

III. МАТЕМАТИКА В ОПИСАНИИ ХАОСА И СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

DOI: 10.12737/24387

ЭНТРОПИЙНЫЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕМОРОГРАММ В ОТВЕТ НА ХОЛОДОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

В.В. ЕСЬКОВ, Д.В. БЕЛОЩЕНКО, Е.В. МАЙСТРЕНКО, Е.В. ВАЛИЕВА

БУ ВО «Сургутский государственный университет», ул. Ленина, 1, Сургут, 628400, Россия

Аннотация. Представлен сравнительный анализ динамики изменения параметров нервно-мышечной системы организма человека, а именно тремора у группы испытуемых в ответ на гипотермическое (локальное холодное) воздействие. В качестве базового результата после анализа данных, которые были получены методами традиционной статистики для описания сложных биосистем, была установлена низкая эффективность детерминистско-стохастического подхода. Производился расчет энтропии Шеннона в разных функциональных состояниях человека (до и после гипотермического воздействия). Анализ полученных данных показал, что после локального холодного воздействия значения энтропии Шеннона, рассчитанной для параметров координат $x_i=x_i(t)$ треморограмм в группе испытуемых снижаются, но при этом результаты статистически незначимы. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что детерминистско-стохастические методы (в частности, термодинамические методы) в оценки треморограмм имеют крайне низкую эффективность.

Ключевые слова: нервно-мышечная система, энтропия Шеннона, локальное холодное воздействие.

ENTROPY APPROACH TO THE ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF TREMO- ROGRAMM AT THE RESPONSE TO COLD EXPOSURE

V.V. ESKOV, D.V. BELOSHCHENKO, E.V. MAISTRENKO, E.V. VALIEVA

Surgut State University, Lenina pr., 1, Surgut, 628400, Russia

Abstract. The comparative analysis has been presented for dynamics of parameters change of the neuromuscular system of the human body, namely tremor in the group of subjects in response to hypothermic (local cooling) impact. As a basic result after analyzing the data, which were obtained by the methods of traditional statistics to describe complex biological systems, the low efficiency of deterministic-stochastic approach has been established. The calculation of Shannon entropy has been performed for different functional states of the neuromuscular system of a person (before and after hypothermic exposure). The analysis of data showed that after local cold exposure values of Shannon entropy calculated for the parameters of the coordinates $x_i=x_i(t)$ tremorogramm in group of test subjects reduced, but the results are statistically insignificant. The obtained results allow to conclude that the deterministic-stochastic methods (in particular, thermodynamic methods) have very low efficiency in the assessment of tremorogramm.

Key words: neuromuscular system, Shannon`s entropy, local cold exposure.

Введение. Энтропия в классическом представлении – есть мера неупорядоченности системы, а также функция состояния системы, остающейся постоянной при

замкнутых обратимых процессах; тогда как в необратимых процессах её изменение всегда положительно.

Производство энтропии положительно

как в системах, в которых хаос рождается из порядка, так и в системах, в которых, наоборот, порядок рождается из хаоса. В теоретическом обосновании все идет к тому, что в реальных системах идет постоянное изменение набора описывающих ее переменных, взаимодействий, появляются новые формы энергии и новые явления. Ведь мир не статичен, а форма существования материи является движением (изменением). «Энтропия же реальной системы – это интегральная характеристика «ширины» всего множества распределений системы» [4,15].

В классическом представлении энтропия может быть представлена как некая величина, показывающая насколько велико число в системе различных состояний, но она не отражает того, насколько они устойчивы, то есть не связывается с понятием беспорядка. В целом порядок и беспорядок выступают как детерминированное и недетерминированное состояние системы. Другими словами порядок и беспорядок показывают вероятность нахождения системы в том или ином состоянии, а неклассическое понятие энтропии – количество таких состояний. С признанием неклассической трактовки энтропии сейчас последуют изменения и в научной картине мира [6,8,9]. Вместе с этим, наука сделает большой шаг вперед и, возможно, эти изменения окажутся полезными в практическом смысле для биологии и медицины.

