

УДК: 612.821.3–055,1:616–073.7

ОЦЕНКА ЭНТРОПИИ КОЛМОГОРОВА–СИНАЯ ПО ЭЭГ У ЗДОРОВЫХ МУЖЧИН С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ ТРЕВОЖНОСТИ**О.Ю.Майоров^{1,2,3}, Л.Н.Фріцше², М.Фріцше⁴, А.Б.Прогнімак², К.А.Степанченко²**¹*Институт охраны здоровья детей и подростков АМН Украины (Харьков, Украина)*²*Харьковская медицинская академия последипломного образования (Харьков, Украина)*³*Институт медицинской информатики и телемедицины (Харьков, Украина)*⁴*Клиника внутренних болезней и географической медицины (Аддисвилль, Швейцария)*

У здоровых молодых мужчин с повышенным уровнем тревожности в состоянии спокойного бодрствования выявлен более высокий уровень одного из ключевых нелинейных параметров ЭЭГ – энтропии Колмогорова–Синяя (эКС) в обоих полушариях. Еще более значительное повышение уровня эКС, по сравнению с контрольной группой, наблюдается при интеллектуальной нагрузке (обратный счет в уме) у лиц с повышенной тревожностью (на 25–50 %). Уровень тревожности влияет на величину эКС, что можно выявить с помощью функциональной нагрузки (обратный счет в уме). Более высокий уровень эКС в пределах, характерных для здорового мозга, отражает, по-видимому, более высокую индивидуальную способность к адаптации у лиц с повышенным уровнем тревожности.

Ключевые слова: количественная ЭЭГ, тревожность, эмоциональный стресс, устойчивость, нелинейный анализ, энтропия Колмогорова–Синяя.

Введение

Работа человека в условиях напряженной деятельности во многом зависит от устойчивости индивидуума к эмоциональным стрессам, что определяет его поведение и целенаправленную деятельность. Эмоциональная стабильность, лежащая в основе способности сохранять высокую работоспособность при действии стресс-факторов, рассматривается как сложная личностная характеристика и генетически закрепленное свойство человека (Николаев, Прокофьев, 1991). Ранее было показано, что устойчивость индивида к эмоциональным стрессам – это многокомпонентное свойство. Важен тот факт, что у одного и того же индивида имеется неодинаковая устойчивость поведенческого и висцерального компонентов, церебральных механизмов (Майоров, 1988). В состоянии эмоционального перенапряжения происходит «поломка» той системы, которая обладает наименьшей устойчивостью.

Ключевым компонентом является устойчивость интегративной деятельности головного мозга. Последняя в свою очередь зависит от функционального состояния эмоциогенных структур мозга, от особенностей, обуславливающих возможность вовлечения мозговых структур в системную деятельность, и индивидуальной способности к *самоорганизации* в условиях эмоционального стресса.

В литературе имеются немногочисленные исследования нелинейной динамики ЭЭГ здорового мозга человека в условиях эмоционально напряженной деятельности. Однако до настоящего времени аффективные кортикальные активации и различные эмоциональные состояния с применением методов нелинейного анализа ЭЭГ изучались недостаточно.

Был выявлен более высокий уровень комплексной размерности ЭЭГ во фронтальных кортикальных областях во время эмоционального переживания воображаемых образов и во время выполнения в уме арифметических задач (Birbaumer et al., 1993).

Проводилось исследование нарушений информационных процессов у пациентов с посттравматическим стрессом (ПТС). Изучалась динамическая комплексность (или пластичность, по терминологии автора) ЭЭГ, которая, предположительно, отражает интеграционные информационные процессы головного мозга. Для большинства отведений были выявлены более низкие уровни корреляционной размерности (D2) по сравнению со здоровыми добровольцами. Делается заключение, что у пациентов с ПТС нарушаются информационные процессы, а анализ нелинейной динамики ЭЭГ может послужить важным инструментом для определения изменений нейродинамических процессов головного мозга при посттравматическом стрессе (Chae et al., 2004).

