

## АНАЛИЗ ЭКГ-СИГНАЛОВ ПАЦИЕНТОВ С ПОГРАНИЧНЫМИ ПСИХИЧЕСКИМИ РАССТРОЙСТВАМИ НА ОСНОВЕ ННТ<sup>1</sup>

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Диагностика психических расстройств осуществляется в рамках медицинских стандартов и норм. Оценка состояния пациента с пограничными психическими расстройствами осуществляется на основе результатов психометрического обследования (тестовые методы) и осмотра состояния пациента врачом. Целью представленной работы является внедрение в клиническую практику врача методов оценки состояния психического здоровья человека посредством анализа ЭКГ-сигналов.

*Материалы и методы.* Для анализа ЭКГ-сигналов используются преобразование Гильберта – Хуанга и обработка данных в системе координат энергия–частота–время. Для изучения сигналов и определения новых параметров психического здоровья человека используется запатентованная верифицированная база ЭКГ-сигналов пациентов с пограничными психическими расстройствами.

*Результаты.* Разработан алгоритм определения пограничных психических расстройств на ЭКГ-сигнале, позволяющий на амплитудно-временных и энергетических составляющих сигнала, полученных в результате преобразования Гильберта – Хуанга, определить период возникновения психотравмирующей ситуации.

*Выводы.* Разработан и исследован новый оригинальный алгоритм определения пограничных психических расстройств на ЭКГ-сигнале, позволяющий с высокой точностью оценивать по результатам обработки ЭКГ состояние психического здоровья человека.

**Ключевые слова:** электрокардиограмма, преобразование Гильберта – Хуанга, маркеры, пограничные психические расстройства.

А. Ю. Тычков

## ANALYSIS OF PATIENTS ECG SIGNALS WITH BORDER MENTAL DISORDERS BASED ON HNT

### Abstract.

*Background.* Diagnosis of mental disorders is carried out within the framework of medical standards and norms. Assessment of the patient's condition with borderline mental disorders is based on the results of the psychometric test (test methods). The purpose of the presented work is introduction into clinical practice of methods of a physician for assessment of a person's mental health state through the analysis of ECG signals.

*Materials and methods.* For the analysis of ECG signals, the Hilbert-Huang transform and data processing in the energy-frequency-time coordinate system are used. To study signals and determining of new parameters of a person's mental

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Гранта Президента для кандидатов наук (проект № МК-250.2017.8).

health state, a patented verified ECG signals database of patients with borderline mental disorders is used.

*Results.* An algorithm for determining borderline mental disorders on the ECG signal is developed, which allows to determine the period of occurrence of psychotraumatic situation on the amplitude-time and energy components of the signal obtained as a result of the Hilbert-Huang transform.

*Conclusions.* A new original algorithm for determining borderline mental disorders on the ECG signal is developed and investigated, which allows to assess person's mental health state according to the results of ECG processing with high accuracy.

**Key words:** electrocardiogram, Hilbert-Huang transform, markers, borderline mental disorders

## Введение

Оценка психического здоровья человека является междисциплинарным направлением исследования, находящимся на стыке медицинских и инженерных наук.

В мире в настоящее время сложилась крайне тревожная ситуация: в структуре патологий и смертности населения доминируют сердечно-сосудистые и онкологические заболевания, при которых, как правило, каждый пациент либо перенес, либо подвержен развитию психических расстройств.

В исследованиях различных авторов [1, 2] отмечается, что в условиях пограничных психических расстройств у пациента наблюдаются изменения функции сердца: автоматизм, проводимость, возбудимость и сократимость. В работе [2] отмечается, что при любой психотравмирующей ситуации у человека даже в отсутствие патологических отклонений в сердце возникают функциональные нарушения.

Особое внимание в работе [3] уделяется критическим состояниям пациента, возникающим в самом начале воздействия психотравмирующего эмоционального фактора. В период пограничных психических расстройств и длительности психотравмирующей ситуации у пациентов наблюдается потеря способности стабилизации артериального давления (АД) и частоты сердечных сокращений (ЧСС) [4]. В результате исследований [5] выявлено, что у 93 % наблюдаемых пациентов регистрируется нарушение ритма сердца, чаще желудочковые тахикардии, переходящие в трепетания или фибрилляцию желудочков, у 12 % наблюдаемых пациентов регистрируется увеличение сегмента *ST* и изменения зубца *T* на электрокардиограмме (ЭКГ).

