

УДК 004.021:004.75

АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ ЖЕНЩИН ПРИ ПАТОЛОГИИ В ВИДЕ ДЕПРЕССИИ



А. В. Сидоренко
Профессор
кафедры физики и
аэрокосмических
технологий БГУ,
доктор
технических наук,
профессор
sidorenkoA@yandex.by



Н.А. Солодухо
старший
преподаватель
кафедры
телекоммуникаций
и информационных
технологий БГУ,
магистр физико-
математических
наук
mikita.saladukha@gmail.com



П.П. Королевич
врач психиатр-нарколог,
врач функциональной
диагностики,
научный сотрудник отдела
психических и
поведенческих
расстройств ГУ
«Республиканский научно-
практический центр
психического здоровья».
p.korolevich@gmail.com



М.М. Скугаревская
заместитель директора
по научной работе ГУ
«Республиканский научно-
практический центр
психического здоровья»,
врач психиатр-нарколог,
доктор медицинских наук,
профессор
zamdirnauka@mentalhealth.by

А. В. Сидоренко

Окончила Белорусский государственный университет. Область научных интересов связана с разработкой методов и алгоритмов для создания систем на основе динамического хаоса в применении к сфере защиты информации различного назначения, а также обработки и анализа биоэлектрических сигналов

Н. А. Солодухо

Окончил Белорусский государственный университет, магистратуру и аспирантуру. Проводит научные исследования в области работы головного мозга, обработки биоэлектрических сигналов, шумового излучения.

П. П. Королевич

Окончил Белорусский государственный медицинский университет. Высшая квалификационная категория. Окончил ординатуру по специальности «психиатрия-наркология», окончил аспирантуру. Специалист в области электросудорожной терапии, электроэнцефалографии.

Принимает участие в исследованиях особенностей биоэлектрической активности головного мозга пациентов с психическими и поведенческими расстройствами.

М. М. Скугаревская

Окончила Белорусский государственный медицинский университет. Сфера научных интересов: ранняя диагностика психических расстройств, лечение и профилактика психических и поведенческих расстройств.

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования электроэнцефалограмм пациентов женского пола с патологией в виде депрессии. Электроэнцефалограммы регистрировались в стандартных отведениях. Проведены обработка и анализ как линейных, так и нелинейных параметров электроэнцефалограмм, выраженных относительной спектральной плотностью мощности отдельных ритмических компонент мозга, выборочной и перестановочной энтропиями, экспоненты самоподобия. Установлено, что нелинейные параметры электроэнцефалограмм изменяются сильнее относительно фонового состояния, по сравнению с линейными, и обладают меньшей относительной погрешностью.

Ключевые слова: электроэнцефалограмм, человек, депрессия, нелинейные параметры, выборочная энтропия, перестановочная энтропия, экспонента самоподобия.

Введение. Широкое распространение информационных технологий среди различных сфер деятельности человека коснулось и медицины, среди которых значительное место занимает неврология. Проблема заключается в том, что анализ распространенности патологии в виде депрессии за последние годы выявил тенденцию к возрастанию и сохранению случаев этой патологии [1]. Точное определение этой патологии позволит своевременно проводить лечебные или профилактические действия, что положительно скажется на здоровье населения и является актуальной задачей в настоящее время. Одним из способов уточнения наличия депрессии может стать использование не только классических методов анализа электроэнцефалограмм пациента, но и нелинейных, включая метод анализа выборочной и перестановочной энтропий, а также флуктуационный анализ с исключенным трендом для анализа с использованием экспоненты самоподобия.

Целью работы является обработка и анализ электроэнцефалограмм пациентов женского пола с патологией в виде депрессии. В качестве параметров, применяемых при обработке и анализе электроэнцефалограмм, использовались спектральная плотность мощности различных ритмических компонент мозга, а также выборочная, перестановочная энтропии и экспонента самоподобия.