Изучались различные состояния мозга, возникающие под воздействием эмоционально нейтральных, позитивных и негативных видео-стимулов у здоровых студентов от 17 до 20 лет. Выявлено увеличение энтропии Колмогорова при позитивных и негативных эмоциональных состояниях по сравнению с эмоционально нейтральным состоянием. В то же время между

положительными и отрицательными эмоциональными состояниями статистически значимых различий не обнаружено (Aftanas et al., 1997).

Проводилось изучение нелинейных параметров ЭЭГ молодых здоровых людей – мужчин и женщин, при различных ментальных состояниях (рок и классическая музыка, стимуляция подошв ног). Было выяснено, что нелинейные показатели при изучаемых ментальных состояниях являются значительно более низкими, чем в состоянии покоя. Авторы считают, что эти воздействия вызывают расслабление, и интерпретируют снижение корреляционной размерности ЭЭГ уменьшением числа активных параллельных функциональных процессов в головном мозге по сравнению с состоянием покоя. На основании полученных данных авторы считают, что ЭЭГ можно считать надежным индикатором эмоционального состояния человека (Natarajan et al., 2004).

Ранее нами было проведено исследование динамических систем мозга у здоровых мужчин в состоянии спокойного бодрствования и при интеллектуальной нагрузке на основе оценки энтропии Колмогорова–Сіная (эКС) по ЭЭГ. Было установлено, что энтропия Колмогорова–Сіная ЭЭГ у здоровых мужчин в состоянии спокойного бодрствования имеет региональные различия на поверхности полушарий. Эмоционально напряженная деятельность в виде интеллектуальной нагрузки вызывает значительное достоверное увеличение эКС в правом задне-лобном отведении и левых переднем и заднем височных отведениях. Мы предположили, что уровень энтропии Колмогорова–Сіная ЭЭГ может служить индикатором вовлечения тех или иных областей мозга в исследуемую психическую деятельность (Майоров и др., 2006). В то же время известно, что по эмоциональному реагированию здоровые люди сильно различаются. Однако, в литературе мы не нашли данных о влиянии повышенной тревожности на свойства динамических систем мозга, которые можно количественно оценить с помощью нелинейного анализа ЭЭГ.

Цель работы: изучить параметры нелинейной нейродинамики у здоровых молодых людей с повышенным уровнем общей тревожности.

Методика

Была обследована группа практически здоровых добровольцев (55 человек) – мужчин, студентов летного военного университета, возрастом от 20 до 22 лет, не имеющих в анамнезе клинически значимых, в том числе психоневрологических, заболеваний. Все испытуемые были психически здоровы, о чем свидетельствуют данные их медицинских историй. Тестирование праворукости производилось по методике J.P.Chapman & L.J.Chapman (Chapman, Chapman, 1987). Для выявления скрытой тревожности было проведено психологическое тестирование. Для оценки реактивной тревожности и депрессии была использована госпитальная шкала тревоги и депрессии (HADS) (Zigmond, Snaith, 1983), для выявления индивидуально-личностных особенностей (нейротизм и интроверсия / экстрроверсия) использовался тест Айзенка.

Проводилась регистрация ЭЭГ в состоянии спокойного бодрствования и во время интеллектуальной нагрузки (обратный счет в уме – 1000, 999, 998 и т. д.), предназначенной для выполнения последовательных мыслительных операций. Запись проводилась с закрытыми глазами. ЭЭГ регистрировалась монополярно с референтным «усредненным» электродом по D.Goldman (1950) с симметричных областей полушарий, каждое событие записывалось в течение 120 с. Для регистрации ЭЭГ использовался 24-канальный электроэнцефалограф фирмы «ДХ-системы». Ввод ЭЭГ в компьютер осуществлялся с помощью АЦП с частотой дискретизации 400 Гц на канал и 16-разрядным разрешением. Для нелинейного анализа ЭЭГ выбирались безартефактные стационарные участки ЭЭГ длительностью 35–40 с. Ввод и анализ ЭЭГ осуществляли с помощью системы компьютерной ЭЭГ NeuroResearcher®2005 (модуль *Multi-Dimensional Non-Linear Analysis*) (Mayorov et al., 2003). Проводился нелинейный многомерный анализ (детерминистского хаоса) ЭЭГ.