При психических расстройствах наблюдаются и другие изменения на ЭКГ-сигналах, а именно регистрируются синусовые аритмии, бради- и тахикардия, желудочковые экстрасистолы, в редких случаях пароксизмальная тахикардия и мерцательная аритмия [6]. В работе [7] отмечается, что уровень стресса человека и состояние его нервной системы могут быть оценены по вариабельности сердечного ритма, временному ряду, полученному из разности во времени последовательности *R*-пикув ЭКГ.

Эффективность обнаружения значимых информативных параметров психических отклонений состояния здоровья на ЭКГ-сигналах определяется эффективностью и точностью измерения амплитудных и временных, частот-

ных и энергетических параметров ЭКГ-сигнала, достоверностью обнаружения и распознавания его отдельных элементов.

### Обоснование метода обработки

Задачи обработки ЭКГ в большинстве своем решаются врачом посредством анализа сигналов во временной области, что обусловлено сложной структурой самого сигнала и повышенным быстродействием при принятии решения [8]. Даже при отсутствии факторов развития психических расстройств существуют различные варианты ЭКГ-сигналов, что значительно осложняет подходы к его обработке и анализу во временной области [9]. В условиях развития цифровой обработки сигналов традиционными становятся методы частотного анализа ЭКГ для повышения достоверности диагностики критических состояний пациента [10].

Теория Гильберта – Хуанга (*HHT*) является новой для развития области цифровой обработки сигналов и данных [11, 12]. *HHT* применяется для обработки различных медицинских сигналов: ЭКГ [13], электроэнцефалография (ЭЭГ) [14], флюорографические [15], речевые [16] и другие сигналы. Все известные способы направлены на эффективное подавление помех в сигналах и поиск новых информативных параметров для повышения достоверности диагностики заболеваний сердца.

*HHT* по своей природе включает в себя два метода: декомпозиция сигнала на эмпирические моды (*DSEM*) и спектральный анализ Гильберта (*SAG*). Первые работы по обработке ЭКГ-сигналов с использованием *HHT* представлены в 2002 г. [17, 18].

Теория *HHT* заключается в том, что ЭКГ-сигнал на каждом уровне разложения представляется в виде амплитудно-временных составляющих. Первая группа составляющих представляет собой быстро осциллирующую, детализирующую, отвечающую за передачу высоких частот компоненту сигнала. Вторая составляющая представляет собой медленно изменяющуюся, аппроксимирующую и отвечающую за передачу низких частот компоненту сигнала.

Достоинством *HHT* является высокая адаптивность к исследуемому ЭКГ-сигналу, связанная с тем, что базисные функции, применяемые для разложения, формируются непосредственно из самого сигнала, что позволяет учесть его локальные максимумы и минимумы, структуру и присутствие помех.

Применение *HHT* позволяет представлять ЭКГ-сигнал в виде суммы амплитудно-временных составляющих:

$$x(t) = \sum_{i=1}^I ATC_i(t) + r_i(t), \quad (1)$$

где  $ATC_i(t)$  – амплитудно-временные составляющие сигнала (*amplitude-time component*, или *ATC*);  $r_i(t)$  – конечная составляющая сигнала;  $n$  – отсчет времени ( $0 < t \leq N$ ,  $N$  – число дискретных отсчетов времени в сигнале);  $i = 1, 2, \dots, I$  – номер *AFC*-сигнала.

Пример разложения ЭКГ-сигнала на амплитудно-временные составляющие приведен на рис. 1.

