

## **Оценка умственной усталости при воздействии электромагнитного шума и наличии патологий**

Сидоренко А.В., Солодухо Н.А., Овсянкина Г. И.

**Аннотация.** В работе анализировались параметры биоэлектрической активности головного мозга при воздействии электромагнитного шумового излучения и следующих патологий: легкие диффузные изменения электроэнцефалограмм (ЭЭГ) в виде дезорганизации коркового ритма; умеренные диффузные изменения ЭЭГ в виде дезорганизации коркового ритма, периодическое замедление коркового ритма в правых лобно-височных отведениях, пароксизмальная эпилептиформная активность высокого индекса в виде генерализованных разрядов комплексов "острая-медленная волна", периодически с акцентом на правые лобно-височные отведения. Электроэнцефалограммы были проанализированы в следующих отведениях: Fp1, Fp2, F7, F8, F3, Fz F4, C3, C4, Cz P3, P4, Pz, O1, O2, T3, T4, T5, T6. Анализировались электроэнцефалограммы фонового состояния (здоровый человек), состояния в присутствии электромагнитного шумового излучения и при двух выше указанных патологиях. Количественными параметрами для оценки являлись спектральная плотность мощности тета-ритма, выборочная энтропия и сложность Лемпеля-Зива. Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии умственной усталости в условиях электромагнитного шумового излучения и о наличии умственной усталости при патологиях.

**Введение.** Внедрение информационных технологий в повседневную жизнь привело к тому, что человек часто оказывается под воздействием электромагнитного излучения, в том числе и шумового. При работе с оборудованием человек также часто подвергается влиянию электромагнитного излучения. Важным при этом для определения уровня внимания оказывается оценка усталости человека. Высокий уровень внимания позволяет человеку успешно и быстро выполнять возложенные на него задачи.

Развитие технических средств защиты информации, препятствующих ее несанкционированному приему по каналам побочных электромагнитных излучений и наводок в цепях электропитания, привело к появлению пассивных и активных методов защиты информации путем использования экранов из радиопоглощающих материалов и генераторов шума [1].

Наличие большого количества противоречивой информации о воздействии электромагнитного излучения на центральную нервную систему [2,3] человека требует дальнейших исследований в этой области.

В связи с этим целью работы является выявление особенностей биоэлектрической активности мозга при оценке воздействия электромагнитных

шумовых излучений на центральную нервную систему (ЦНС). Параллельно с этим целесообразно было изучить влияние патологических состояний на ЦНС. Состояние ЦНС человека интерпретировалось для определения наличия либо отсутствия умственной усталости.

Количественным параметром анализа для оценки воздействий электромагнитного шумового излучения на ЦНС являлись выборочная энтропия [4], сложность Лемпел-Зива [5], спектральная плотность мощности тета-ритма, усредненная по отведениям всей поверхности головы. Размерность вложения (embedding dimension) при вычислении энтропии равнялась 2, а параметр  $r$  (tolerance), необходимый при расчете выборочной и аппроксимационной энтропий, равнялся 0,2. Измерения проводились в следующих стандартных отведениях электроэнцефалограмм: Fp1, Fp2, F7, F8, F3, Fz, F4, C3, C4, Cz, P3, P4, Pz, O1, O2, T3, T4, T5, T6.

**Метод выборочной энтропии.** Алгоритм определения выборочной энтропии сводится к следующему [4, 6]. 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

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

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 определяем

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

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 определяется

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

Погрешность расчета выборочной энтропии составляет 0,2 % при значениях размерности вложения 2 и параметра  $r=0,2$  (такие параметры использованы в нашей работе).

**Метод Лемпеля-Зива.** Для расчета данного параметра числовая последовательность (сигнал) должна быть преобразована в последовательность нулей и единиц. Чаще всего используют следующий метод: если число в последовательности больше медианного значения, оно преобразуется в 0, иначе в 1. После преобразования сигнала в его символьную последовательность из нулей и единиц, последовательность делится на “слова” таким образом, чтобы каждое следующее “слово” не повторяло ни одно предыдущее и было

минимально возможным по длине. Далее сложность Лемпеля-Зива вычисляется по формуле

$$C=k(\log_2 k+1)/n,$$

где  $k$  число слов в последовательности, а  $n$  - количество элементов последовательности. Погрешность расчета сложности Лемпеля-Зива составляет 2,7 % [5].

