

УДК 537.874

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ШУМОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



А.В. Сидоренко

профессор
факультета радиофизики и
компьютерных технологий
Белорусского государственного
университета, доктор технических наук



Н.А. Солодухо

старший преподаватель факультета
радиофизики и компьютерных
технологий Белорусского
государственного университета,
магистр физико-математических наук

Белорусский государственный университет, Республика Беларусь

E-mail: sidorenkoa@yandex.ru

Сидоренко А.В.

Окончила Белорусский государственный университет. Специалист в области обработки и анализа биомедицинских сигналов; применения нелинейных методов, включая детерминированный хаос, в области защиты информации.

Солодухо Н.А.

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

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования электроэнцефалограмм оператора, находящегося в условиях электромагнитного шумового излучения. Электроэнцефалограммы анализировались в стандартных отведениях. Проанализированы количественные параметры эмоционального состояния оператора, выраженные спектральной плотностью мощности ритмических компонент мозга, выборочной и аппроксимационной энтропий, корреляционной размерностью. Показано, что при действии излучения оператор не испытывает сонливости, но испытывает отрицательную эмоцию.

Ключевые слова: шум, человек, излучение, эмоции, сон, электроэнцефалограмма

Введение. В настоящее время человек все чаще встречается с электромагнитным излучением, как при работе со специальным оборудованием, так и при работе с бытовыми приборами, такими как компьютеры, телевизоры, СВЧ-печи, мобильные телефоны, смартфоны и т.д. Для защиты информации от несанкционированного доступа по каналам электромагнитных излучений и наводок могут использоваться радиопоглощающие материалы и генераторы электромагнитного шума. Важно оценить состояние центральной нервной системы оператора под воздействием электромагнитного шумового излучения. В частности оценка сонливости и эмоционального состояния будет способствовать введению и коррекции норм работы с оборудованием, генерирующим электромагнитное излучение.

На сегодняшний момент в научной литературе присутствуют противоречивые данные о влиянии электромагнитного излучения [1,2], в том числе и шумового [3,4,5,], на центральную нервную систему человека.

В связи с этим целью работы стало исследование сонливости и эмоционального состояния оператора под воздействием генератора электромагнитного излучения с использованием в качестве количественных параметров электроэнцефалограмм: спектральной плотности мощности, аппроксимационной и выборочной энтропий, корреляционной размерности.

Метод задержанной координаты. Рассмотрим метод расчета корреляционной размерности и энтропии Колмогорова – метод задержанной координаты [6,7]. Временная реализация электроэнцефалограммы представляется в виде последовательности чисел:

$$x_1, x_2, \dots, x_n,$$

где $x_n = x(n\tau)$, τ -время выборки, n -целое число.

Эта последовательность порождает m -мерные векторы, лежащие в m -мерном фазовом пространстве:

$$\overline{x}_i^T = (x_i, \dots, x_{i+m-1}),$$

где T-знак транспонирования.

Состояние системы в реконструированном m -мерном фазовом пространстве определяется m -размерными точками для каждой временной реализации $x(t)$

$$x_i^m = (m^{1/2})(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m-1}).$$

Корреляционный интеграл $C_m(l)$ - это функция, равная вероятности того, что расстояние между двумя реконструированными векторами \overline{x}_i меньше l .

Корреляционная размерность d определяется

$$d = \lim_{r \rightarrow 0} [\lg(C_m(r)) / \lg(r)],$$

где $C_m(r)$ - корреляционный интеграл, r - размер ячейки разбиения, или коэффициент подобия.

Корреляционный интеграл записывается

$$C_m(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \theta(r - |\overline{x}_i - \overline{x}_j|),$$

где $\theta=0$ при $t < 0$, $\theta=0,5$ при $t=0$, $\theta=1$ при $t > 0$, θ - функция Хевисайда, N - число точек, используемых для оценки размерности.

Найдено, что для малых r поведение функции $C_m(r)$ может быть описано [8]

$$C_m(r) = r^d,$$

где d - параметр, близкий к фрактальной размерности странного аттрактора.

Для достоверной оценки корреляционной размерности d размерность соответствующих фазовых пространств должна удовлетворять условию Мане [8]

$$m \geq 2d+1.$$

Численный расчет корреляционного интеграла проводится с использованием графической процедуры и определяется наклоном прямой

$$\{[\lg C_m(l)] \text{ vs } (\lg l)\}.$$

При вычислении корреляционного интеграла расстояние между m -размерными векторами определяется в виде

$$\rho(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \max |x_{i+k} - x_{j+k}|.$$

Энтропия Колмогорова определяется выражением

$$K = \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \lg [C_m(r) / C_{m+1}(r)].$$

Энтропия Колмогорова показывает меру хаотичности системы. Положительное и конечное значение энтропии показывает, что в системе доминирует хаотичное движение. Нулевое значение энтропии свидетельствует о цикличности явления в фазовом пространстве. Бесконечное значение энтропии говорит о случайности и неопределенности явлений, под действием которых генерируется анализируемый сигнал [9]. Корреляционная размерность - мера сложности динамического процесса, лежащего в основе временной последовательности. Преимуществом является то, что она слабо меняется при наличии шумовой высокочастотной компоненты даже в случае небольших последовательностей [10,11]. Погрешность метода составляет не более 16,8%.