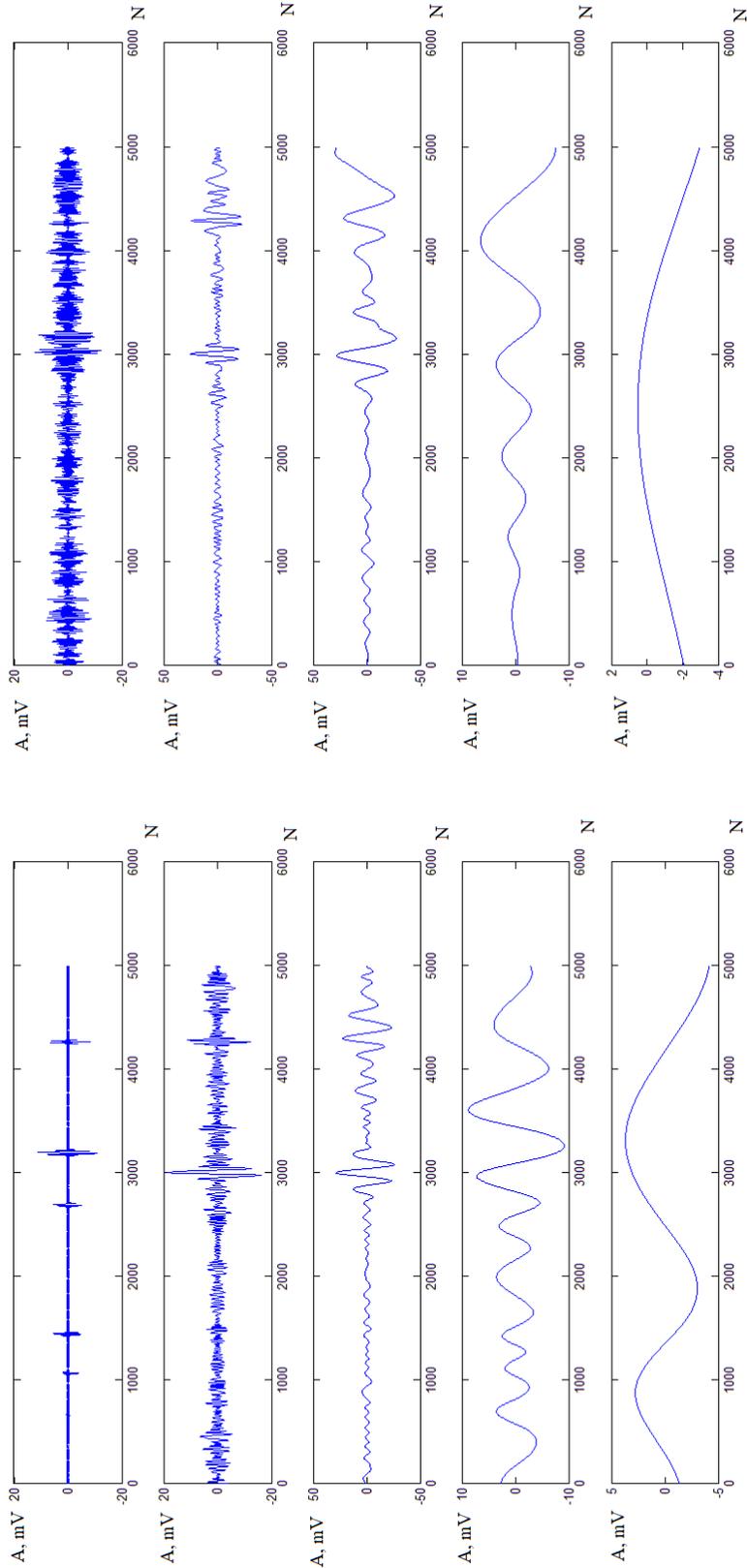


Рис. 1. АТС ЭКГ-сигнала

Для разложения использовался ЭКГ-сигнал пациента с пограничными психическими расстройствами длительностью 30 с, зарегистрированный с использованием сертифицированного оборудования Областной психиатрической больницы им. К. Р. Евграфова «Нейро-спектр-1», представляющего собой электроэнцефалограф-кардиограф, регистрирующий три стандартных и три усиленных отведения ЭКГ с частотой дискретизации сигнала 500 Гц.

По результатам разложения (рис. 1) исследуемого ЭКГ видно, что сигнал разложен на 9 амплитудно-временных составляющих и результирующий остаток, сумма которых позволит получить исследуемый ЭКГ-сигнал без потери его качества.

При проведении *SAG* для каждой *ATC* ЭКГ-сигнала вычисляется мгновенная частота, которая наносится на поверхность энергетической плотности (*surface of energy density* или *SED*) и вычисляется по формуле

$$E(n) = \sum_{i=1}^I ATC_i^2(n) \cdot e^{q[\omega_i(n)]dn}, \quad (2)$$

где  $q = \sqrt{-1}$  – мнимая единица;  $\omega$  – значение циклической частоты каждой составляющей ЭКГ-сигнала.

Пример построения *SED* ЭКГ-сигнала пациентов с пограничными психическими расстройствами приведен на рис. 2.

