

# МНОГОМАСШТАБНЫЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ТИПА В ИССЛЕДОВАНИИ ЭЭГ ЗАПИСЕЙ ЭПИЛЕПТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

В.Е.Анциперов<sup>1</sup>, В.А.Морозов<sup>2</sup>, Ю.В.Обухов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Affiliation, mailing and e-mail addresses of the first author

<sup>2</sup> Affiliation, mailing and e-mail addresses of the second author

В докладе излагаются результаты применения разработанного авторами метода многомасштабного динамического анализа нестационарных процессов к задачам локализации и определения динамических характеристик epileptических разрядов. Обсуждаются основы время-временного графического представления, приведена интерпретация типичных фрагментов представления; для типичных фрагментов приведены иллюстрации на основе реальных ЭЭГ записей.

## Введение

Эпилепсия - самое частое серьезное нарушение деятельности мозга: по данным Международной противэпилептической лиги в Западной Европе эпилепсией страдает 6 млн. человек, и в течение ближайших 20 лет будут болеть около 15 млн. ЭЭГ является первым и часто единственным неврологическим амбулатораторным исследованием, которое проводится при epileptических приступах. В первую очередь ЭЭГ помогает отличить epileptические приступы от неэпилептических и классифицировать их. С помощью ЭЭГ можно: установить участки мозга, участвующие в провоцировании приступов; следить за динамикой действия лекарственных препаратов; идентифицировать степень нарушения работы мозга в межприступные периоды. Вместе с тем, необходимо отметить, что ЭЭГ записи, включая записи epileptического разряда, представляют собой довольно сложные сигналы и характеризуются большим разнообразием форм и динамикой поведения (Рис.1) Их расшифровка требует от врача большого опыта и искусства интерпретации.

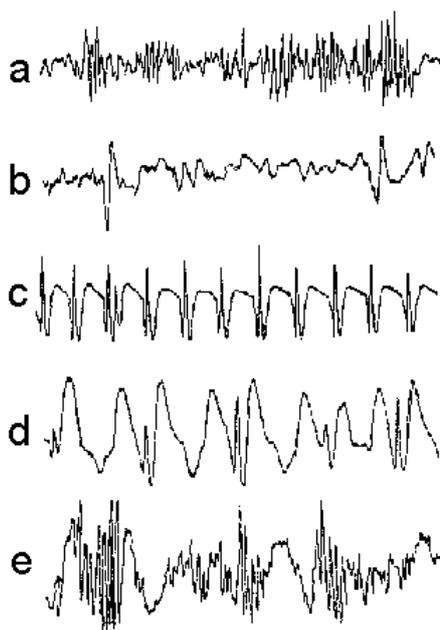


Рис. 1. Формы epileptического разряда

В этой связи авторами доклады были предприняты усилия для разработки такого представления данных ЭЭГ, которое бы наиболее ярко и в легко интерпретируемой форме позволило бы врачу сразу увидеть те особенности, которые сопровождают эллиптический разряд. Результаты работы представлены в данном докладе.

### **Многомасштабный динамический корреляционный анализ**

На протяжении ряда лет авторы доклада занимались проблемой исследования нестационарных сигналов медико-биологического происхождения используя аппарат коротких кросс-корреляционных функций [2-6]. В результате удалось выявить ряд характеристик коротких корреляционных функций, а именно - значения и положения боковых пиков и интерпретировать эти параметры в терминах степени квазипериодичности, значений периода основного колебания, его динамики и т.д.

Изначально короткие корреляционные функции формировались на некоторых характерных для сигнала, но фиксированных временных окнах. В дальнейшем было обнаружено, что гораздо лучшие и полные результаты получаются, если подобный анализ проводить на нескольких временных масштабах, т.е. если изначально выбрать многомасштабность как одну из основных характеристик подхода. Однако, при этом возникает проблема большого числа переменных параметров метода – текущее время, размер окна, временной сдвиг – что приводит к потере наглядности и обзорности представления. Решением проблемы послужила одна из идей вейвлетного частотно-временного анализа. Преимущество вейвлетных преобразований состоит в использовании переменных временных окон: малых для высоких частот и больших для низких. Во время-временном анализе, где период обратнопропорционален частоте, это означает, что для подчеркивания квазиколебаний с малым периодом необходимо использовать малые окна, для обнаружения больших периодов – большие.