**Методика проведения исследований.** Регистрация электроэнцефалограмм осуществлялась по схеме "10/20" с использованием электроэнцефалографа «Нейрокартограф» фирмы МБН. Обработка и анализ электроэнцефалограмм проводились в разработанной нами информационно-измерительной системе, адаптированной для работы с электроэнцефалограммами [7]. Объектом исследования являлись электроэнцефалограммы отведений: Fp1, Fp2, F7, F8, F3, Fz, F4, C3, C4, Cz, P3, P4, Pz, O1, O2, T3, T4, T5, T6. Электроэнцефалограммы обрабатывались в следующих режимах: фон 1; наличие источника шумового электромагнитного излучения; фон 2; состояние 1; состояние 2. Состояние 1 характеризуется лёгкими диффузными изменениями ЭЭГ в виде дезорганизации коркового ритма. Состояние 2 характеризуется умеренными диффузными изменениями ЭЭГ в виде дезорганизации коркового ритма, периодическим замедлением коркового ритма в правых лобно-височных отведениях, пароксизмальной эпилептиформной активностью высокого индекса в виде генерализованных разрядов комплексов "острая-медленная волна", периодически с акцентом на правые лобно-височные отведения. В качестве фона 1 и фона 2 использовались электроэнцефалограммы здорового человека. Фоновое состояние, используемое для сравнения с изменениями при наличии генератора шума (фон 1) отличается от фонового состояния, используемого для сравнения с изменениями при наличии патологий (фон 2). Данная особенность обусловлена разным временем получения электроэнцефалограмм, их разной длиной и разным количеством используемых в этих измерениях отведений.

Сложность Лемпеля-Зива и выборочная энтропия вычислялись с помощью одноименных методов. Размерность вложения  $m$  при расчете выборочной энтропии равнялась 2, а параметр  $r$  равнялся 0,2. Спектральная плотность мощности вычислялась с помощью быстрого преобразования Фурье. Анализируемый спектральный диапазон: тета-ритм (4-8Гц).

В качестве генератора электромагнитного шума применялся генератор на транзисторах; частота работы генератора составила 5ГГц, мощность - 30мВт.

**Результаты и обсуждение.** Гистограммы изменения спектральной плотности мощности тета-ритма, усредненной по отведениям всей поверхности головы, при наличии генератора шума и при патологиях представлены на рис. 1а и рис. 1б соответственно.

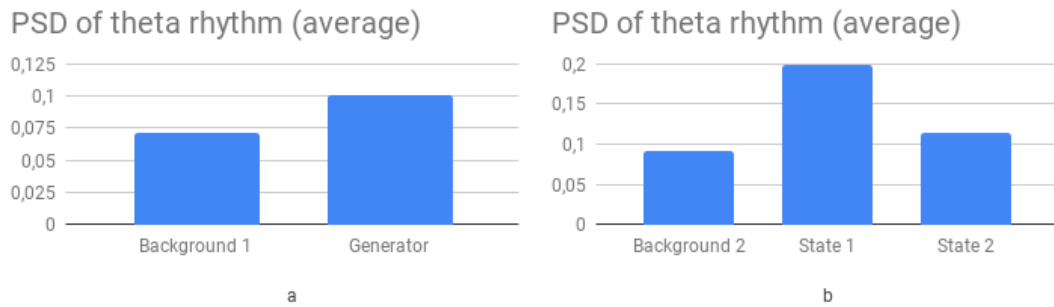


Рис. 1: Гистограммы распределений спектральной плотности мощности тета-ритма, усредненной по отведениям всей поверхности головы при наличии генератора (a) и при патологиях (b).

Возрастание спектральной плотности мощности тета-ритма, усредненной по всем отведениям, может являться следствием умственной усталости (если руководствоваться данными из работы [8]). Из рис. 1 видно, что спектральная плотность мощности при наличии генератора и при патологиях возрастает, что может быть причиной умственной усталости.

Изменение выборочной энтропии при наличии генератора шума и при наличии патологий представлены на рис. 2a и рис. 2b, соответственно.

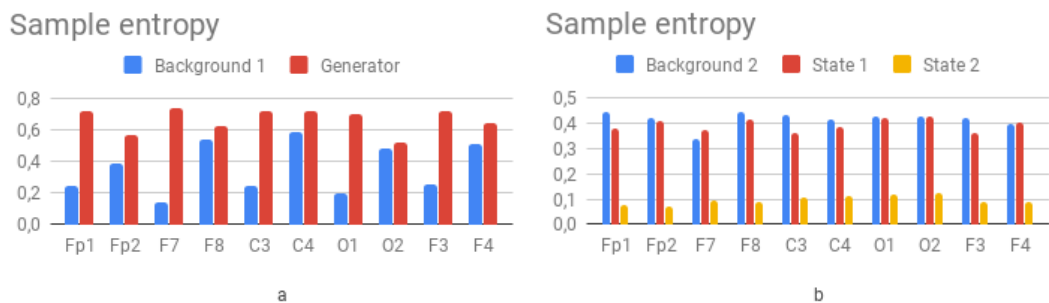


Рис. 2: Гистограммы распределений выборочной энтропии при наличии генератора (a) и при патологиях (b).