Метод определения выборочной энтропии. Электроэнцефалограмма представляется в виде последовательности чисел временного ряда $u(j)$ из N точек $\{u(j), 1 \leq j \leq N\}$. Выборочная энтропия $SampEn$ временного ряда $u(j)$ из N точек $\{u(j), 1 \leq j \leq N\}$ вычисляется следующим образом. Формируется $N-m$ векторов

$$x_m(i) \text{ для } \{1 \leq i \leq N-m\}, \text{ где} \quad (1)$$

$$x_m(i) = \{u(i+k), 0 \leq k \leq m-1\}$$

является вектором из m точек от $u(i)$ до $u(i+m-1)$. Расстояние между двумя такими векторами $x_m(i)$ и $x_m(j)$ определяется как

$$d[x(i), x(j)] = \max \{|u(i+k) - u(j+k)| : 0 \leq k \leq m-1\}, \quad (2)$$

т.е. максимальное расстояние между их соответствующими скалярными компонентами.

Для вычисления выборочной энтропии $SampEn$ требуется следующее. Определим $B_i^m(r)$ как деленное на $(N-m-1)$ число векторов $x_m(j)$ на расстоянии r от $x_m(i)$, где j меняется в диапазоне $[1, N-m]$, причем $j \neq i$. Далее определяем

$$B^m(r) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r) \quad (3)$$

Аналогичным образом определяем $A_i^m(r)$ как деленное на $(N-m-1)$ число векторов $x_{m+1}(j)$ на расстоянии r от $x_{m+1}(i)$, где j меняется в диапазоне $[1, N-m]$, причем $j \neq i$. Далее определяем

$$A^m(r) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} A_i^m(r) \quad (4)$$

Таким образом, $B^m(r)$ представляет собой вероятность того, что две рассматриваемые последовательности будут совпадать на m точек. $A^m(r)$ это вероятность того, что две последовательности будут совпадать на $m+1$ анализируемых точек. Значение выборочной энтропии определяется:

$$SampEn(m, r, N) = -\ln\left(\frac{A^m(r)}{B^m(r)}\right) \quad (5)$$

Выборочная энтропия определяется как отрицательный натуральный логарифм вероятности того, что две похожие последовательности длиной m останутся похожими в следующей точке пространства задержанных координат. Таким образом, более низкое

значение выборочной энтропии свидетельствует о большем самоподобии во временной последовательности данных [2].

Метод перестановочной энтропии. Особенностью перестановочной энтропии H является то, что ее значение связано с характером изменения чисел в последовательности, представляющей сигнал электроэнцефалограммы [3]. Для расчета перестановочной энтропии временного ряда $\{x_i\}$ длиной N (т.е. $1 < i < N$), представляющего сигнал электроэнцефалограммы, необходимо:

1 Определим порядок n . Данный порядок определяет возможные варианты перестановок π_j ($j=1, \dots, n!$), которые строятся из чисел $1, \dots, n$. Их графическое представление изображено на рисунке ниже (рисунок 1) для $n=3$.

2 Далее необходимо присвоить индексу i рассматриваемого временного ряда $\{x_i\}_{i=1, \dots, N}$ значение 1, а счетчик количества каждого варианта перестановок z_j установить равным 0 для каждого π_j .

3 Определить порядок следования чисел в последовательности x_i, \dots, x_{i+n-1}

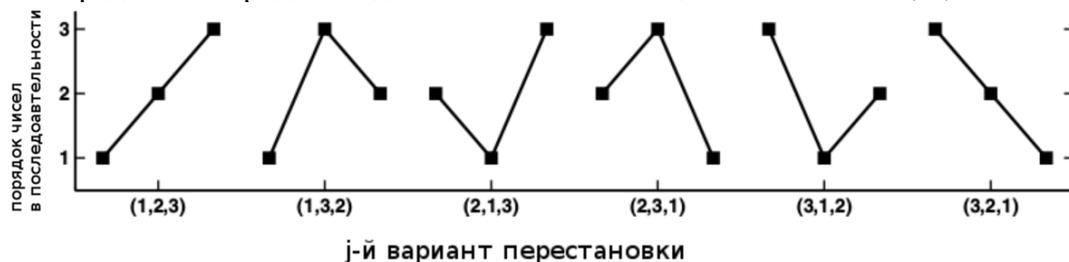


Рисунок 1. Графическое представление возможных вариантов перестановок для трех рассматриваемых чисел

4 Сравнить порядок следования чисел в последовательности x_i, \dots, x_{i+n-1} с существующими вариантами перестановки и увеличить счетчик соответствующего варианта перестановки на единицу.