Метод выборочной и аппроксимационной энтропий. Для расчета аппроксимационной энтропии временного ряда нужно предварительно определить длину временного ряда, параметр m , отображающий длину сравниваемых последовательностей, и параметр r , называемый допустимым отклонением. При сравнении временных рядов с разной амплитудой в качестве допустимого отклонения используют параметр $r \cdot SD$, где SD - среднеквадратичное отклонение исследуемой последовательности (сигнала). Аппроксимационная энтропия временного ряда $u(j)$ из N точек $\{u(j), 1 \leq j \leq N\}$ вычисляется следующим образом. Формируется $N-m$ векторов

$$\begin{aligned} x_m(i) & \text{ для } \{1 \leq i \leq N-m\}, \text{ где} \\ x_m(i) & = \{u(i+k), 0 \leq k \leq m-1\} \end{aligned}$$

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

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

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

Зададим B_i - число векторов $x_m(j)$ на расстоянии r от вектора $x_m(i)$, и A_i - число векторов $x_{m+1}(j)$ на расстоянии r от вектора $x_{m+1}(i)$. Определим функцию

$$C_i^m(r) = B_i / (N-m+1).$$

$C_i^m(r)$ это вероятность того, что любой вектор $x_m(j)$ находится на расстоянии r от $x_m(i)$. Функция $\Phi^m(r)$ задается следующим образом:

$$\Phi^m(r) = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln(C_i^m(r)).$$

Тогда аппроксимационная энтропия определяется:

$$\text{ApEn} = \Phi^m(r) - \Phi^{m+1}(r)$$

Аппроксимационная энтропия разработана на основе энтропии Колмогорова. Преимущество: наличие шума изменяет ее не так сильно, как энтропию Колмогорова [12,13]. Недостаток: аппроксимационная энтропия сильно зависит от длины сигнала (последовательности) и она ниже ожидаемого значения для коротких сигналов (последовательностей). Погрешность расчета аппроксимационной энтропии составляет 0,18% при значениях размерности вложения 2 и параметра $r=0,2$ (такие параметры использованы в нашей работе).

Для вычисления выборочной энтропии 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 $j \neq i$, чтобы исключить измерение расстояния до самого себя. Далее определяем

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

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 $j \neq i$, чтобы исключить измерение расстояния до самого себя. Далее определим

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

Таким образом, $B^m(r)$ это вероятность того, что две последовательности будут совпадать для m точек, а $A^m(r)$ это вероятность того, что две последовательности будут совпадать для $m+1$ точек. Значение выборочной энтропии равно:

$$\text{SampEn}(m,r,N) = -\ln(A^m(r)/B^m(r))$$

Выборочная энтропия – модификация аппроксимационной энтропии. Выборочная энтропия представляет собой 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 говорит о большем самоподобии во временной последовательности [14,15]. Выборочная энтропия сохраняет преимущества и недостатки, характерные для аппроксимационной энтропии. Однако есть преимущество выборочной энтропии над аппроксимационной энтропией: в отличие от аппроксимационной энтропии при расчете выборочной энтропии не учитывается расстояние вектора до самого себя (т.е. убрана излишняя информация, нет сравнения вектора последовательности с самим собой). Погрешность расчета выборочной энтропии составляет 0,19% при значениях размерности

вложения 2 и параметра $r=0,2$ (такие параметры использованы в нашей работе и работах других авторов).

Методика проведения исследований. Регистрация электроэнцефалограмм осуществлялась по схеме «10/20» с использованием электроэнцефалографа «Нейрокартограф» фирмы МБН. Обработка и анализ электроэнцефалограмм проводились в разработанной авторами информационно-измерительной системе, адаптированной для работы с электроэнцефалограммами [6]. Объектом исследований являлись электроэнцефалограммы отведений: Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6. Электроэнцефалограммы обрабатывались в следующих режимах: фон, наличие генератора электромагнитного шумового излучения. В фоне использовались электроэнцефалограммы здорового человека. Спектральная плотность мощности ритмов головного мозга рассчитывалась с помощью быстрого преобразования Фурье. Анализируемые диапазоны ритмических составляющих включали: бета-ритм (12–20 Гц), тета-ритм (4-8 Гц), дельта-ритм (0-4 Гц). Выборочная и аппроксимационная энтропии рассчитывались с помощью соответствующих методов. Корреляционная размерность рассчитывалась методом задержанной координаты.

Параметр r при расчете аппроксимационной и выборочной энтропий равнялся 0,2; размерность вложения равнялась 2.

Результаты. Оценим сонливость оператора с использованием спектральной плотности мощности.

Спектральная плотность мощности тета-ритма, усредненная по всем отведениям, возросла на 40,2% от фонового состояния (рисунок 1)

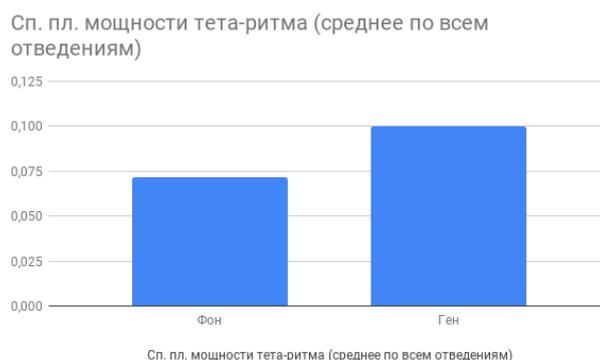


Рисунок 1. – Изменения спектральной плотности мощности тета-ритма под действием генератора шума, усредненная по всем отведениям

Возрастание спектральной плотности мощности тета-ритма, усредненной по всем отведениям, может являться следствием усталости или сонливости (депривации сна), если руководствоваться рисунком 2 и данными из [16]).

Изменения спектральной плотности мощности в отведениях Fp1, Fp2, T3, T4 под воздействием генератора электромагнитного шума представлены на рисунке 3. В отведении Fp1 наблюдался прирост значения спектральной плотности мощности тета-ритма при наличии генератора шума более, чем в 2,2 раза относительно фонового значения; в отведении Fp2 спектральная плотность мощности тета-ритма при наличии генератора шума увеличилась на 20,8% относительно фона; в отведении T3 наблюдался прирост значения спектральной плотности мощности тета-ритма при наличии генератора шума в 2,5 раза относительно фонового значения; в отведении T4 наблюдалось понижение спектральной плотности мощности тета-ритма при наличии генератора шума на 10,5% относительно фона. В отведении Fp1 снижение значения спектральной плотности мощности дельта-ритма при

наличии генератора шума составило 47,1% относительно фонового значения; в отведении Fp2 спектральная плотность мощности дельта-ритма при наличии генератора шума уменьшилась на 8,3% относительно фона.