Для оценки, испытывает ли человек под действием патологий или генератора шума умственную усталость, можно использовать два литературных источника [9] и [10]. В работе [9] утверждается, что при умственной усталости наблюдается падение выборочной энтропии в электроэнцефалограммах отведений F7, F3, F8, F4, O1, O2. В работе [10] отмечается, что при умственной усталости падение выборочной энтропии происходит в отведениях Fp1, Fp2, F7, F8, C3, C4, O1, O2. Из рис. 2a видно, что при наличии генератора шума выборочная энтропия возрастает, что говорит об отсутствии усталости; при патологиях же выборочная энтропия в большинстве анализируемых отведений уменьшается, что может свидетельствовать об умственной усталости при анализируемых патологиях.

Изменение сложности Лемпеля-Зива при наличии генератора шума и при наличии патологий представлены на рис. 3а и рис. 3б, соответственно.

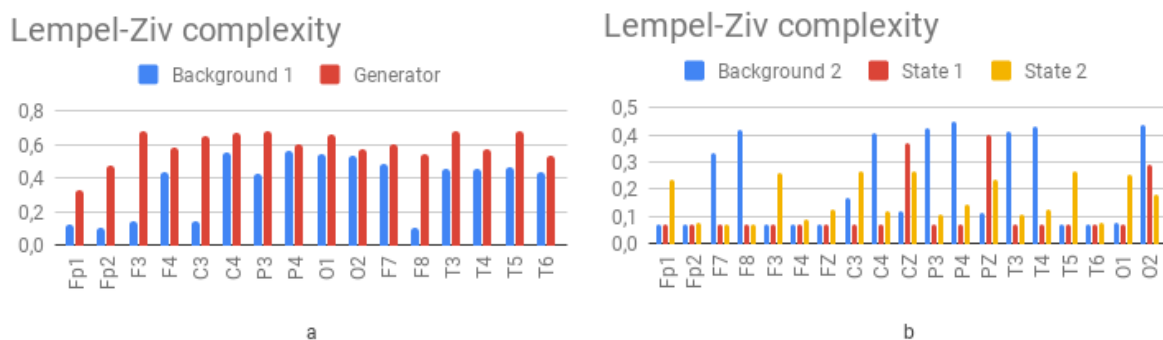


Рис. 3: Гистограммы распределений сложности Лемпеля-Зива при наличии генератора шума (а) и при патологиях (б).

Изменение сложности Лемпел-Зива при умственной усталости представлено на рис. 4 [11].

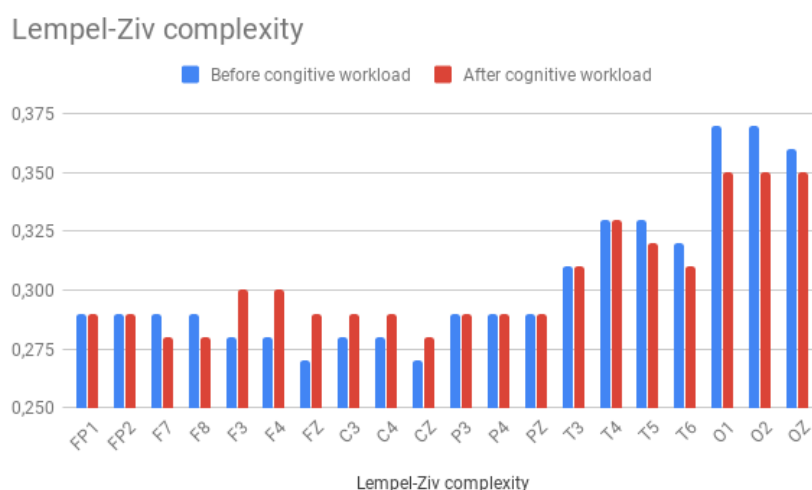


Рис. 4: Изменение сложности Лемпел-Зива после умственной нагрузки

Под действием генератора шума сложность Лемпеля-Зива возрастает в электроэнцефалограммах во всех 16 анализируемых отведениях. Под действием усталости сложность Лемпеля-Зива (рисунок 4 [11]) возрастает в электроэнцефалограммах 6 отведений (F3, F4, C3, C4, Fz, Cz) и уменьшается в 6 отведениях (O1, O2, T5, T6, F7, F8). Исходя из рисунков 3а и 4, можно сделать вывод (т.е. вывод, основанный только на рисунках 3, 4 и данных [11]), что человек под действием генератора шума умственную усталость не испытывает.