5 Если выполняется условие $i \leq N-n$, следует увеличить i на единицу и перейти к шагу 3. Если выполняется условие $i > N-n$, необходимо перейти к следующему шагу.

6 Определить относительную частоту всех перестановок p'_j по формуле

$$p'_j = \frac{z_j}{\sum z_k} \quad (6)$$

где z_j или z_k – счетчик количества j -ого или k -ого варианта перестановок соответственно. Суммирование z_k в формуле (6) производится по всем возможным вариантам перестановок

7 Выбрать все p'_j больше 0 и вычислить перестановочную энтропию $PermEn$:

$$PermEn = -\sum_{j=1}^{n!} p'_j \log_2(p'_j) \quad (7)$$

Экспонента самоподобия с помощью метода флуктуационного анализа с исключенным трендом. Экспонента самоподобия рассчитывается согласно алгоритму флуктуационного анализа с исключенным трендом (DFA). Электроэнцефалограмма представляется временным рядом v из N элементов. Экспонента самоподобия h некоторого временного ряда $v(i)$, представляющего сигнал электроэнцефалограммы, где i изменяется от 1 до N , вычисляется с использованием метода флуктуационного анализа с исключенным трендом (DFA) следующим образом.

Определяется квадрат значения каждого элемента временного ряда:

$$x(i) = v^2(i), 1 \leq i \leq N \quad (8)$$

Далее от каждого элемента временного ряда $x(i)$, рассчитанного по формуле (8), вычитается среднее значение всего временного ряда X , состоящего из элементов, рассчитанных по формуле (8), и производится суммирование:

$$y(k) = \sum_{i=1}^k (x(i) - \langle x \rangle), 1 \leq k \leq N, \quad (9)$$

где $\langle x \rangle$ - это среднее значение временного ряда X в диапазоне $[1, N]$. Ряд Y , состоящий из рассчитанных по формуле (9) элементов, разбивается на сегменты длиной n (n временной масштаб наблюдения). Для каждого из этих сегментов определяется локальный тренд y_n с помощью метода наименьших квадратов. Определяется среднеквадратичное отклонение между $y(k)$ и $y_n(k)$ в диапазоне $[1, N]$:

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - y_n(k))^2} \quad (10)$$

В дальнейшем вычисление $F(n)$ по формуле (10) проводится для различных значений n из диапазона $n \in [4; N/4]$. Финальным шагом является построение зависимости значения преобразования $F(n)$ от n в двойном логарифмическом масштабе. Тангенс угла наклона данной зависимости $\log(F(n)) / \log(n)$ и дает значение экспоненты самоподобия, т.к. выполняется соотношение $F(n) \sim n^h$ [4].

Методика проведения исследований. Регистрация электроэнцефалограмм осуществлялась по схеме «10/20» с использованием электроэнцефалографа «Мицар-ЭЭГ-201» фирмы «Мицар». Относительная погрешность измерения напряжения электроэнцефалографа составляет 10% [5]. Анализировались ЭЭГ следующих отведений: C4, F3, F4, Fp1, O1, O2, P4, T4, T5, T6. Выбирались те отведения, в которых наблюдалось наиболее значительное изменение параметра. Обработка и анализ электроэнцефалограмм проводились в разработанной авторами компьютерной программе [6]. Электроэнцефалограммы женщин обрабатывались в следующих режимах: здоровые; депрессия. Количество испытуемых составило 28 человек, причем 21,4% из них были с депрессией (количество женщин с депрессией составило 6 человек? количество здоровых женщин составило 22 человека)/ Погрешность рассчитывалась с использованием коэффициентов Стьюдента с доверительной вероятностью 0,9.

Выборочная и перестановочная энтропии оценивались с помощью одноименных методов. Экспонента самоподобия рассчитывалась в соответствии с методом флуктуационного анализа с исключенным трендом. Спектральная плотность мощности рассчитывалась с помощью быстрого преобразования Фурье.