В работе представлен энтропийный анализ параметров нервно-мышечной системы человека в рамках новой *теории хаоса-самоорганизации*, т.е. представлен энтропийный подход в оценке параметров треморограмм испытуемых при влиянии локального холодового воздействия [10-12].

Объекты и методы исследования. В настоящих исследованиях объектом для наблюдения являлись испытуемые молодые люди (юноши и девушки) в возрасте от 20-ти до 25-ти лет. Обследование испытуемых производилось неинвазивными методами и соответствовало этическим нормам Хельсинской декларации (2000 г.). Работа выполнялась в рамках плана научных исследований лаборатории «Функциональных систем организма человека на Севере» при

институте естественных и технических наук БУ ВО «Сургутский государственный университет ХМАО-Югры». Регистрация ТМГ проводилась по стандартной методике: сидя в комфортном положении испытуемым необходимо было удерживать указательный палец кисти верхней правой конечности в статическом положении над токовихревым датчиком на определенном расстоянии [11,6]. Показатели снимались *до* и *после* гипотермического (локального холодового) воздействия. Всего было исследовано 30 человек, которые проживали на Севере более 20 лет, на предмет состояния их *нервно-мышечной системы* (НМС) в условиях гипотермии.

Информация о состоянии параметров произвольных микродвижений конечностей была получена на базе прибора «Тремораграф», который обеспечивает регистрацию кинематограмм (движения пальцев руки в заданном режиме). В основе работы устройства лежат токовихревые датчики с блоками усилителей, фильтров, которые подключаются к блоку 16-ти канального аналого-цифрового преобразователя и позволяют прецизионно (до 0,01 мм) определять координату $x=x(t)$ положения конечности с пластинкой в пространстве по отношению к регистратору (токовихревому датчику) [7,14]. Регистрация сигналов смещения конечности $x_1=x_1(t)$ и их обработка (получение производной от x_1 , т.е. $x_2=dx_1/dt$) осуществлялась с помощью программных продуктов на базе ЭВМ с использованием *быстрого преобразования Фурье* (БПФ) и *Wavelett* анализа (Моррета) для представления непериодических сигналов в виде непрерывной функции $x=x(t)$ [2,13,15].

Для параметров треморограмм у группы из 30 испытуемых была рассчитана энтропия Шеннона E до и после локального холодового воздействия, где E определяется по формуле $E(x) = -\sum_{i=1}^n p(i) \log_2 p(i)$, где p – функция вероятности. Для всех полученных значений были построены графики (гистограммы). Статистическая обработка данных осуществлялась при помощи программного пакета «*Statistica 6.1*». Проверка

данных на соответствие закону нормально-го распределения оценивалась на основе вычисления критерия Шапиро-Уилка. Дальнейшие исследования производились методами непараметрической статистики. Систематизация материала и представленных результатов расчетов выполнялась с применением программного пакета электронных таблиц *Microsoft EXCEL* [3,6,8].

Таблица 1

Результаты статистической проверки на соответствие закону нормального распределения (по критерия Шапиро-Уилка) значений энтропии E Шеннона, рассчитанной для параметров координат $x_i=x_i(t)$ треморограмм в группе испытуемых до и после локального холодого воздействия

Среднее для № 30		до воздействия	после воздействия
W		0,978	0,979
P		0,792	0,819
Описательная статистика	X_{cp}	3,748	3,738
	σ	0,080	0,090
	Доверит, -95%	3,718	3,704
	Доверит, +95%	3,778	3,771
	min	3,586	3,498
	max	3,908	3,910

Примечание: W – критерий Шапиро-Уилка (Shapiro-Wilk) для проверки типа распределения признака; p – достигнутый уровень значимости, полученный в результате проверки типа распределения по критерию Шапиро-Уилка (критическим уровнем значимости принят $p < 0,05$), X_{cp} – средние арифметические значения; σ – стандартные отклонения; min – минимальные значения; max – максимальные значения

Результаты и их обсуждение. Первоначально был выполнен статистический анализ динамики значений энтропии параметров треморограмм (для 30-ти испытуемых в координатах $x_i=x_i(t)$ – положение пальца по отношению к датчику) до и после локального холодого воздействия. Далее производился их анализ с помощью различных методов. В табл. 1 представлены результаты статистической обработки данных значений энтропии параметров координат $x_i=x_i(t)$ треморограмм в группе испытуемых до и после локального холодого

воздействия на предмет проверки соответствия нормального закона распределения. Так как данные параметров треморограмм распределены нормально, то поэтому результаты представлялись средними значениями и доверительным интервалом (-95-й и +95-й).