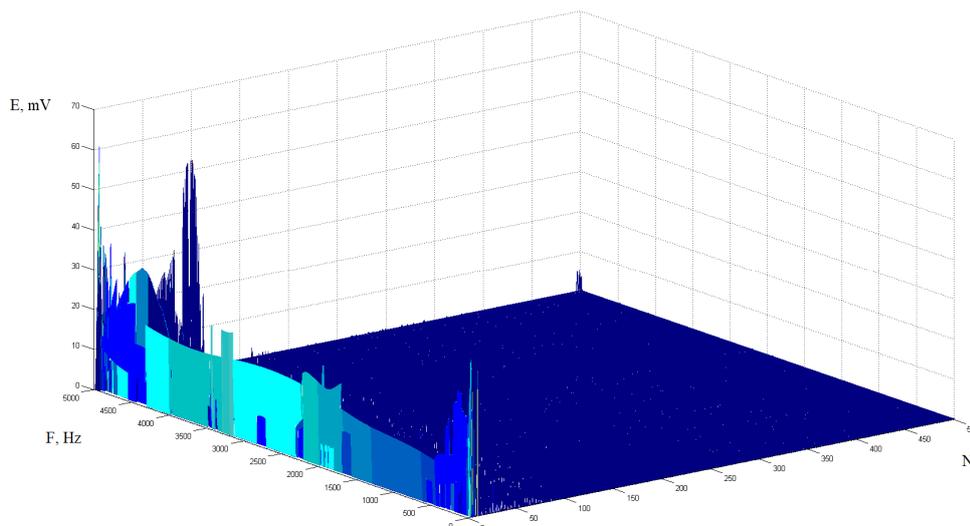


Рис. 2. *SAG* ЭКГ-сигнала

Из рис. 2 следует, что исследуемый ЭКГ-сигнал является нелинейным и нестационарным, характеристики его изменчивы в различных представлениях в системах координат энергия–частота–время.

### Формирование верифицированной базы сигналов

Для анализа ЭКГ-сигналов с помощью *ННТ* разработана и запатентована (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620266)

верифицированная база исследуемых ЭКГ-сигналов у пациентов с пограничными психическими расстройствами.

На базе Областной психиатрической больницы им. К. Р. Евграфова сформирована экспериментальная группа испытуемых, различающихся по гендерным и возрастным признакам. Для формирования экспериментальной группы испытуемых с психическими расстройствами отобрано 60 человек, обратившихся в первый день госпитализации. В количестве 70 человек сформирована контрольная группа испытуемых без признаков и клинических проявлений психических заболеваний.

По клиническим признакам состав каждой группы испытуемых представлен преимущественно четырьмя диагностическими категориями:

- F48.0 – неврастения;
- F45.3 – соматоформная дисфункция вегетативной нервной системы;
- F43.2 – расстройство приспособительных реакций;
- F41.2 – смешанное тревожное и депрессивное расстройство.

При обследовании контрольной и экспериментальной групп испытуемых зарегистрировано 780 ЭКГ-сигналов.

Для формирования базы исследуемых ЭКГ-сигналов применялся следующий принцип регистрации данных: продолжительность записи ЭКГ без нагрузки (без внешних раздражителей) и с нагрузкой составляла 30 с. Для формирования психотравмирующей ситуации и внешнего раздражителя испытуемым предлагалось произнести впервые увиденные два предложения скороговорки, сочетающие в себе большую часть произносимых звуков речевым аппаратом: «В бреду брэнчал брезгливый брадобрей, победно подбивая к буддизму бедняков», «Лара врала, что была королевой Урала. Лор просил, чтобы я поорал».

Рабочее окно разработанной базы данных приведено на рис. 3. Интерфейс пользователя позволяет осуществлять загрузку зарегистрированных ЭКГ-сигналов в цифровом виде, отображать исследуемый сигнал, а также систематизировать данные на группы психического здоровья, возраст и пол пациента.

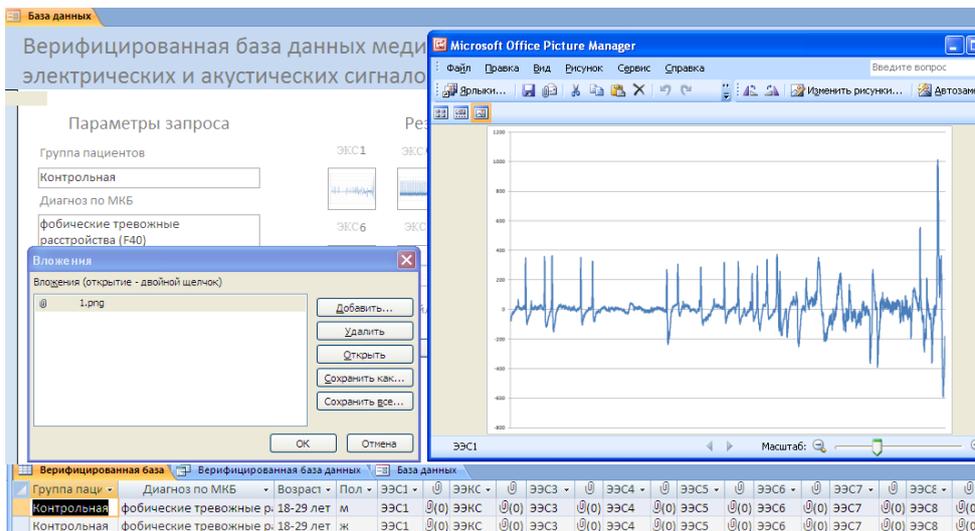


Рис. 3. Рабочее окно базы данных ЭКГ-сигналов

Результаты

С целью эффективного определения психических отклонений в состоянии здоровья человека на ЭКГ-сигнале предлагается алгоритм, приведенный на рис. 4.