Рисунок 2. – Спектральная плотность мощности тета-ритма, усредненная по всем отведениям, при усталости и депривации сна [16]

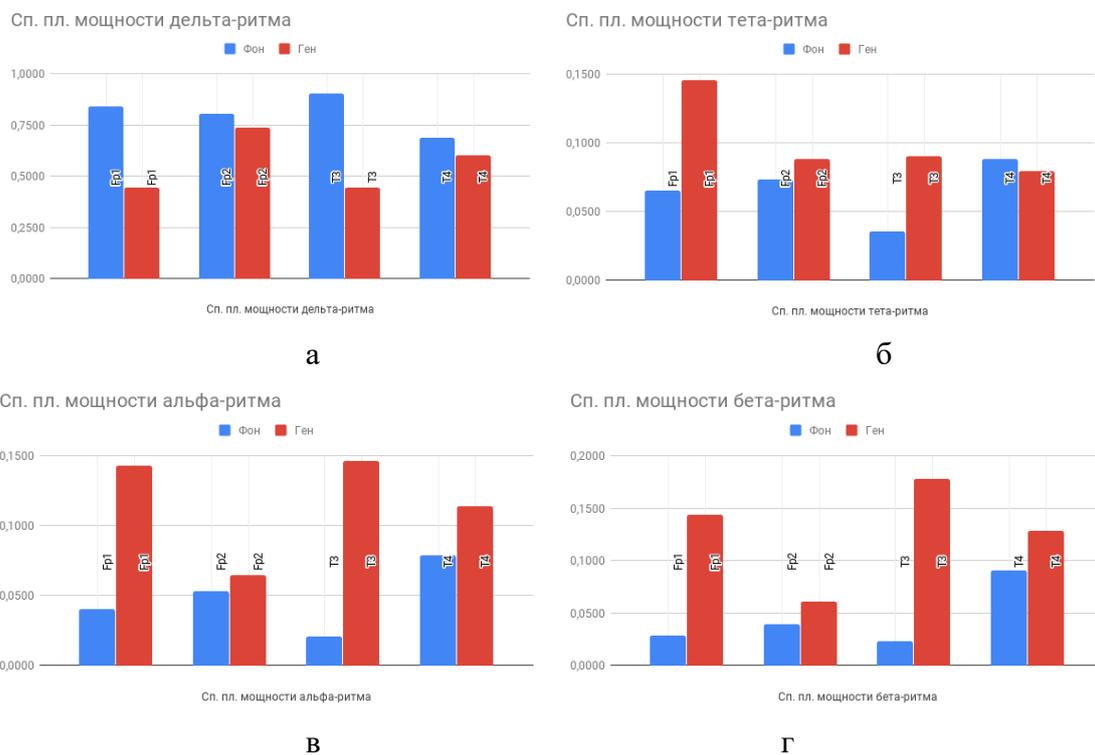


Рисунок 3. – Спектральная плотность мощности в отведениях Fp1, Fp2, T3, T4 под воздействием генератора электромагнитного шума

Изменения спектральной плотности мощности в отведениях Fp1, Fp2, T3, T4 при сонливости представлены на рисунке 4.

Спектральная плотность мощности дельта-ритма под действием генератора шума уменьшается во всех анализируемых 4 отведениях, а при сонливости - возрастает (рисунки 3а и 4а). Спектральная плотность мощности тета-ритма под действием генератора шума увеличивается в трех (Fp1, Fp2, T3) из четырех анализируемых отведений, а при сонливости -

уменьшается во всех четырех отведениях (рисунки 3б и 4б). Спектральная плотность мощности альфа-ритма возрастает во всех 4 анализируемых отведениях при наличии излучения генератора шума, а при сонливости - уменьшается (рисунки 3в и 4в). Спектральная плотность мощности бета-ритма возрастает при наличии излучения генератора шума, а при сонливости - уменьшается (рисунки 3г и 4г). Это позволяет сделать предварительный вывод (т.е. вывод, основанный только на данных [17] и рисунков 3 и 4), что оператор под воздействием излучения генератора электромагнитного шума сонливости не испытывает.

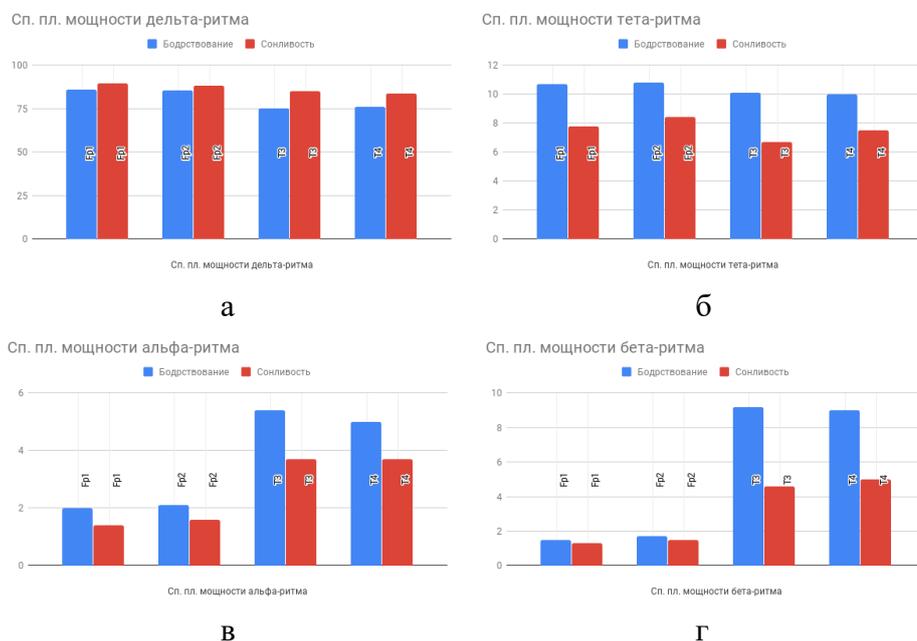


Рисунок 4. – Спектральная плотность мощности в отведениях Fp1, Fp2, T3, T4 под воздействием сонливости [17]