В табл. 1 представлена динамика гистограмм, которые использовались для расчета значений энтропии Шеннона, рассчитанной для параметров координат $x_i=x_i(t)$ треморограмм у группы испытуемых до и после локального холодого воздействия. Максимальное значение энтропии параметров ТМГ до локального холодого воздействия составляет 3,908 у.е, а минимальное значение 3,586 у.е; после локального холодого воздействия максимальное значение энтропии незначительно изменяется до 3,910 у.е, а минимальное значение составляет 3,498 у.е. Установлено снижение энтропии E после локального холодого воздействия на 0,01 у.е. (с 3,748 до 3,738 у.е.), что статистически не является достоверным различием в оценке ответной реакции нервно-мышечной системы человека на внешнее неблагоприятное воздействие [3,4,9]. Иными словами традиционная статистика дает низкую эффективность в оценке ТМГ с помощью энтропийного подхода.

Для наглядной оценки динамики изменения энтропии параметров треморограмм были построены гистограммы для каждого из группы испытуемых (рис. 1-2.). Нами установлена разнонаправленная динамика изменения этого показателя: в группе испытуемых значения энтропии как уменьшались, так и увеличивались после локального холодого воздействия. А именно, у испытуемого К.Д.А (рис.1.) значение энтропии E до локального холодого воздействия составило $E=3,944$ у.е.; после локального холодого воздействия происходит снижение энтропии до $E=3,733$ у.е., что может свидетельствовать об адаптации организма к воздействию холодом [12,14,15]. В отличие от испытуемого К.Д.А. у испытуемой Л.Ю.И (рис. 2.) наблюдается увеличение значение энтропии с 3,783 до 3,943, что

говорит об индивидуальных особенностях организма человека.

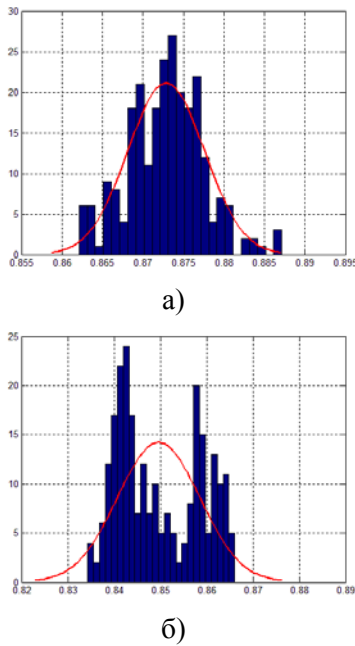


Рис. 1. Расчет энтропии параметров треморограмм испытуемого К.Д.А с координатами $x_1, x_2 = dx_1/dt$: а) гистограммы до локального холодого воздействия ($E=3,944$ у.е.) б) изменение гистограммы после локального холодого воздействия ($E=3,733$ у.е.)

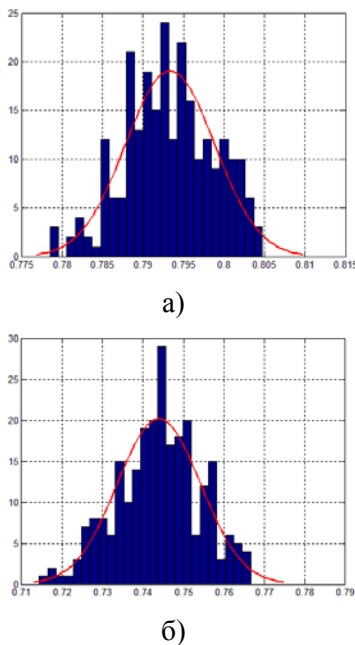


Рис. 2. Расчет энтропии параметров треморограмм испытуемого Л.Ю.И. с координатами $x_1, x_2 = dx_1/dt$: а) гистограммы до локального холодого воздействия ($E=3,783$ у.е.) б) изменение гистограммы после локального холодого воздействия ($E=3,943$ у.е.)