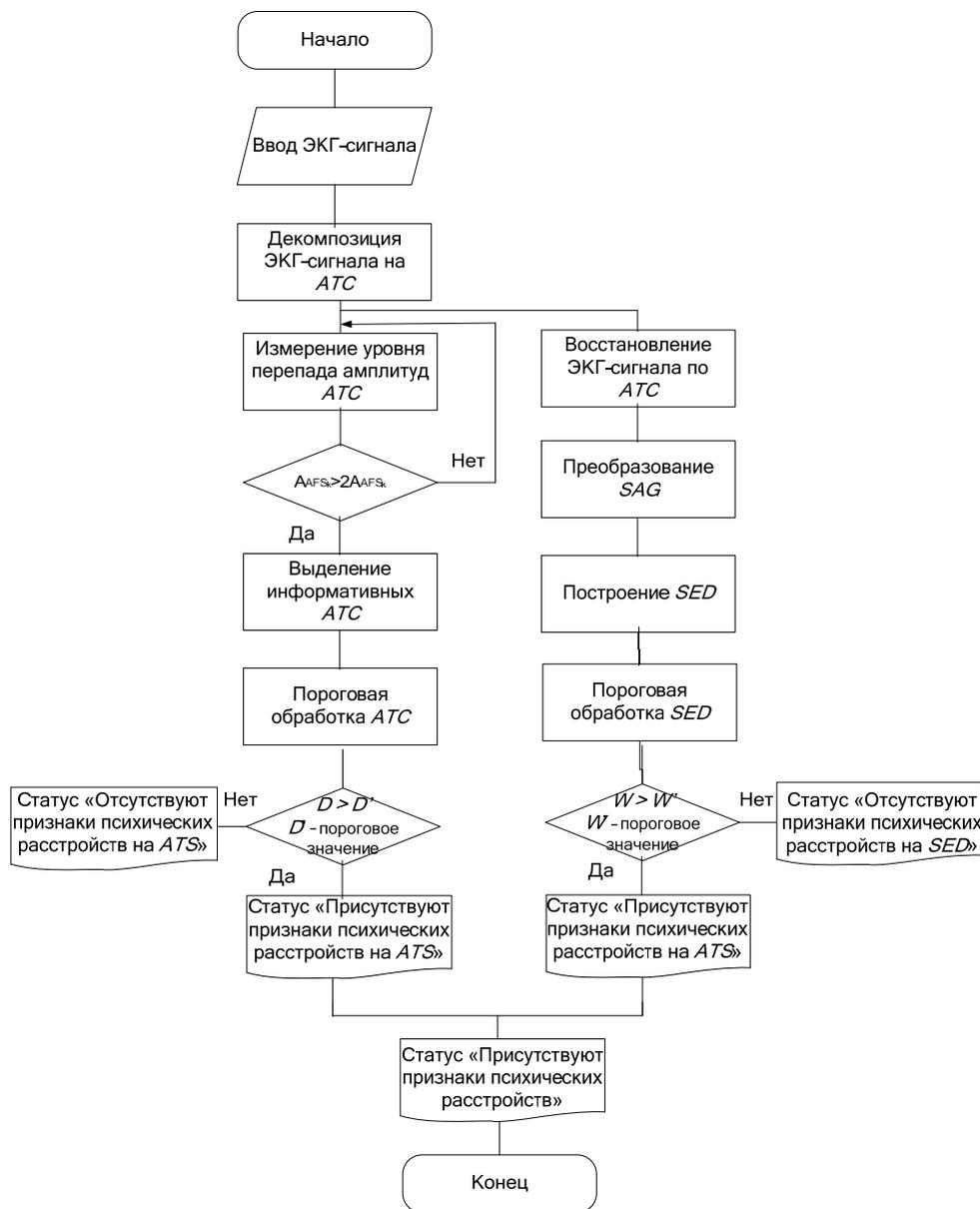


Рис. 4. Алгоритм определения пограничных психических расстройств на ЭКГ-сигнале

Суть алгоритма заключается в выполнении следующих действий:

1. Ввод ЭКГ-сигнала. Ввод сигнала осуществляется из сформированной базы сигналов пациентов с пограничными психическими расстройствами.
2. Декомпозиция ЭКГ-сигнала на АТС. Суть декомпозиции описана в предыдущем разделе.