Результаты. При наличии патологии в виде депрессии спектральная плотность мощности дельта-ритма в отведении O1 возрастала на 6,8% относительно спектральной плотности мощности тета-ритма у здоровых женщин (рисунок 2).

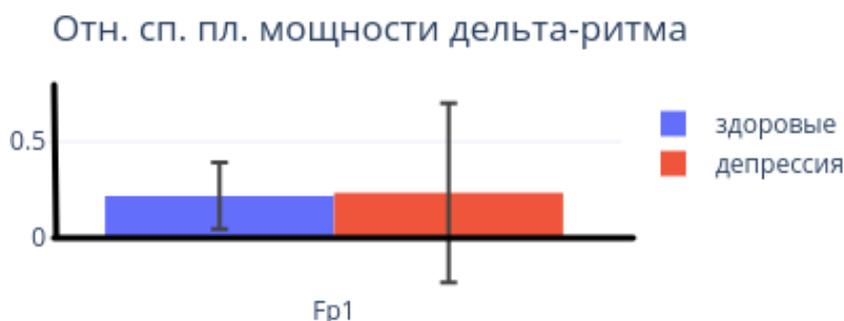


Рисунок 2. Гистограмма изменения спектральной плотности мощности дельта-ритма в отведении Fp1 при наличии патологии в виде депрессии

При наличии патологии в виде депрессии спектральная плотность мощности тета-ритма в отведении O1 падала на 5,7% относительно спектральной плотности мощности тета-ритма у здоровых женщин (рисунок 3).



Рисунок 3. Гистограмма изменения спектральной плотности мощности тета-ритма в отведении O1 при наличии патологии в виде депрессии

При наличии патологии в виде депрессии спектральная плотность мощности альфа-ритма в отведении T4 уменьшилась на 19,4% относительно значения у здоровых женщин, а в отведении T6 - на 19,5% относительно значения у здоровых женщин (рисунок 4).

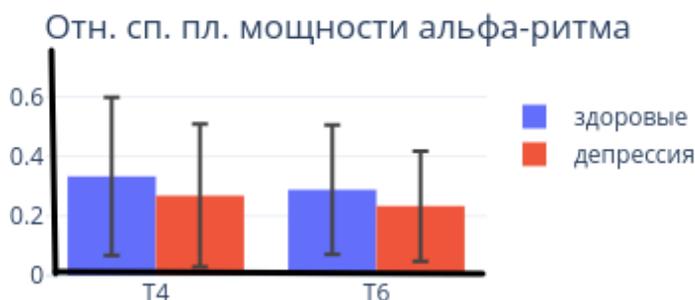


Рисунок 4. Гистограмма изменения спектральной плотности мощности альфа-ритма в отведениях T4, T6 при наличии патологии в виде депрессии

Спектральная плотность мощности бета-ритма в отведении F3 при наличии патологии в виде депрессии падала на 26,2% относительно значения у здоровых женщин (рисунок 5).



Рисунок 5. Гистограмма изменения спектральной плотности мощности бета-ритма в отведении F3 при наличии патологии в виде депрессии

При наличии патологии в виде депрессии спектральная плотность мощности гамма ритма в отведении C4 падала на 25,8% относительно значения у здоровых женщин, в отведении Fp1 - на 34%, в отведении T4 - на 29,9%, в отведении T6 - на 28,3% (рисунок 6).

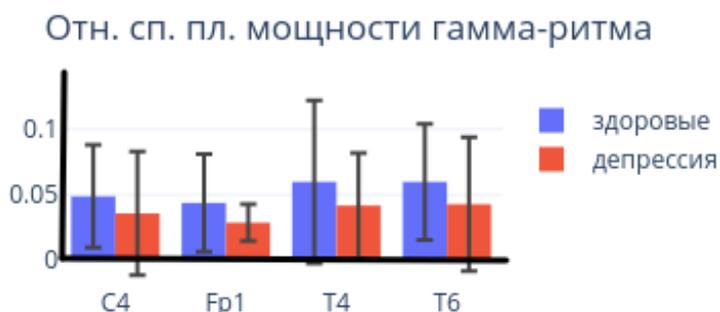


Рисунок 6. Гистограмма изменения спектральной плотности мощности гамма-ритма в отведениях C4, Fp1, T4, T6 при наличии патологии в виде депрессии

Выборочная энтропия в отведении F4 при наличии патологии в виде депрессии падала на 8,8% от значения выборочной энтропии в этом отведении у здоровых женщин, в отведении Fp1 - на 7,3%, в отведении O2 - на 5,1% от значения у здоровых женщин (рисунок 7).