Изменения спектральной плотности мощности в отведениях F3, F4 под воздействием генератора электромагнитного шума представлены на рисунке 5. Изменения спектральной плотности мощности в отведениях F3, Fz, F4 под воздействием сонливости (при депривации сна) представлены на рисунке 6.

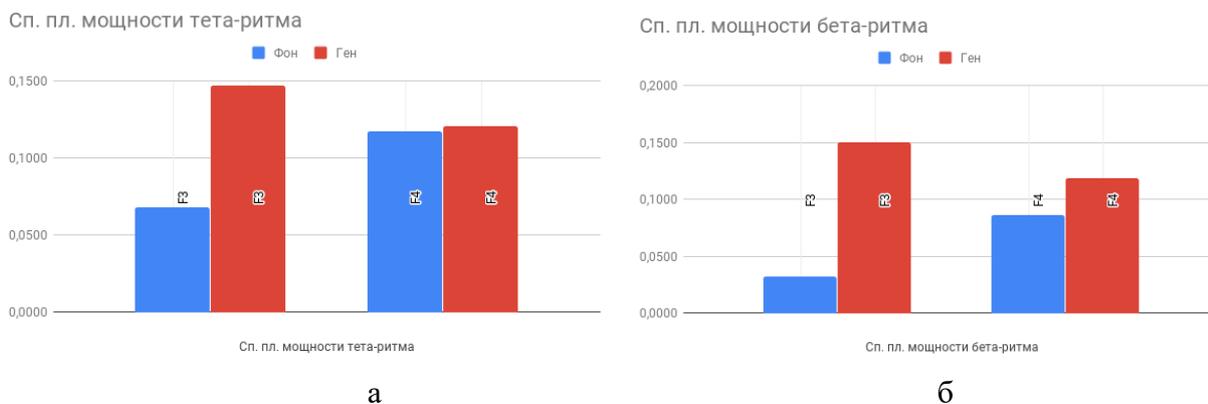


Рисунок 5. – Спектральная плотность мощности тета-ритма (а) и бета-ритма (б) в отведениях F3, F4 под воздействием генератора электромагнитного шума

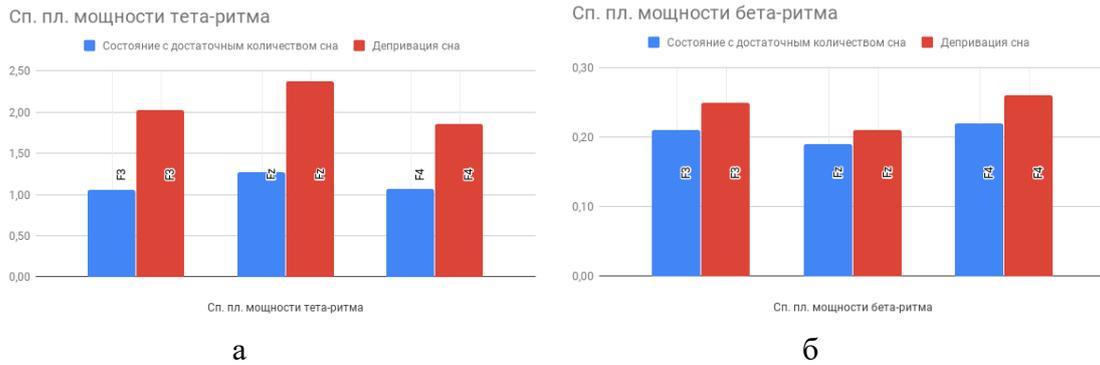


Рисунок 6. – Спектральная плотность мощности тета-ритма (а) и бета-ритма (б) в отведениях F3, Fz, F4 при депривации сна [18]

В отведении F3 значение спектральной плотности мощности тета-ритма при наличии генератора шума повысилось почти в 2,2 раза относительно фонового значения; в отведении F4 прирост спектральной плотности мощности тета-ритма при наличии генератора шума составил 2,5% относительно фона; в отведении F3 значение спектральной плотности мощности бета-ритма при наличии генератора шума повысилось в 4,6 раза относительно фонового значения; в отведении F4 прирост спектральной плотности мощности бета-ритма при наличии генератора шума составил 37,3% относительно фона.

Под воздействием генератора шума наблюдается возрастание спектральной плотности мощности тета-ритма и бета-ритма в отведениях F3 и F4. Такая же тенденция наблюдается и при депривации сна (рисунки 5 и 6). Это позволяет сделать предварительный вывод (т.е. вывод, основанный только на данных [18] и рисунках 5 и 6) что человек под действием генератора шума испытывает сонливость.

Оценим сонливость оператора под действием генератора электромагнитного шума с использованием таких нелинейных параметров, как аппроксимационная энтропия и выборочная энтропия.