3. Измерение уровня перепада амплитуд *ATC*. В рамках данного этапа используется скользящее окно с шагом не менее 1000 отсчетов *ATC* ЭКГ-сигнала. Результатом выполнения действия будет выделение отдельных информативных *ATC*, значение перепада амплитуд которых в пределах 1000 отсчетов превышает два порядка.

4. Пороговая обработка отдельных *ATC* ЭКГ-сигнала осуществляется согласно следующему выражению:

$$\eta(D_j(n)) = \begin{cases} x(D_j(n)) \times (|D_j(n)| - D'), & \text{если } |D_j(n)| > D', \\ 0, & \text{если } |D_j(n)| \leq D', \end{cases}$$

где  $D'$  – пороговое значение;  $D_j$  – коэффициент детализации ЭКГ-сигнала.

5. Пороговая обработка *SED* выполняется на всем участке зарегистрированного ЭКГ после восстановления *ATC*.

Результатом работы алгоритма определения пограничных психических расстройств на ЭКГ-сигнале является определение максимальных значений амплитуды и энергии, характеризующих момент возникновения психотравмирующей ситуации:

$$A_{\max} = \sum_{i=1}^I ATC_i(t) - \eta(D_j(t)), \quad (4)$$

$$E_{\max} = \sum_{i=1}^I ATC_i^2(t) \cdot e^{q \int \omega_i(t) dt} - V_{f_j}(t_i). \quad (5)$$

Исследование разработанного алгоритма определения пограничных психических расстройств на ЭКГ-сигнале показало, что на *ATC* и *SED* точно определяется период пограничных психических расстройств. Так, значение амплитуды сигнала на третьей и четвертой *AFC* ЭКГ испытуемых экспериментальной и контрольной групп в момент начала психотравмирующей ситуации в 3–5 раза выше значения амплитуды до ее возникновения (рис. 5).

При объемной пороговой обработке *SED* ЭКГ выделяются значения энергии сигнала испытуемых экспериментальной и контрольной групп в момент появления психотравмирующей ситуации, превышающие в 2–2,5 раза энергию ЭКГ до возникновения психотравмирующей ситуации (рис. 6).

В качестве критерия оценки предложенного подхода определения периода возникновения психотравмирующей ситуации используется ошибка первого и второго рода. Основной задачей является верное определение у испытуемого психического расстройства, поэтому ошибкой первого рода являлось неверное присваивания статуса «Норма» признакам пациента с патологиями в работе центральной нервной системы, а ошибкой второго рода – ложное присваивание статуса «Патология» признакам условно здорового испытуемого.

В табл. 1 приведены результаты работы предложенного подхода определения момента возникновения психотравмирующей ситуации. Значение ошибок первого и второго рода не превышает 4 %, что свидетельствует о возможности принятия в качестве решающего критерия для определения периода и момента возникновения пограничных психических расстройств у человека.