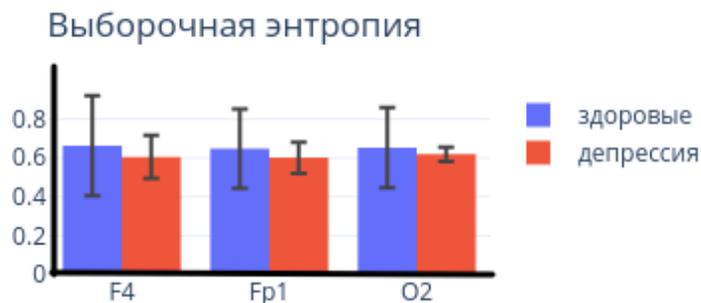


Рисунок 7. Гистограмма изменения выборочной энтропии в отведениях F4, Fp1, O2 при наличии патологии в виде депрессии

При наличии патологии в виде депрессии перестановочная энтропия в отведении Fp1 уменьшалась на 4,2%, а в отведении O2 - на 3,2% от соответствующего значения у здоровых женщин (рисунок 8).

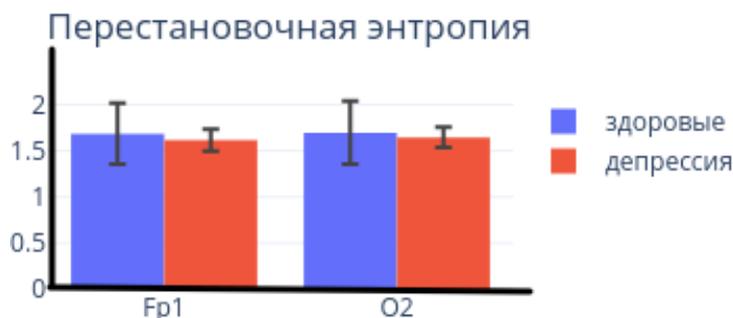


Рисунок 8. Гистограмма изменения перестановочной энтропии в отведениях Fp1, O2 при наличии патологии в виде депрессии

При наличии патологии в виде депрессии экспонента самоподобия в отведении C4 падает на 20,8%; в отведении F3 -на 25,6%; в отведении F4 - 17,2%; в отведении P4 - на 17,4%; в отведении T5 – на 23,3%; в отведении T6 – на 27% – от соответствующих значений экспоненты самоподобия у здоровых женщин (рисунок 9).

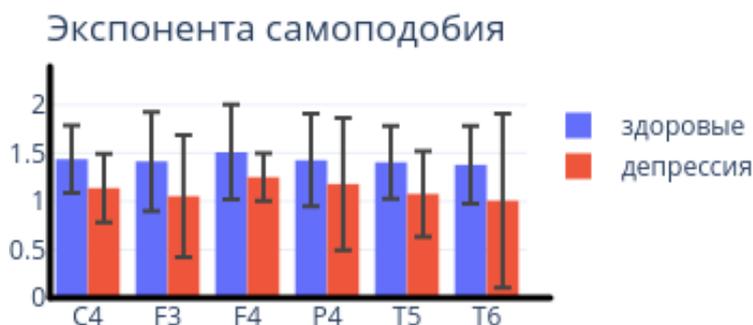


Рисунок 9. Гистограмма изменения экспоненты самоподобия в отведениях C4, F3, F4, P4, T5, T6 при наличии патологии в виде депрессии

Заключение. Проанализированы экспериментально полученные и обработанные линейные и нелинейные параметры электроэнцефалограмм женщин с патологией в виде депрессии. Проведен анализ следующих линейных параметров: спектральные плотности мощности дельта-, тета-, бета-, гамма-ритмов. Анализируемые нелинейные параметры электроэнцефалограмм представлены выборочной, перестановочной энтропиями, экспонентой самоподобия. Установлено, что нелинейные параметры при патологии