Так как по изменению эКС при функциональных ментальных пробах можно определять локализацию нервного субстрата высших функций, в том числе и эмоции, было проведено сравнительное исследование параметров эКС у здоровых молодых мужчин с различным уровнем общей тревожности. Вычислялась энтропия Колмогорова–Сіная (эКС), которая позволяет оценить количество информации, необходимой для прогноза поведения динамической системы в будущем. Другими словами, можно определить временной интервал, на основании которого делается прогноз, т.е. это параметр, отражающий предсказуемость системы. Он характеризует динамику системы в целом, а не в данный момент времени (Grassberger, Procaccia, 1983).

В наших исследованиях энтропия Колмогорова–Сіная (h) вычислялась на основании спектра показателей Ляпунова и определялась как усредненная по фазовому пространству сумма положительных показателей Ляпунова S_m . Для хаотических аттракторов h положительна, это критерий хаоса (Grassberger, Procaccia, 1983; Kantz, Schreiber, 2000).

Для оценки достоверности различий нелинейных показателей применялся непараметрический критерий "U" Вилкоксона–Манна–Уитни, для сравнения парных выборок – критерий Вилкоксона, с помощью пакета прикладных программ "Statgraphics 5.0, Plus".

Результаты

Согласно проведенному тестированию, все добровольцы были правшами. На основании комплексной оценки результатов психологического тестирования была выделена группа с повышенным уровнем тревожности – 17 человек (30,9%) (I-группа). Оставшиеся 38 человек (69,1%) составили группу с низким уровнем реактивной и личностной тревожности (II-группа). Региональное распределение уровней ЭКС по поверхности полушарий в исследуемых группах представлено в табл. 1.

Сравнение уровня энтропии Колмогорова–Синия ЭЭГ у лиц с различной степенью тревожности в состоянии спокойного бодрствования выявило в группе испытуемых с повышенной тревожностью достоверно более высокий уровень ЭКС в ряде лобных и височных областей (Fpz – 17,68%, F4 – 18,70%, T3 – 11,89% и T4 – 16,76%) и более низкие показатели в затылочных отведениях (O1 – 4,52%, Oz – 11,50%, O2 – 39,46%) (табл. 1, рис. 1а).

Таблица 1.

Сравнительная характеристика уровня энтропии Колмогорова–Синия у практически здоровых молодых мужчин с нормальным и повышенным уровнем общей тревожности в состоянии спокойного бодрствования и при интеллектуальной нагрузке