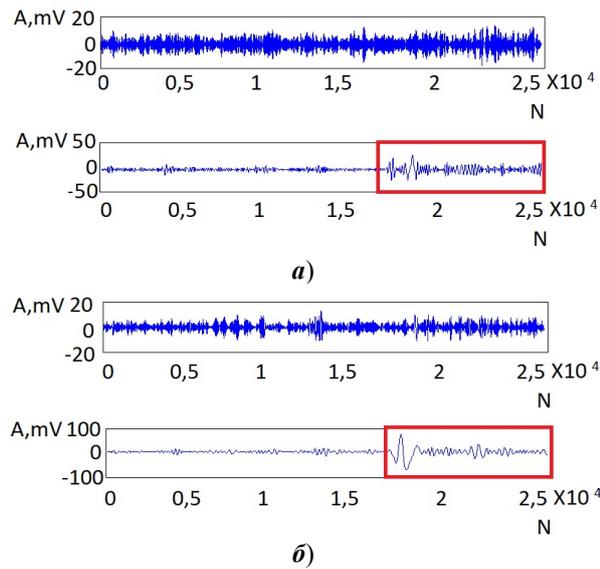


Рис. 5. АФС ЭКС в период психотравмирующей ситуации

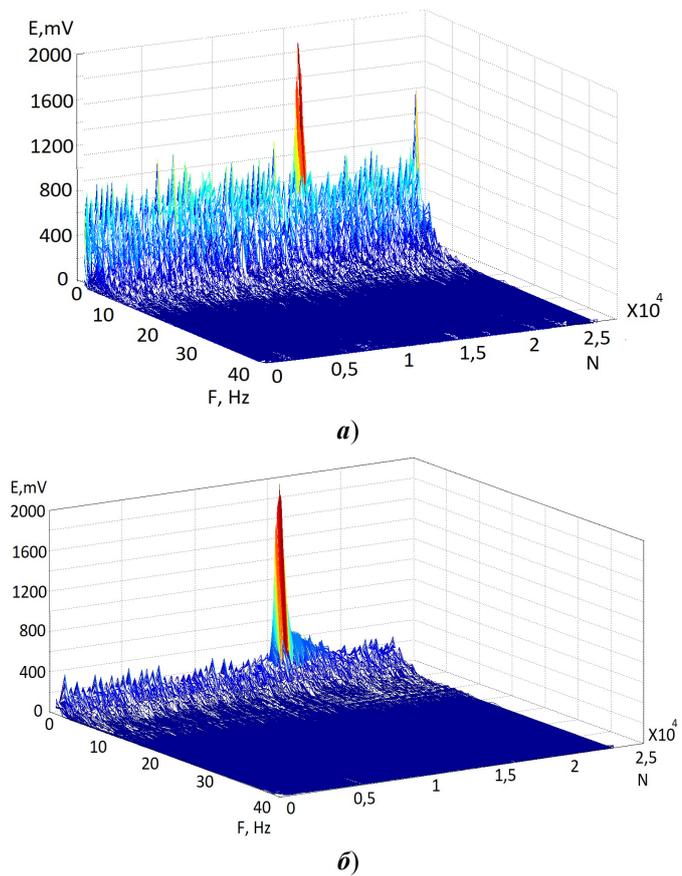


Рис. 6. SED ЭКГ-сигнала в период пограничных психических расстройств:  
а – SED ЭКГ-сигнала испытуемых экспериментальной групп;  
б – SED ЭКГ-сигнала контрольной группы

## Результаты исследований

Состояние	Результат определения		Ошибки первого и второго рода, %	
	Патология	Норма	1-го	2-го
Патология	400 чел.	12 чел.	1-го	3
Норма	16 чел.	400 чел.	2-го	4

**Заключение**

На основании проведенного обзора и собственных исследований определено, что *ННТ* эффективно применяется для обработки ЭКГ-сигналов пациентов с пограничными психическими расстройствами. Разработанный подход анализа ЭКГ-сигналов с использованием объемных спектральных поверхностей показал высокую вероятность определения периода появления психотравмирующих ситуаций на ЭКГ у различных пациентов.

**Библиографический список**

1. **Manea, M.** Brain-heart axis review article / M. Manea, M. Comsa et al. // *Med Life*. – 2015. – № 8. – P. 66–71.
2. **Purushothaman, S.** Study of ECG changes and its relation to mortality in cases of cerebrovascular accidents / S. Purushothaman, D. Salmani, et al. // *SciBiol Med*. – 2014. – № 5. – P. 434–436.
3. Современные представления о специфике и проблемах диагностики пограничных психических расстройств / А. Ю. Тычков, А. В. Агейкин, А. К. Алимуратов, В. Б. Калистратов, С. Ю. Митрошина // *Психическое здоровье*. – 2017. – Т. 15, № 5. – С. 69–75.
4. **Tychkov, A. Yu.** Development of the arterial pressure registration device with increased operating efficiency / A. Yu. Tychkov // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2015. – № 1 (33). – С. 92–98.
5. **Takeuchi, S.** Electrocardiograph abnormalities in intracerebral hemorrhage / S. Takeuchi, K. Nagatani et al. // *ClinNeurosci*. – 2015. – № 22. – P. 1959–1962.
6. **Каплан, А. Я.** Вариабельность ритма сердца и характер обратной связи по результату операторской деятельности у человека / А. Я. Каплан // *Журнал высшей нервной деятельности*. – 1999. – № 48. – С. 345–350.
7. **Agrafioti, F.** ECG in Biometric Recognition: Time Dependency and Application Challenges / F. Agrafioti // *Ph.D. Dissertation*. – Toronto : University of Toronto, 2011. – 172 p.
8. **Sornmo, L.** Time-Varying Digital Filtering of ECG Baseline Wander / L. Sornmo // *Medical and Biological Engineering and Computing*. – 1993. – P. 503–508.
9. **Konareva, I. N.** Peculiarities of cardiointervalographic induces in persons with behavioral types of A and B / I. N. Konareva // *Biology of chemistry*. – 2011. – № 24. – P. 161–168.
10. **Рангайян, Р. М.** Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход : пер. с англ. / Р. М. Рангайян ; под ред. А. П. Немирко. – М. : Физматлит, 2007. – 440 с.
11. **Huang, N.** The Hilbert-Huang transform and its applications / N. Huang. – Singapore : World scientific publishing, 2005. – 526 p.
12. **Huang, N.** An Introduction to Hilbert-Huang transform: a plea for adaptive data analysis / N. Huang // *Research center for adaptive data analysis*. – 2007. – 257 p.
13. **Kuzmin, A. V.** Development of effective noise biomedical signals processing method / A. V. Kuzmin, A. Y. Tychkov, A. K. Alimuradov // *International journal of applied engineering research*. – 2015. – № 4. – P. 8527–8531.