В итоге, для обнаружения квазипериодических фрагментов (в частности эпилептического разряда) была выбрана следующая мера квазипериодичности:

$$r(t, \theta) = \frac{\int G^2(2t'/\theta)x(t'+t-\theta/2)x(t'+t+\theta/2)dt'}{\sqrt{\int G^2(2t'/\theta)x^2(t'+t-\theta/2)dt'}\sqrt{\int G^2(2t'/\theta)x^2(t'+t+\theta/2)dt'}} \quad (1)$$

где  $t$  – текущее время,  $\theta$  - временная шкала метода,  $x(t')$  – анализируемый сигнал,  $G(t')$  – масштабирующее окно.

Для представления динамических характеристик сигнала используется  $(t-\theta)$  плоскость с раскраской псевдоцветом величины меры  $r(t, \theta)$ .

### **Применение к исследованию ЭЭГ записей эпилептических разрядов**

*Исходные представления, постановка задачи.*

Наблюдаемые на электродах спонтанные колебания электрических потенциалов мозга на интервалах эпилептического разряда имеют вид пакетов квазипериодических колебаний со средней частотой ~3-5Гц («тэта-диапазон»). Длительность и форма элементарных сигналов в таком пакете варьируют от «периода» к «периоду», но в целом приближённо периодическая структура пакета сохраняется достаточно долго (вполне реально в течение ~5-10 сек.).

Такого рода сигналы можно рассматривать как колебания с относительно медленно изменяющимся основным периодом ( $T_0=T_0(t)$ ), амплитудой ( $A=A(t)$ ) и формой:  $s_i \equiv s_i(t-t_i) = A_i[s_0(t-t_i)] + \delta_i(t-t_i)$ .

Спецификой, отличающих эти колебания от классических квазипериодических колебаний является возможность быстрых («скачкообразных») изменений основного периода и «фазы» последовательности элементарных сигналов в эпилептическом разряде.

Это может быть связано с изменяющимся числом и составом «активных» областей мозга, электрическая активность которых суммируется на данном отведении.

Задачей данного исследования является выделение динамики нестационарных вариаций последовательности элементарных сигналов, формирующих эпилептический разряд; в первую очередь – обнаружение изменений в том числе скачкообразных в основном периоде и «фазе» последовательности элементарных сигналов.

*Метод анализа вариаций основной частоты и фазы изучаемой последовательности элементарных сигналов.*

Имея в виду многомасштабность временных вариаций изучаемого процесса, метод должен позволить судить в рамках единого образа о динамике процесса, как на масштабе порядка основного периода ( $T \sim T_0 + \delta_i$ ), так и на значительно более длительных интервалах при априори неизвестной и часто достаточно сложной форме элементарных сигналов. Используемая метрика должна формироваться на основе возможно более полного учёта энергии сигнала.

В наших исследованиях анализируемая метрика  $r(t, \theta)$  представляет собой коэффициент корреляции исследуемой реализации  $x(t)$  ( $0 \leq t \leq T_{\text{неб.}}$ ) для двух соседних интервалов («полуокон») равной длительности ( $\tau_1 = \tau_2 = \theta$ ), сдвинутых на  $\theta$ . Специфика такого построения метрики в том, что временной масштаб  $\theta$  фигурирует одновременно в длительности и сдвиге полуокон, по которым формируется коэффициент корреляции  $r(t, \theta)$ . Многомасштабность процесса определяет отображение используемой метрики на плоскости  $(t, \theta)$ . (Предполагаем, что средние значения выборок удалены на этапе предварительной обработки).

Рельеф  $r(t, \theta)$  на плоскости  $(t, \theta)$  передаётся условным цветом и формируемая картина даёт хорошее зрительное представление о периодичности исходного процесса и её нарушениях в виде вариаций основной частоты и фазы основного «ритма».

Рассмотрим несколько базовых ситуаций:

1. Периодически повторяющиеся сигналы  $x_0(t)$ .
2. Скачок фазы в последовательности повторяющихся сигналов  $x_0(t)$  («однократный сбой») на  $\Delta t$  хода «часов» исследуемой последовательности).
3. Нестационарность в виде медленного изменения основного периода  $T_i = T_i(t)$ , так что  $\frac{1}{T} = f_i(t)$ ,  $f_i(t) = f_0 + \alpha t$ .