Отведение	Состояние спокойного бодрствования			Интеллектуальная нагрузка (обратный счет в уме)		
	I-группа (с повышенной тревожностью) n=17	II-группа (с низкой тревожностью) n=38	эКС (в % к II-группе)	I-группа (с повышенной тревожностью) n=17	II-группа (с низкой тревожностью) n=38	эКС (в % к II-группе)
Fp1	5,08±0,53	4,96±0,32	+2,42	6,18±0,92	5,41±0,55	+14,23
Fpz	5,59±0,55	4,75±0,34	+17,68*	7,59±1,27	5,46±0,67	+39,01*
Fp2	5,04±0,38	5,17±0,35	-2,51	7,27±1,08	5,49±0,65	+32,42*
F3	7,11±1,19	6,62±0,69	+7,40	9,89±1,84	7,08±1,00	+39,69*
Fz	7,60±1,56	7,01±0,76	+8,42	9,79±1,93	8,34±1,16	+17,39
F4	8,76±0,85	7,38±0,71	+18,70*	10,08±1,94	8,22±1,10	+22,63*
F7	6,61±0,85	6,74±0,53	-1,93	7,57±1,36	6,18±0,79	+22,49
F8	6,49±0,99	5,88±0,43	+10,37	8,06±1,33	7,05±0,70	+14,33
T3	13,17±0,99	11,77±0,87	+11,89*	16,08±2,15	12,75±1,23	+26,12*
T4	12,40±1,28	10,62±0,69	+16,76*	13,25±1,75	10,53±1,08	+25,83*
C3	9,19±1,33	9,44±0,74	-2,65	10,23±1,46	9,58±1,13	+6,78
Cz	7,72±1,26	7,91±0,76	-2,40	9,19±1,46	7,69±1,05	+19,51
C4	8,57±1,44	9,34±0,88	-8,24	12,67±2,62	8,47±1,01	+49,59*
T5	7,85±0,89	6,81±0,75	+15,27	9,73±1,76	8,42±1,18	+15,56
T6	6,11±1,26	6,48±0,76	-5,71	7,16±1,37	5,57±0,71	+28,55
P3	6,09±0,75	5,88±0,76	+3,57	8,29±2,11	5,69±0,95	+45,69*
Pz	4,57±0,68	5,11±0,57	-10,57	5,80±0,99	4,86±0,62	+19,34
P4	4,26±0,72	4,79±0,55	-11,06	6,87±1,29	4,64±0,74	+48,06*
O1	5,27±1,21	5,52±0,77	-4,53*	6,82±1,39	5,67±1,01	+20,28
Oz	5,08±0,75	5,74±0,81	-11,50**	7,07±1,55	5,35±0,83	+32,15
O2	3,79±0,75	6,26±0,82	-39,46**	6,13±1,93	4,90±0,75	+25,10

* – $P < 0,05$, достоверность различий по критерию "U" Вилкоксона–Манна–Уитни.

Сравнение уровня ЭКС у лиц двух исследуемых групп выявило достоверно более значительное повышение уровня ЭКС практически во всех отведениях у лиц с высокой степенью тревожности (на 25–50 %) при интеллектуальной нагрузке (табл. 1 и рис. 1б).

