG Clin.Neurophysiol.* **80** (1991) pp. 298–302.

- [15] Picton T.W., Hillyard S.A., Krausz H.I. et al. Human auditory evoked potentials. 1. Evaluation of components, *EEG Clin. Neurophysiol.* **36** (1974) pp. 179–190.
- [16] Picton T.W. Human Event-Related Potentials. *Handbook of EEG and Clin. Neurophysiol.* Revised Ser. Amsterdam, Elsevier **3** (1988) 556 p.
- [17] Scherg M., Von Cramon D., Evoked dipole source potentials of the human auditory cortex, *EEG Clin. Neurophysiol.* **65** (1986) pp. 344–360.
- [18] Shostak V., Lytaev S., Golubeva L.. Topography of Afferent and Efferent Flows in Auditory Selective Attention, *Neurosci. & Behav. Physiol.* **25** (1994) pp. 665–673.
- [19] Shostak V.I., Lytaev S.A., Bisaga G.N. The Nonspecific Factors of Formation of a Complex Pa/Nb of Middle Latency Auditory Evoked Potentials, *Human Physiology* **19** (1993) pp. 71–80.
- [20] Snyders A.Z. Dipole source localization in the study of EP generators: a critique, *EEG Clin. Neurophysiol.* **80** (1991) pp. 321–325.
- [21] Sukov W., Barth D.S. Cellular Mechanisms of Thalamically Evoked Gamma Oscillations in Auditory Cortex, *J. Neurophysiol.* **85** (2001) pp. 1235–1245.
- [22] Woldorff M.G., Hackley S.A., Hillyard S.A. The effects of channel-selective attention on the mismatch negativity wave elicited by deviant tones, *Psychophysiol.* **28** (1991) pp. 30–42.