### *1. Стационарный участок.*

В этом случае  $x_i(t_j) = x_0(t_j - kT_0) + \delta_i(t_j)$ , где  $\delta_i(t_j)$  – возмущения, в отсутствие которых мы имели бы строго периодический сигнал с периодом  $T_0$ . Предполагается, что значения  $\delta_i(t_j)$  случайны и независимы с нулевым средним ( $\overline{\delta_i(t_j)} = 0$ ).

При длительности полуокон  $\tau_1 = \tau_2 = T_0$  среднее значение метрики  $r(t, \theta)$  достигает локального максимума  $r_{\text{max}}(t, \theta = T_0) = r(T_0)$ . Уровень этого максимума зависит от относительного уровня возмущений  $\delta_i(t_j)$  и при низком уровне возмущений  $r(T_0) \sim 1 - \varepsilon$ ,

где  $\varepsilon \sim \frac{\overline{\delta_i^2}}{s_0^2}$ , где  $\overline{s_0^2}$  и  $\overline{\delta_i^2}$  – средние значения «мощности» регулярной и случайной части

сигнала. В условиях стационарного участка  $\overline{\delta_i^2}$  не зависит от  $i$ .

При  $\theta = T_0/2$  метрика достигает локального минимума по  $\tau$   $\left( r_{\min}(\tau) = r\left(\frac{T_0}{2}\right) \right)$ , т.к. сдвиг

полуокон на  $\theta = T_0/2$  приводит к сдвигу относительных фаз комплексных амплитуд

Фурье в спектрах перемножаемых колебаний у чётных и нечётных гармоник  $\omega_p = p \frac{2\pi}{T_0}$

на  $p \cdot 2\pi$  и  $(p + \frac{1}{2}) \cdot 2\pi$  соответственно.

Для элементарных сигналов близких к гармоническим и низком уровне возмущений  $r_{\max} \sim 1 - \varepsilon$ ,  $r_{\min} \sim -(1 - \varepsilon_0 - \varepsilon)$ , где  $\varepsilon_0$  – относит. уровень нечётных гармоник в спектре  $x_0(t)$ ,  $\varepsilon_0 \ll 1$ .

Аналогичная картина выполняется для «чётных» ( $\theta = \frac{1}{2} T_0 \cdot 2l$ ) и «нечётных»

( $\theta = \frac{1}{2} T_0 \cdot (2l + 1)$ ) задержек  $\theta$ .

В таком рассмотрении стационарный участок на плоскости  $(t, \theta)$  будет выглядеть как правильное чередование горизонтальных полос; в простейшем случае – тёмных и светлых при монохромном кодировании  $r(t, \theta)$  условной яркостью.

Реально с ростом задержки  $\theta$  увеличивается относительный уровень отклонений  $x_i(t)$  от фиксированной формы  $x_0(t)$  и абсолютные уровни локальных максимумов для больших  $l$  убывают, а сами максимумы становятся более размытыми. Но это не изменяет качественно структуры картины рельефа метрики  $r(t, \theta)$  на «стационарном» участке.

Графическое представление стационарного участка приведено на Рис.2.