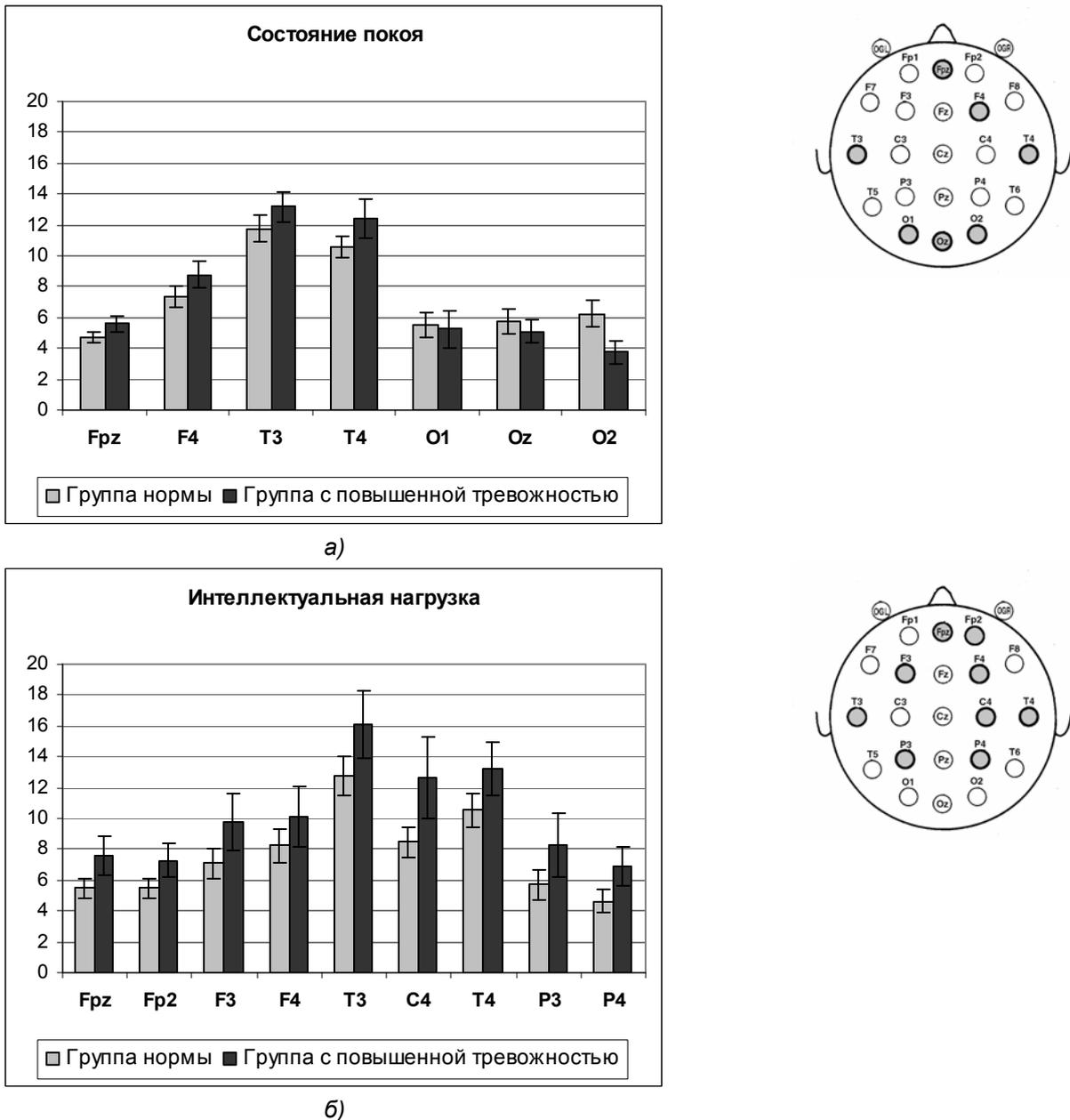


Рис. 1. Сравнительная характеристика уровня энтропии Колмогорова–Сіная ЭЕГ у практически здоровых молодых мужчин с нормальным и повышенным уровнем общей тревожности в состоянии спокойного бодрствования (а) и при интеллектуальной нагрузке – выбраны отведения, в которых изменения ЭКС были статистически достоверными (б)

Обсуждение

В результате экспериментов нами был установлен диапазон значений энтропии Колмогорова–Сіная ЭЕГ у здоровых молодых мужчин с различной степенью тревожности в состоянии спокойного бодрствования и при интеллектуальной нагрузке (обратный счет в уме).

Сегодня не вызывает сомнения тот факт, что здоровый мозг имеет хаотическую динамику функционирования, которая присуща интегративной деятельности. Важно определить уровень хаоса, характерный для тех или иных церебральных процессов в норме и при патологии.

Одно из ключевых свойств мозга – способность к спонтанному образованию и развитию сложных упорядоченных нейродинамических структур в процессе адаптации, т.е. самоорганизация. Адаптивные процессы в мозгу позволяют организму функционировать зачастую в абсолютно новых, неизвестных ему условиях. Как известно, основная роль в адаптации принадлежит информационным механизмам, а также функционированию эмоциогенной регуляторной системы памяти, включающей структуры лимбической системы (Симонов, 1998). Известно, что степень тревожности контролируют

также структуры лимбической системы. Повышение уровня тревоги ведет к облегчению заучивания материала.

Более высокий уровень ЭКС у здоровых молодых мужчин с повышенным уровнем общей тревожности в условиях интеллектуальной нагрузки можно рассматривать как отражение более высокой адаптационной способности у этой группы испытуемых. Так как более высокий уровень ЭКС, по-видимому, отражает большее количество активных параллельных функциональных процессов в мозге.