14. **Tychkov, A. Y.** Development and study of a virtual encephalograph / A. Y. Tychkov // *Biomedical Engineering*. – 2015. – № 49. – P. 37–41.
15. **Bodin, O. N.** An information-measurement system for preprocessing of photofluorographic images / O. N. Bodin, P. P. Churakov et al. // *Measurement Techniques*. – 2011. – № 4. – P. 41–44.
16. **Alimuradov, A. K.** Program Implementation of an Algorithm for Recognition of Speech Signals in the Labview Graphics Programming Environment / A. K. Alimuradov, M. V. Frantsuzov et al. // *Measurement Techniques*. – 2015. – № 58. – P. 965–969.
17. **Benitez, D.** The use of Hilbert Transform in ECG Signal Analysis / D. Benitez // *Comput. Biol.* – 2002. – № 3. – P. 399–406.
18. **Boudraa, A. O.** EMD-based signal noise reduction / A. O. Boudraa, J. C. Cexus // *World academy of science, engineering and technology*. – 2002. – 394 p.

### **References**

1. Manea M., Comsa M. et al. *Med Life*. 2015, no. 8, pp. 66–71.
2. Purushothaman S., Salmani D. et al. *SciBiol Med*. 2014, no. 5, pp. 434–436.
3. Tychkov A. Yu., Ageykin A. V., Alimuradov A. K., Kalistratov V. B., Mitroshina S. Yu. *Psikhicheskoe zdorov'e* [Mental health]. 2017, vol. 15, no. 5, pp. 69–75.
4. Tychkov A. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2015, no. 1 (33), pp. 92–98.
5. Takeuchi S., Nagatani K. et al. *ClinNeurosci*. 2015, no. 22, pp. 1959–1962.
6. Kaplan A. Ya. *Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti* [Journal of higher nervous activity]. 1999, no. 48, pp. 345–350.
7. Agrafioti F. *Ph.D. Dissertation*. Toronto: University of Toronto, 2011, 172 p.
8. Sornmo L. *Medical and Biological Engineering and Computing*. 1993, pp. 503–508.
9. Konareva I. N. *Biology of chemistry*. 2011, no. 24, pp. 161–168.
10. Rangayyan R. M. *Analiz biomeditsinskikh signalov. Prakticheskiy podkhod: per. s angl.* [Analysis of biomedical signals]. Moscow: Fizmatlit, 2007, 440 p.
11. Huang N. *The Hilbert-Huang transform and its applications*. Singapore: World scientific publishing, 2005, 526 p.
12. Huang N. *An Introduction to Hilbert-Huang transform: a plea for adaptive data analysis*. Research center for adaptive data analysis. 2007, 257 p.
13. Kuzmin A. V., Tychkov A. Y., Alimuradov A. K. *International journal of applied engineering research*. 2015, no. 4, pp. 8527–8531.
14. Tychkov A. Y. *Biomedical Engineering*. 2015, no. 49, pp. 37–41.
15. Bodin O. N., Churakov P. P. et al. *Measurement Techniques*. 2011, no. 4, pp. 41–44.
16. Alimuradov A. K., Frantsuzov M. V. et al. *Measurement Techniques*. 2015, no. 58, pp. 965–969.
17. Benitez D. *Comput. Biol.* 2002, no. 3, pp. 399–406.
18. Boudraa A. O., Cexus J. C. *World academy of science, engineering and technology*. 2002, 394 p.

---

#### **Тычков Александр Юрьевич**

кандидат технических наук, заместитель директора научно-исследовательского института фундаментальных и прикладных исследований, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tychkov-a@mail.ru

#### **Tychkov Aleksandr Yur'evich**

Candidate of engineering sciences, deputy director of scientific research institute of basic and applied research, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.9

**Тычков, А. Ю.**

**Анализ ЭКГ-сигналов пациентов с пограничными психическими расстройствами на основе *ННТ*** / А. Ю. Тычков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 1 (45). – С. 64–75. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-1-6