В отведении Fp1 наблюдался прирост значения аппроксимационной энтропии (рисунок 7) при наличии генератора шума в 2,8 раза относительно фонового значения; в отведении Fp2 аппроксимационная энтропия при наличии генератора шума увеличилась на 39,7% относительно фона; в отведении F3 значение аппроксимационной энтропии при наличии генератора шума повысилось почти в 2,6 раза относительно фонового значения; в отведении F4 прирост аппроксимационной энтропии при наличии генератора шума составил 20,3% относительно фона; в отведении C3 наблюдалось возрастание значения аппроксимационной энтропии при наличии генератора шума в 2,7 раза относительно фонового значения; в отведении C4 аппроксимационная энтропия при наличии генератора шума выросла на 16,0% относительно фона; в отведении P3 наблюдалось повышение значения аппроксимационной энтропии при наличии генератора шума почти в 2,6 раза относительно фонового значения; в отведении P4 наблюдался прирост аппроксимационной энтропии при наличии генератора шума на 9,0% относительно фона; в отведении O1 наблюдался рост значения аппроксимационной энтропии при наличии генератора шума почти в 2,7 раза относительно фонового значения; в отведении O2 аппроксимационная энтропия при наличии генератора шума повысилась на 2,0% относительно фона; в отведении F7 значение аппроксимационной энтропии при наличии генератора шума возросло почти в 5,0 раза относительно фонового значения; в отведении F8 аппроксимационная энтропия при наличии генератора шума увеличилась на 12,6% относительно фона; в отведении T3 наблюдался прирост значения аппроксимационной энтропии при наличии генератора шума почти в 3,9

раза относительно фонового значения; в отведении T4 наблюдался прирост аппроксимационной энтропии при наличии генератора шума на 18,9% относительно фона; в отведении T5 значение аппроксимационной энтропии при наличии генератора шума повысилось почти в 3,7 раза относительно фонового значения; в отведении T6 аппроксимационная энтропия при наличии генератора шума выросла на 10,0% относительно фона (рисунок 7).

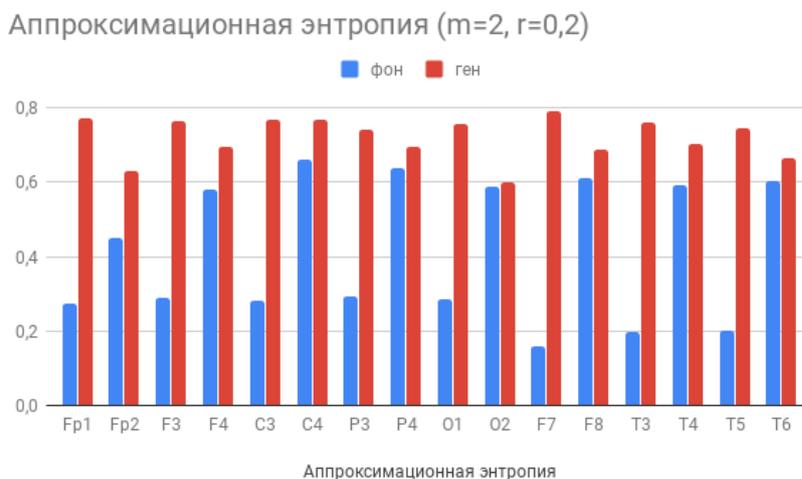


Рисунок 7. – Гистограммы изменения аппроксимационной энтропии электроэнцефалограмм во всех измеряемых отведениях при наличии генератора шума

Рассмотрим связь воздействия генератора электромагнитного шума и сонливости. Под действием генератора шума наблюдается возрастание аппроксимационной энтропии во всех измеренных отведениях. При сонливости же (если руководствоваться рисунком 8) возрастание выборочной энтропии наблюдается только в отведении F3, в остальных отведениях (Fp2, Fp1, F4, Fz, C4, C3, Cz, P4) аппроксимационная энтропия убывает. Руководствуясь вышесказанным можно предварительно (т.е. только на основании рисунков 7 и 8 и данных из [19]) заключить, что у оператора под воздействием генератора шума сонливости не наблюдается.

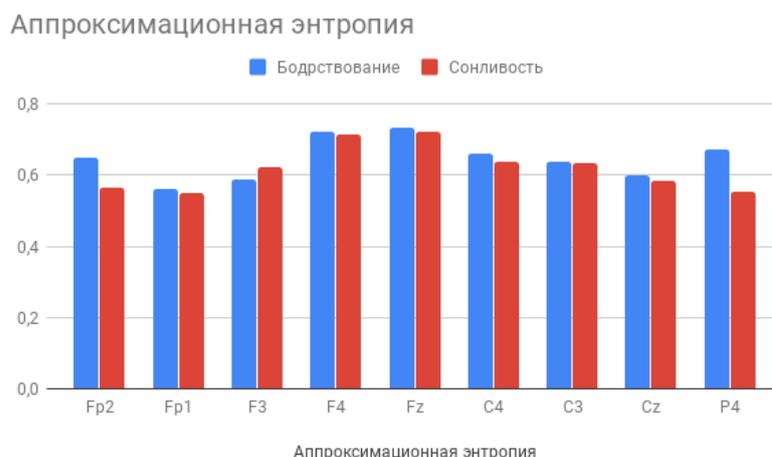


Рисунок 8. – Изменение аппроксимационной энтропии при сонливости [19]

Под действием генератора шума в отведении Fp1 выборочная энтропия выросла в 2,8 раза относительно фонового значения (рисунок 9). В отведении Fp2 выборочная энтропия при наличии генератора шума увеличилась на 43,8% относительно фона; в 2,8 раза - в отведении F3; на 25,5% - в отведении F4; в отведении C3 наблюдалось возрастание значения выборочной энтропии при наличии генератора шума в 2,9 раза относительно фонового значения; в отведении C4 выборочная энтропия при наличии генератора шума выросла на 21,8% относительно фона; в отведении P3 значение выросло более, чем в 3 раза от фонового значения; в отведении P4 - значение выросло на 15,6%; в 3,6 раза - в отведении O1; увеличивалась на 8,1% от значения фона в отведении O2. Под действием генератора шума выборочная энтропия возрастала в 3,1 раза от фонового значения в отведении F7; на 15,6% - в отведении F8; в отведении T3 - выборочная энтропия увеличилась почти в 4 раза; в отведении T4 значение выборочной энтропии выросло на 24,8% от фона; в отведении T5 значение выборочной энтропии при наличии генератора шума повысилось почти в 4,1 раза относительно фонового значения; в отведении T6 выборочная энтропия при наличии генератора шума выросла на 14,5% относительно фона (рисунок 9).