Таким образом, есть основания предполагать, что определенный уровень хаоса играет позитивную роль, обеспечивая мозгу «информационно-богатое состояние» и «спектральный резерв» (Гласе, Мэки, 1991). Иными словами, обеспечивается готовность мозга за счет способности к самоорганизации сгенерировать новую адаптивную активность. В областях мозга, в которых выявлены наибольшие значения энтропии Колмогорова–Синая, формируется адаптивная активность, направленная на выполнение задания (интеллектуальной нагрузки). Повышение уровня энтропии Колмогорова–Синая в передних височных областях мозга отражает также изменения в ключевых лимбических структурах, которые вовлечены в организацию эмоционального состояния – это, скорее всего, гиппокамп и миндалина.

Интеллектуальная проба (обратный счет в уме) вызывает усиление эмоционального напряжения (об этом мы могли судить на основании анализа вариабельности сердечного ритма, который проводился одновременно с анализом ЭЭГ), что нашло отражение в изменении уровня хаоса – его повышении в ряде областей мозга.

Как трактовать эти изменения, как процессы адаптации или «поломки»? Можно предположить, что при повышении уровня хаотической динамики у испытуемых с повышенной тревожностью, в условиях эмоционального напряжения повышаются возможности самоорганизации, увеличивается способность к формированию упорядоченных адаптивных диссипативных структур и, следовательно, способность к адаптации.

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. У испытуемых с повышенным уровнем общей тревожности в состоянии спокойного бодрствования выявлен более высокий уровень энтропии Колмогорова–Синая в обоих полушариях. Эти различия наиболее выражены в передне-лобном срединном отведении (Fpz), правом лобном отведении (F4) и в обеих передне-височных областях (T4 и T3).
2. Сравнительная характеристика уровня ЭКС у лиц двух исследуемых групп при интеллектуальной нагрузке выявила более сильное повышение уровня ЭКС у лиц с высокой степенью тревожности (на 25–50 %) практически во всех отведениях.
3. Энтропия Колмогорова–Синая ЭЭГ является объективным количественным показателем изменения динамических характеристик ключевых корковых и подкорковых структур мозга, которые принимают участие в формировании адаптивных процессов в условиях эмоционально напряженной деятельности.
4. Повышенная степень тревожности сопровождается более высоким уровнем хаоса. Энтропия Колмогорова–Синая ЭЭГ отражает уровень тревожности во всех областях головного мозга, что можно выявить с помощью функциональной нагрузки (обратный счет в уме).
5. Более высокий уровень ЭКС у лиц с повышенным уровнем общей тревожности в пределах, характерных для здорового мозга, отражает более высокую индивидуальную способность к адаптации.

Список литературы

Гласе Л., Мэки М. От часов к хаосу. Ритмы жизни. – М.: Мир, 1991. – 128с.

Майоров О.Ю. Нейродинамическая структура системных механизмов устойчивости к эмоциональному стрессу. Автореф. дисс. ... докт. мед. наук. – М., 1988. – 45с.

Майоров О.Ю., Фрицше Л.Н., Фрицше М. и др. Оценка динамических систем мозга у здоровых мужчин в состоянии спокойного бодрствования и при интеллектуальной нагрузке на основе оценки энтропии Колмогорова–Синая по ЭЭГ // Экспериментальная и клиническая медицина. – 2006. (в печати).

Николаев Е.А., Прокофьев В.Н. Количественная оценка уровня эмоциональной устойчивости специалиста оператора // Военно-медицинский журнал. – 1991. – №3. – С. 51–53.

Симонов П.В. Лекции о работе головного мозга. Потребностно-информационная теория высшей нервной деятельности. – М.: Институт психологии РАН, 1998. – 98с.

Aftanas L.I., Lotova N.V., Koshkarov V.I. et al. Non-linear analysis of emotion EEG: calculation of Kolmogorov entropy and the principal Lyapunov exponent // Neuroscience Letters. – 1997. – Vol.226. – P. 13–16.

Birbaumer N., Lutzenberger W., Elbert T. et al. Imagery and brain processes // The Structure of Emotion. – Toronto: Hogrefe and Huber, 1993. – P. 122–138.