В состоянии 1 при патологии в электроэнцефалограммах отведений F7, F8, O1, O2 наблюдается падение сложности Лемпеля-Зива (как и после умственной нагрузки), а в отведении Cz - возрастание (как и после умственной нагрузки); в отведениях T5, T6 сложность Лемпеля-Зива не изменилась, а в отведениях C3 и C4 она упала (противоположная тенденция по сравнению с

состоянием после умственной нагрузки). Т.е. тенденция изменения сложности Лемпеля-Зива электроэнцефалограмм 5 отведений (F7, F8, O1, O2, Cz) совпадает с тенденцией изменения сложности Лемпеля-Зива при умственной усталости, а тенденция 2 отведений не совпадает (C3, C4), сложность Лемпеля-Зива отведений Fz, F3, F4, T5, T6 не менялась. Поэтому можно сделать заключение (основанное только на рисунках 3b и 4 и данных [11]), что человек в состоянии 1 при патологии испытывает умственную усталость.

В состоянии 2 тенденция изменения сложности Лемпеля-Зива 8 отведений (F7, F8, F3, F4, Fz, C3, Cz, O2) совпадает с тенденцией изменения сложности Лемпеля-Зива при умственной усталости, а тенденция 4 отведений не совпадает (C4, T5, T6, O1). Поэтому можно сделать заключение (т.е. заключение, основанное только на рисунках 3b и 4 и данных [11]), что человек в состоянии 2 испытывает умственную усталость.

**Заключение.** Полученные результаты могут быть проинтерпретированы следующим образом. Вариации спектральной плотности мощности тета-ритма, усредненные по всем анализируемым отведениям свидетельствуют об умственной усталости, однако изменение выборочной энтропии и сложности Лемпеля-Зива свидетельствуют об отсутствии умственной усталости в условиях действия электромагнитного шумового излучения. Изменение спектральной плотности мощности тета-ритма, усредненной по всем отведениям; выборочной энтропии и сложности Лемпеля-Зива свидетельствуют о наличии умственной усталости при рассматриваемых патологиях: лёгкие диффузные изменения ЭЭГ в виде дезорганизации коркового ритма; умеренные диффузные изменения ЭЭГ в виде дезорганизации коркового ритма, периодическое замедление коркового ритма в правых лобно-височных отведениях, пароксизмальная эпилептиформная активность высокого индекса в виде генерализованных разрядов комплексов "острая-медленная волна", периодически с акцентом на правые лобно-височные отведения.

### **Библиографический список**

1. Сидоренко, А.В. Показатели хаотической динамики электроэнцефалограмм при воздействии электромагнитных шумовых излучений и радиопоглощающих материалов / А. В. Сидоренко // Вестник Белорусского государственного университета. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. - 2015. - № 2. - С. 56-60. - Библиогр.: с. 60 (12 назв.)

2. 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.

3. Сидоренко, А.В. Эмоциональное состояние оператора при воздействии

электромагнитного шумового излучения / А.В. Сидоренко, Н.А. Солодухо // Доклады БГУИР. - 2019. - № 4. - С. 5-10.

4. 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.

5. Petrov, L.A. On the Applicability of Nonlinear Time series Methods for Partial Discharge Analysis / L. A. Petrov, P.L. Lewin, T. Czaszejko // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation - 2014. - Vol. 21. - P. 284 - 293.

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

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

8. Li, Lili. 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.

9. Wang Fei. EEG-based mental fatigue assessment during driving by using sample entropy and rhythm energy / Fei Wang [et al.] // The 5th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems, Shenyang, June 8-12, 2015. - Shenyang, 2015. - P. 1906 - 1911.

10. Xu, Xin. Fatigue EEG Feature Extraction Based on Tasks With Different Physiological States for Ubiquitous Edge Computing / Xin Xu [et al.] // Special Stction on Intelligent Data Sensing, Collection and Dissemination in Mobile Computing. - 2019. - Vol. 7. - P. 73057-73064.

11. Xu, Rui. How Physical Activities Affect Mental Fatigue Based on EEG Energy, Connectivity, and Complexity / Rui Xu [et al.] // Frontiers in Neurology. - 2018. - Vol. 9 - P. 1-13.