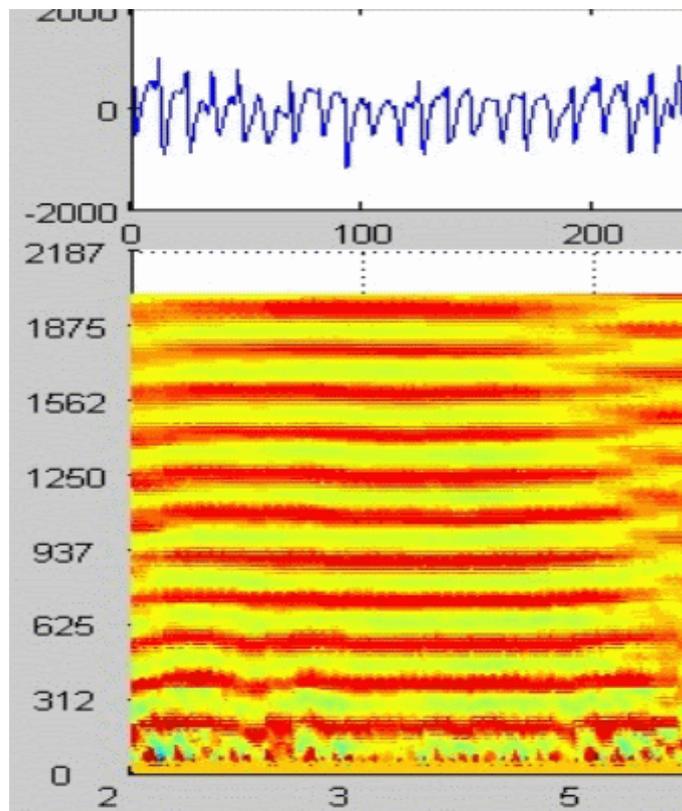


Рис. 2. Представление стационарного участка разряда

## 2. «Скачок фазы» в последовательности элементарных сигналов.

Рассмотрим основные черты проявления такого вида нестационарности на примере сдвига сетки моментов отсчёта  $t_i$  на  $T_0/2$ , начиная с некоторого момента  $t^*$ . В этом случае до захвата головным полуокном момента  $t^*$  (т.е. при  $t < t^* - \theta$ ) ситуация не отличается от рассмотренной выше (стационарный квазипериодический сигнал). То же самое можно сказать и после полного перемещения полуокон на второй участок с возмущённой временной сеткой ( $t > t^* + \theta$ ). Напомним, что полуокна занимают интервалы длительности  $\theta$  до и после момента  $t$ .

При  $t = t^*$  полуокна накрывают последовательности элементарных сигналов, сдвинутых на  $T_0/2$  независимо от значения  $\theta$ . Метрика  $r(t, \theta)$  при  $t = t^*$  в этих условиях достигает

локального минимума при  $\theta = 2l \frac{T_0}{2}$  и локального максимума при  $\theta = (2l + 1) \frac{T_0}{2}$ , т.е.

тёмные и светлые полосы в окрестности  $t = t^*$  «меняются местами». Это сразу следует из того, что оператор фазового сдвига комплексных амплитуд Фурье при задержке  $\theta$

определяется здесь множителем  $e^{-j\omega_p \theta}$ , где  $\omega_p = p \frac{2\pi}{T_0}$ ,  $\theta = T_0$  и  $\theta = \frac{T_0}{2}$  для  $r_{\max}(\theta)$  и

$r_{\min}(\theta)$ .

В результате на плоскости  $(t, \theta)$  появляется расширяющийся с ростом  $\theta$  «конус» искривлённого хода тёмных и светлых полос с осью симметрии на  $t = t^*$ .

При меньших сдвигах временной сетки ( $0 < \Delta t < T_0/2$ ) область конуса остаётся той же (ограниченной областью  $[t^* - \theta < t < t^* + \theta]$ ) и сопровождается сдвигом локальных максимумов метрики  $r(t, \theta)$  к меньшим  $\theta$  при  $0 < \Delta t < T_0/2$ . При  $(-T_0/2 < \Delta t < 0)$  кривизна полос на переходном участке ( $t^* - \theta < t < t^* + \theta$ ) меняет знак. Графическое представление скачка фазы приведено на Рис.3.