- Chae J., Jeong J., Peterson B.S. et al. Dimensional complexity of the EEG in patients with posttraumatic stress disorder // *Psychiatry Research: Neuroimaging*. – 2004. – Vol.131. – P. 79–89.
- Chapman J.P., Chapman L.J. Handedness of hypothetically psychosis-prone subjects // *Journal of Abnormal Psychology*. – 1987. – Vol.96. – P. 89–93.
- Goldman D. The clinical use of the “average” reference electrode in monopolar recording // *EEG and Clin. Neurophysiol.* – 1950. – Vol.2. – P. 209–212.
- Grassberger P., Procaccia I. Estimation of Kolmogorov Entropy from a Chaotic Signal // *Phys. Rev.* – 1983. – Vol.28. – P.2591.
- Kantz H., Schreiber T. *Nonlinear Time Series Analysis*. – NY: Cambridge University Press, 2000. – 304p.
- Mayorov O.Yu., Fritzsche M., Glukhov A.B. et al. New neurodiagnostics technology for brain research on the basis of multivariate and nonlinear (deterministic chaos) analysis of an EEG // *Proceedings of 2nd European Congress «Achievements in Space Medicine into Health Care Practice and Industry»*. – 2003. – P. 157–166.
- Natarajan K., Acharaya U.R., Alias F. et al. Nonlinear analysis of EEG signals at different mental states // *BioMedical Engineering OnLine*. – 2004. – Vol.3. – P.7.
- Zigmond A.S., Snaith P.R. The Hospital Anxiety and Depression Scale // *Acta Psychiatr. Scand.* – 1983. – Vol.67. – P. 361–370.

ОЦІНКА ЕНТРОПІЇ КОЛМОГОРОВА–СІНАЯ ЗА ЕЕГ У ЗДОРОВИХ ЧОЛОВІКІВ З РІЗНИМ СТУПЕНЕМ ТРИВОЖНОСТІ

О.Ю.Майоров, Л.М.Фріцше, М.Фріцше, А.Б.Прогнімак, К.А.Степанченко

У здорових молодих чоловіків з підвищеним рівнем тривожності в спокійному стані виявлений високий рівень одного із ключових нелінійних параметрів ЕЕГ – ентропії Колмогорова–Сіная (еКС) в обох півкулях. Ще більш значне підвищення рівня еКС, у порівнянні з контрольною групою, спостерігається при інтелектуальному навантаженні (усний зворотний рахунок) в осіб з підвищеною тривожністю (на 25–50 %). Рівень тривожності впливає на величину еКС, що можна виявити за допомогою функціонального навантаження (усний зворотний рахунок). Високий рівень еКС у межах, характерних для здорового мозку, відображає високу індивідуальну здатність до адаптації в осіб з підвищеним рівнем тривожності.

Ключові слова: *кількісна ЕЕГ, тривожність, емоційний стрес, стійкість, нелінійний аналіз, ентропія Колмогорова–Сіная.*

KOLMOGOROV–SINAY ENTROPY EVALUATION BASED ON EEGS OF HEALTHY MEN WITH DIFFERENT DEGREE OF ANXIETY

O.Yu.Mayorov, L.N.Fritzche, M.Fritzche, A.B.Prognimak, K.A.Stepanchenko

Healthy young men characterized by increased degree of anxiety in the state of calm wakefulness displayed a higher level of one of the key nonlinear EEG parameters, Kolmogorov–Sinay entropy (KSe), in both hemispheres. During the intellectual task (reverse counting in memory) the increase of KSe was even higher in persons with higher level of personal anxiety (25–50 % higher). The level of anxiety has an influence on the value of KSe, which can be revealed during the intellectual task (reverse counting in memory). The higher level of KSe (within the normal range for a healthy brain) in persons with higher level of personal anxiety might reflect a higher individual capacity for adaptation.

Key words: *quantitative EEG, anxiety, emotional stress, resistance, nonlinear analysis, Kolmogorov–Sinay entropy.*

Представлено В.В.Давидовим
Рекомендовано до друку Є.Е.Перським