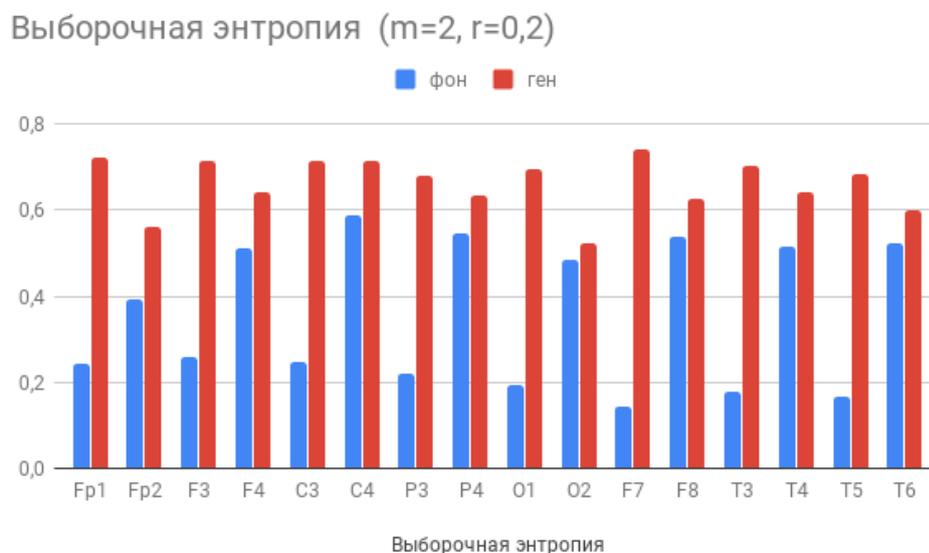


Рисунок 9. – Гистограмма распределений выборочной энтропии электроэнцефалограмм под действием генератора шума во всех измеряемых отведениях

Рассмотрим связь воздействия генератора электромагнитного шума и сонливости. Под действием генератора шума наблюдается возрастание выборочной энтропии во всех измеренных отведениях (рисунок 9). При сонливости же (если руководствоваться рисунком 10 [19]) возрастание выборочной энтропии наблюдается только в отведениях Fp1 и Cz, в остальных отведениях (Fp2, F3, F4, Fz, C4, C3, P4) выборочная энтропия убывает. Руководствуясь вышесказанным, можно предварительно (т.е. только на основании рисунков 10 и 9 и данных из [19]) заключить, что у оператора под воздействием генератора шума сонливости не наблюдается.

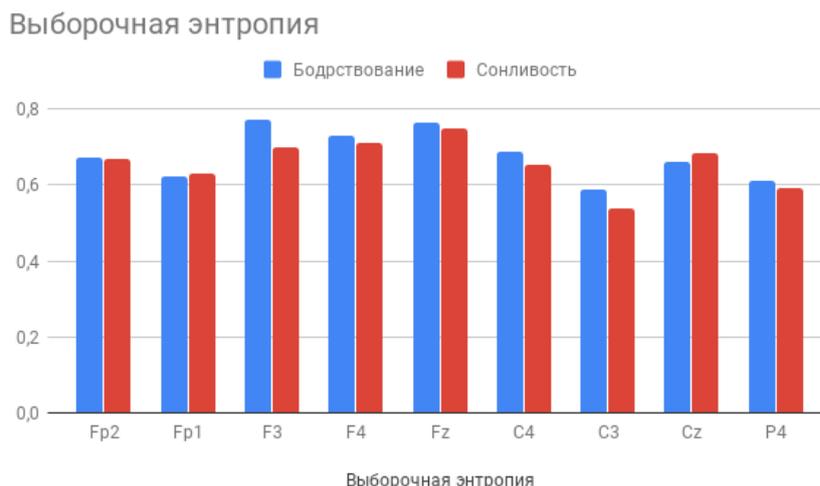


Рисунок 10. – Изменение выборочной энтропии при сонливости [19]

Оценим эмоциональное состояние оператора под действием генератора электромагнитного шума с использованием корреляционной размерности в качестве количественного параметра.

Корреляционная размерность под действием генератора электромагнитного шума менялась следующим образом. При варьировании размерности вложения от 4 до 12 корреляционная размерность в отведении T4 при наличии генератора электромагнитного шума изменилась относительно фона следующим образом: при размерности вложения, равной 4, отношение корреляционной размерности при наличии генератора шума к корреляционной размерности в фоновом режиме составило 1,057; при размерности вложения, равной 5 - составило 1,186; при размерности вложения, равной 6 - составило 1,064; при размерности вложения, равной 7 - составило 1,074; при размерности вложения, равной 8 - составило 1,081; при размерности вложения, равной 9 - составило 1,086; при размерности вложения, равной 10 - составило 1,086; при размерности вложения, равной 11 - составило 1,088; при размерности вложения, равной 12 - составило 0,876 (рисунок 11).