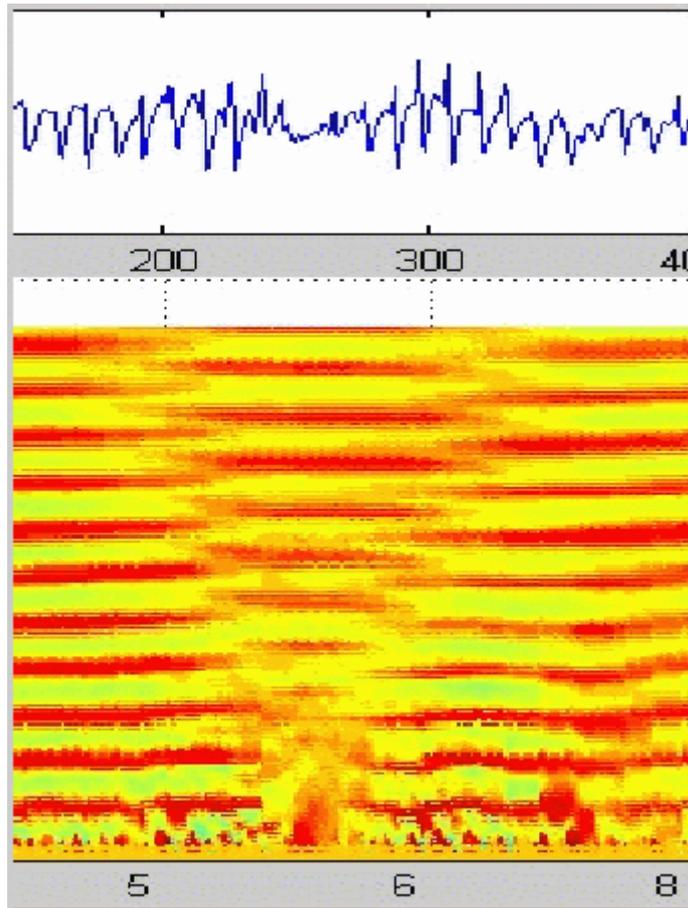


Рис. 3. Представление скачка фазы

### 3. Медленное изменение основного периода: $T_0 = T_0(t)$ .

Этот случай рассмотрим в приближении гармонического колебания с линейным

изменением частоты:  $\omega(t) = \frac{2\pi}{T_0(t)} + \alpha t \equiv \omega_0 + \alpha t$ .  $x_0 = \cos \varphi(t) = \cos\left(\int_0^t \omega(t) dt\right)$ .

$$\varphi(t) = \omega_0 t + \frac{\alpha t^2}{2}.$$

Пусть частота  $\omega$  была постоянна до  $t = t^*$  и изменяется линейно при  $t > t^*$ . Обозначим полное изменение частоты на длительности полуокна  $\Omega = \alpha\theta$ . Тогда прирост фазы, связанной с изменением частоты на интервале  $(t^*, t^* + \theta)$  составит  $\frac{1}{2}\Omega\theta$ .

Разность фаз колебаний в полуокнах, равная на стационарном участке ( $t < t^* - \theta$ )  $\Delta\varphi = \omega_0\theta$  получает квадратичный рост: при  $t = t^*$  разность фаз колебаний в полуокнах изменяется от  $\Delta\varphi_1 = \omega_0\theta$  в начале полуокна до  $\Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_1 + \Delta\Phi$  в конце полуокна, где  $\Phi = \frac{1}{2}\Omega\theta = \frac{1}{2}\alpha\theta^2$ .

Выписывая разность фаз перемножаемых колебаний в полуокнах на участке линейного изменения частоты, приходим к соотношениям для разности фаз в начале ( $\Delta\varphi_a$ ), середине ( $\Delta\varphi_b$ ) и конце ( $\Delta\varphi_c$ ) полуокна длительности  $\theta$ :  $\Delta\varphi_a = \theta\left(\omega_0 + \frac{1}{2}\Omega\right)$ ,  $\Delta\varphi_b = \theta\left(\omega_0 + \Omega\right)$ ,

$$\Delta\varphi_c = \theta\left(\omega_0 + \frac{3}{2}\Omega\right).$$

При медленном изменении частоты, так что  $\frac{1}{2}\Omega\theta \ll 1$ , можно оценить метрику  $r(t, \theta)$  по разности фаз перемножаемых колебаний в средней точке полуокна. Тогда соседние по  $\theta$  локальные максимумы  $r(t, \theta)$  будут соответствовать, скажем,  $\theta_l$  и  $\theta_{l+1}$ , где

$$\begin{cases} 2\pi l = \theta_1(\omega_0 + \Omega_1), \\ 2\pi(l+1) = \theta_2(\omega_0 + \Omega_2), \end{cases} \text{ где } \Omega_1 = \alpha\theta_1^2, \Omega_2 = \theta_2^2.$$

Отсюда  $(\theta_2 - \theta_1)\omega_0 + \alpha(\theta_2^2 - \theta_1^2) = 2\pi$ ,  $(\theta_2 - \theta_1)\omega_0 + \alpha(\theta_2 + \theta_1)(\theta_2 - \theta_1) = 2\pi$ ;

Обозначая  $\theta_1 + \theta_2$  через  $2\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} = 2\theta_{cp}$ , находим:  $\theta_2 - \theta_1 = \frac{2\theta_{cp}}{\omega_0 + \alpha \cdot 2\theta_{cp}}$ . Отсюда: при

положительной  $\alpha$  «расстояние»  $(\theta_2 - \theta_1)$  между линиями локальных максимумов метрики будет убывать с ростом  $\theta_{cp} = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$ , а при отрицательной  $\alpha$  – возрастать. С ростом  $\theta_{cp}$

средняя точка полуокон, накрывающих интервал  $(t^*, t^* + 2\theta)$  сдвигается к большим  $t$ .