меняются сильнее, обладают меньшей относительной погрешностью по сравнению с линейными параметрами исследуемых электроэнцефалограмм. Тенденции изменения параметров электроэнцефалограмм в анализируемых отведениях при наличии патологии в виде депрессии сводятся к следующему. Спектральная плотность мощности дельта-ритма возросла на 6,8% относительно спектральной плотности мощности дельта-ритма у здоровых женщин. Спектральная плотность мощности тета-ритма падала на 5,7% относительно спектральной плотности мощности тета-ритма у здоровых женщин. Спектральная плотность мощности альфа-ритма в отведении уменьшилась на 19,4%-19,5% относительно значения у здоровых женщин. Спектральная плотность мощности бета-ритма падала на 26,2% относительно значения у здоровых женщин. Спектральная плотность мощности гамма-ритма падала на 25,8%-34% относительно значения у здоровых женщин. Выборочная энтропия падала на 5,1%-8,8% относительно значения у здоровых женщин. Перестановочная энтропия уменьшилась на 3,2%-4,2% относительно значения у здоровых женщин. Экспонента самоподобия снизилась на 17,4%-25,6% относительно значения у здоровых женщин.

Список литературы

- [1] Darío Moreno-Agostino, Global trends in the prevalence and incidence of depression: a systematic review and meta-analysis / Journal of Affective Disorders - 2021. - Vol. 281. - P. 235-243.
- [2] Richman J.S., Moorman J.R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy / American Journal of Physiology - Heart and Circulatory Physiology. - 2000. - Vol. 278, № 6. - P. 2039-2049.
- [3] Bandt C., Pompe B. Permutation Entropy: A Natural Complexity Measure for Time Series / Physical Review Letters. - 2002. - Vol. 88, iss. 17 - P. 1-4.
- [4] Golinska, A.K. Detrended Fluctuation Analysis (DFA) in biomedical signal processing: selected examples / Studies In Logic, Grammar And Rhetoric. - 2012. - Vol. 42, № 29. - P. 107-115.
- [5] Комплексы аппаратно-программные электроэнцефалографические "Мицар-ЭЭГ" : государственный реестр средств измерений, регистрационный № 43721-10 Российская Федерация, ТУ 9441-001-52118320-2009 / Н.И. Ханов; ООО "Мицар" - № 43721-10; 28.12.2009 // Государственный реестр средств измерений - 2009.
- [6] Компьютерная программа обработки и информационного анализа электроэнцефалограмм "jASCeeg" : свидетельство о добровольной регистрации и депонировании объекта авторского права / объекта смежных прав № 1577-КП / А.В. Сидоренко, Н.А. Солодухо - Оpubл. 19.01.2023.

ANALYSIS OF NONLINEAR PARAMETERS OF EEG IN WOMEN WITH DEPRESSION

A. V. Sidorenko
Professor of the
Department of
Physics and
Aerospace
Technologies, BSU,
Doctor of Science in
Technical Sciences

M.A. Saladukha
Senior Lecturer of the
Department of
Telecommunications
and Information
Technology, BSU,
Master of Physical and
Mathematical Sciences

P. P. Korolevich
Psychiatrist-Narcologist,
Functional Diagnostics
Doctor, Researcher of
Department of Mental and
Behavioral Disorders of
Republican Scientific and
Practical Center for Mental
Health

M. M. Skugarevskaya
Deputy Director for
Scientific Work of
Republican Scientific and
Practical Center for Mental
Health, Psychiatrist-
Narcologist, Doctor of
Science in Medical Sciences,
Professor

Abstract: Experimental studies of electroencephalograms (EEGs) of female patients with depression were conducted. EEGs were recorded in standard leads. Both linear and nonlinear parameters of EEGs, expressed as the relative spectral power density of individual rhythmic brain components, sample entropy, permutation entropy, and self-similarity exponent, were processed and analyzed. It was found that nonlinear EEG parameters change more significantly compared to the baseline state, compared to linear ones, and have a lower relative error.

Keywords: electroencephalogram, human, depression, nonlinear parameters, sample entropy, permutation entropy, self-similarity exponent.