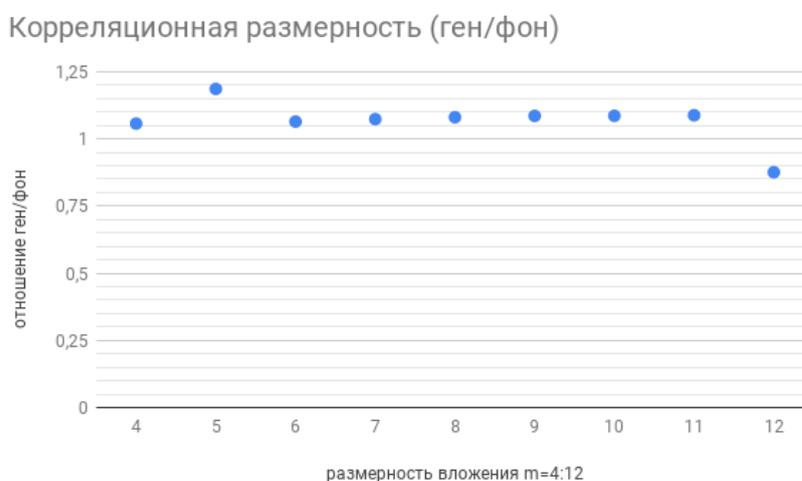


Рисунок 11. – Отношения значений корреляционной размерности при наличии генератора шума к значениям корреляционной размерности при фоновом режиме

При анализе данных, приведенных на рисунке 12 из источника [20], можно сделать вывод, что как при положительной, так и при отрицательной эмоции отношение корреляционной размерности (при значениях вложенной размерности 4-7) при испытывании эмоции к корреляционной размерности при отсутствии эмоции всегда выше 1. При положительной эмоции это отношение при значениях вложенной размерности 8-10 может быть ниже 1 (рисунок 12). При отрицательной эмоции это отношение при вложенной размерности 12 может быть ниже 1 (рисунок 12). Отношение корреляционной размерности при наличии генератора шума к корреляционной размерности в фоне для вложенной размерности 4-11 выше 1, а при вложенной размерности 12 - ниже 1 (рисунок 11). Это позволяет сделать предварительный вывод, что оператор испытывает отрицательную эмоцию под воздействием генератора электромагнитного шума, если основываться на данных из [20] и рисунках 11 и 12.

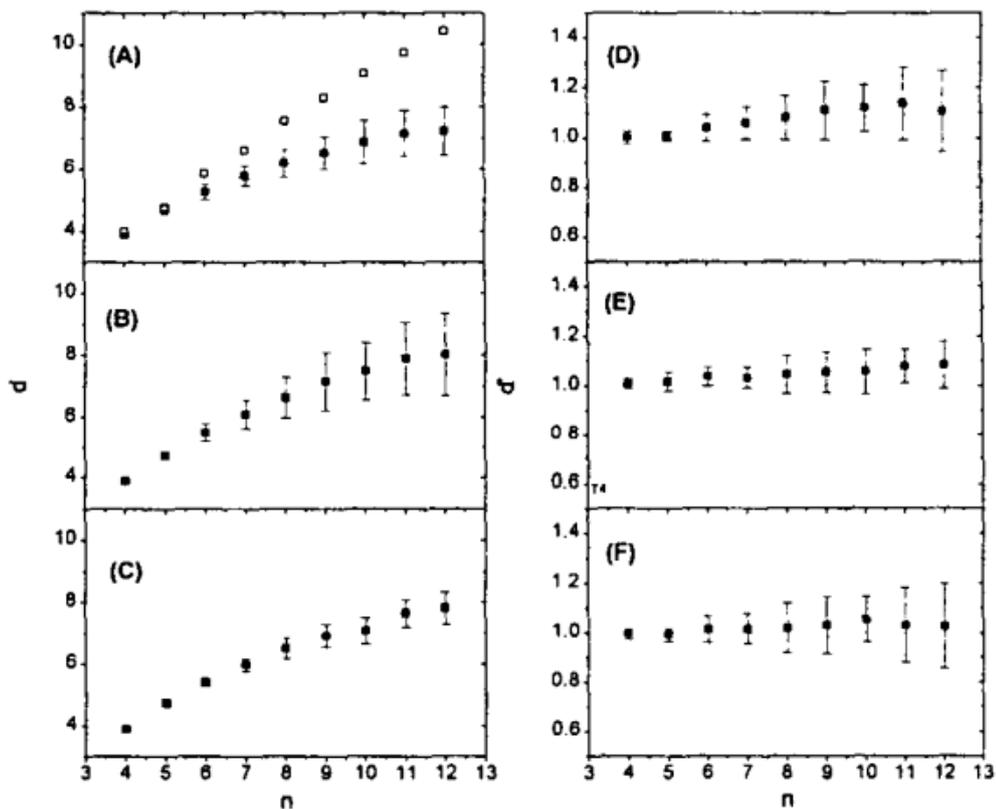


Рисунок 12. – Отображение значений корреляционной размерности для отведения T4 при разных значениях вложенной размерности при отдыхе (A), при отрицательной (B) и положительной (C) эмоциях.

Гауссовский шум показан \square на рисунке (A) для сравнения. Также на рисунке представлены отношения значений корреляционной размерности отрицательной (D) и положительной (E) эмоций к значениям корреляционной размерности при отдыхе, а также отношения значений корреляционной размерности отрицательной эмоции к значениям корреляционной размерности положительной эмоции (F) [20]

Выводы. Проведен комплекс экспериментальных исследований электроэнцефалограмм отведений Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5,

Т6. Приведены полученные результаты при действии на оператора электромагнитного шумового излучения.

Изменение количественных параметров (спектральной плотности мощности, выборочной и аппроксимационной энтропий) указывает на отсутствие сонливости (депривации сна) у оператора под действием генератора электромагнитного шума.

Изменение корреляционной размерности указывает на то, что оператор под действием электромагнитного шумового излучения испытывает отрицательную эмоцию.