Следовательно, при медленном убывании частоты можно ожидать нарастающего расхождения соседних ярких и тёмных полос метрики  $r(t, \theta)$  на плоскости  $(t, \theta)$ .

Графическое представление изменения основного периода скачка фазы приведено на Рис.4.

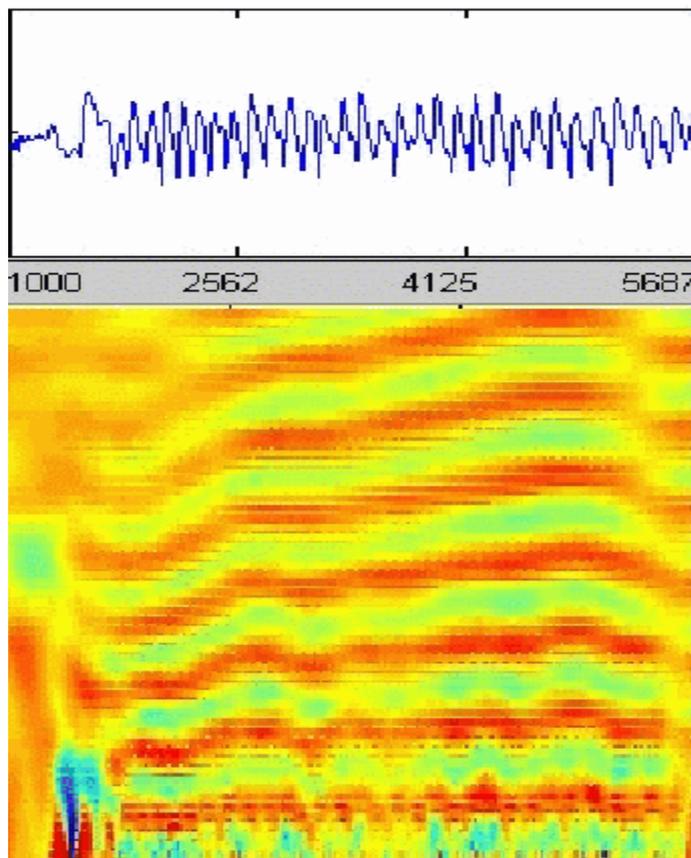


Рис. 4. Представление изменения основного периода

### Заключение

Разработанное представление для результатов исследования ЭЭГ записей эпилептических разрядов оказывается в высокой степени информативным и легко интерпретируемым. С его помощью врач может “на взгляд” определить границы разряда, особенности его динамики такие, как стационарность, уход частоты колебаний, наличие фазовых скачков. Дальнейший, более точный количественный анализ может быть осуществлен на основе численного расчета тех или иных параметров количественной меры  $r(t, \theta)$ , являющейся основой предложенного представления. Авторы надеются, что предложенный анализ и

его дальнейшее развитие будут столь же плодотворны, как и ставшие общепринятыми спектральный или вейвлетный подходы.

### Список литературы

1. Cohen L. " Time-Frequency Analysis", Prentice-Hall, 1995.
2. Antciperov W.E., Morozov W.A., Nikitov S.A. "Isolated word segmentation on the base of short correlation function parameters dynamics ", Proc. of 7-th Int. Conf. on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA-7-2004), S-Peterburg, 18-23 oct, 2004, p. 610-630.
3. Antciperov W.E., Morozov W.A., Nikitov S.A. "Vowel Detection and Recognition on the base of Short Correlation Function Parameters Dynamics", Proc. of 10-th I International Conference Speech and Computer (SPECOM'2005) , Patras, Greece, 17-19 oct, 2005, p. 535-538.
4. Antciperov W.E. "Vowels Detection / Recognition on the Base of Short Cross-correlation Function Side Peak Parameters", Proc. of 11-th I International Conference Speech and Computer (SPECOM'2006) , S-Peterburg, 25-29 jun, 2006, p. 400.
5. Antciperov V.E., Morozov V.A. "The Dynamics of Characteristics of Short Autocorrelation Functions of Speech Signals", J. Communications Technology and Electronics, 49 (12), 2004, p 1333-1341.
6. Antciperov V.E., Morozov V.A., Nikitov S.A. "Isolated-Word Segmentation Based on the Dynamics of the Parameters of Short Correlation Functions", J. Communications Technology and Electronics, 51 (12), 2006, p. 1356.