Интерпретация полученных предварительных результатов о сонливости и эмоциональном состоянии оператора под воздействием электромагнитного шумового излучения требует дальнейших исследований.

Список литературы

[1.] Сидоренко А.В. Показатели нелинейной динамики электроэнцефалограмм при наличии излучений мобильной связи и радиопоглощающих полиуретановых композитов // Биомедицинская радиоэлектроника. 2013. № 12. С. 44–52.

[2.] Павлова Л.Н., Жаворонков Л.П., Дубовик Б.В. Экспериментальная оценка реакций ЦНС на воздействие импульсных ЭМИ низкой интенсивности // Радиация и риск. 2010. Т. 19, № 3. С. 104–119.

[3.] Сидоренко А.В. Воздействие шумового излучения на центральную нервную систему // Электроника инфо. 2016. № 1. С. 58–64.

[4.] Sidorenko, A.V. Assessing the effect of electromagnetic noise radiation on the central nervous system using non-linear parameters of the electroencephalogram / A.V. Sidorenko, M.A. Saladukha // Nonlinear Dynamics and Applications. - 2019. - Vol. 25. - P. 231-240.

[5.] Сидоренко А. В., Солодухо Н. А. Исследование эмоции страха оператора при воздействии электромагнитного шумового излучения / А.В. Сидоренко, Н.А. Солодухо // Нейронаука для медицины и психологии, Материалы 15-ого международного междисциплинарного конгресса, Судак, 30 мая-10 июня 2019 г. - Судак, 2019. – С. 375-376.

[6.] Сидоренко, А.В. Методы информационного анализа биоэлектрических сигналов / А.В. Сидоренко. - Мн.: БГУ, 2003. - 187 с.

[7.] Grassberger, P. Estimation of Kolmogorov entropy from a chaotic signal / P. Grassberger and I. Procaccia // PHYSICAL REVIEW A. - 1983. - Vol. 28, № 4. - P. 2591-2593.

[8.] Borisov, A. Nonlinear Dynamics Non-Integrable Systems and Chaotic Dynamics / A. Borisov and V. Zverev // De Gruyter studies in mathematical physics. - Berlin de Gruyter, 2016. - Vol. 36. - 285 p.

[9.] Lin Gao, Feature extraction and classification of Event-related EEG based on Kolmogorov entropy / Lin Gao [et al.] // 4th International Congress on Image and Signal Processing, Shanghai, 15-17 Oct. 2011. - Shanghai, 2011. - P. 2650-2653.

[10.] Grassberger, P. Measuring the strangeness of strange attractors / P. Grassberger and H. Procaccia // Physica 9D. -1983. - P. 189-208.

[11.] Attractor Reconstruction from Event-Related Multi-Electrode EEG-Data / Gottfried Mayer-Kress [et al.] // Semantic Scholar [Electronic resource]. – 1991. – Mode of access : <https://www.semanticscholar.org/>. – Date of access : 27.06.2017.

[12.] Pincus, S. Approximate entropy (ApEn) as a complexity measure / S. Pincus // Chaos. – 1995. – Vol. 5, № 1. – P. 110–117.

[13.] Approximate entropy of human respiratory movement during eye-closed waking and different sleep stages / N. Burioka [et al.] // Chest. – 2003. – Vol. 123, № 1. – P. 80–86.

[14.] Richman, J.S. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy / J.S. Richman and J.R. Moorman // Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol. – 2000. – Vol. 278, № 6. – P. 2039–2049.

[15.] Ramanand, P. Complexity of Brain Dynamics Inferred from the Sample Entropy Analysis of Electroencephalogram / P. Ramanand, R.Sreenivasan, V. P. N. Nampoore // NCNSD. - 2003. - P. 205-208.

[16.] EEG-based Mental Fatigue Detection by Spectral Non-negative Matrix Factorization / Lili Li [et al.] // Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, Orlando, 16-20 Aug. 2016. - Orlando, 2016. - P. 3716-3719.

[17.] Determination of optimal electroencephalography recording locations for detecting drowsy driving / Chaofei Zhang [et al.] // IET Intelligent Transport Systems. - 2018. - Vol. 12. - P. 345-350.

[18.] Jinxiao Zhang, Sleep deprivation compromises resting-state emotional regulatory processes: An EEG study / Jinxiao Zhang, Esther Yuet Ying Lau, Janet H. Hsiao // J Sleep Res. - 2018. - Vol. 28. - P. 1-8.

[19.] Classifying Driving Fatigue Based on Combined Entropy Measure Using EEG Signals / Yijun Xiong [et al.] // International Journal of Control and Automation. - 2016. - Vol. 9, №3. - P. 329-338.

[20.] Chang Su Ryu, An Estimation Of The Correlation Dimension For The Eeg In Emotional States / Chang Su Ryu, Seunghwan Kim, Seon Hee Park // Proceedings - 19th International Conference - IEEE/EMBS, Chicago, 30 Oct. - 2 Nov., 1997. - Chicago, 1997. - P. 1547-1550.

SLEEP AND EMOTION STATE OF OPERATOR SUBJECTED BY ELECTROMAGNETIC NOISE RADIATION

A.V. Sidorenko,

A professor of Belarusian State University

M.A. Saladukha,

A senior teacher in Belarusian State University

Belarusian State University, Republic of Belarus

E-mail: sidorenkoa@yandex.ru

Abstract. The experimental investigations of operator electroencephalograms subjected by electromagnetic noise radiation were carried out. The electroencephalograms were registered according to international «10/20» system. The numerical parameters as power spectral density of rhythms, sample and approximate entropies, correlation dimension characterized the emotion state of the operator were estimated. We showed, that under the influence of electromagnetic noise radiation operator doesn't feel sleepy, but feel negative emotion.

Keywords: noise, human, radiation, emotion, sleep, electroencephalogram