Подводя итог выше сказанному отметим, что любое направленное холодое воздействие изменяет значения параметров треморограмм, о чем свидетельствуют изменения значений энтропии Шеннона, однако полученный результат статистически не значим. Об этом говорят результаты табл. 2. Из данной таблицы видно, что статистически значимых различий в группе испытуемых до и после локального холодого воздействия по значениям энтропии E параметров треморограмм не выявлено, их значения выше критического уровня значимости ($p < 0,05$).

Таблица 2

Результаты применения парного критерия Стьюдента для оценки различий между средними значениями энтропии E параметров треморограмм группы испытуемых до и после локального холодого воздействия

Воздействие	Среднее	Стд. откл.	N	Разн.	Стд. Ош. разн.	t	df	p
До	3,74	0,08	30					
После	3,73	0,09	30	0,01	0,11	0,53	29	0,59

Примечание: среднее значение энтропии E (Среднее); стандартное отклонение для разности значений (Стд.от); среднее значение разности показателей (Разн.); стандартная ошибка среднего значения разности (Стд.от.раз); значение критерия Стьюдента для парных выборок (t); число степеней свободы (df); уровень значимости (p) для двустороннего теста, который не позволяет отвергнуть нулевую гипотезу об отсутствии различий между средними значениями энтропии E

В табл. 2 представлены результаты применения парного критерия Стьюдента для оценки различий между средними значениями в связанных группах (до и после локального холодого воздействия), которые демонстрируют факт о том, что среднее значение энтропии E статистически не различалось до холодого воздействия и после него ($t_{29}=0,53, p=0,59$).

Заключение. Расчет энтропии Шеннона E может быть использован в оценке адаптивных изменений в системе регуляции треморограмм, но он обладает низкой диагностической ценностью. С позиций стохастики расчет E может быть вообще не

чувствительным методом т.к. в основном энтропия параметров треморограмм статистически не изменяется. В этой связи возникает проблема правильности применения

теоремы Гленсдорфа – Пригожина в оценке параметров НМС.

Литература

References

1. Бернштейн Н.А. Биомеханика и физиология движений. Под ред. В.П. Зинченко. Институт практической психологии. 1997. 607 с.
 2. Бетелин В.Б., Еськов В.М., Галкин В.А., Гавриленко Т.В. Стохастическая неустойчивость в динамике поведения сложных гомеостатических систем // Доклады Академии Наук. Математическая физика. 2017. Т. 472, № 6. С. 1–3.
 3. Веракса А.Н., Филатова Д.Ю., Поскина Т.Ю., Ключ Л.Г. Термодинамика в эффекте Еськова – Зинченко при изучении стационарных состояний сложных биомедицинских систем // Вестник новых медицинских технологий. 2016. Т. 23, №2. С. 18–25.
 4. Еськов В.М., Филатова О.Е., Хадарцев А.А., Еськов В.В., Филатова Д.Ю. Неопределенность и непрогнозируемость – базовые свойства систем в биомедицине // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2013. № 1. С. 67–82.
 5. Еськов В.М., Хадарцев А.А., Филатова О.Е., Хадарцева К.А., Литовченко О.Г. Проблема оценки эффективности кинематической характеристики вектора состояния организма // Вестник новых медицинских технологий. 2015. Т. 22, №1. С. 143–152.
 6. Еськов В.М., Полухин В.В., Филатова Д.Ю., Эльман К.А., Глазова О.А. Гомеостатические системы не могут описываться стохастическим или детерминированным хаосом // Вестник новых медицинских технологий. 2015. Т. 22, № 4. С. 28–33.
 7. Еськов В.М., Зинченко Ю.П., Филатов М.А., Поскина Т.Ю. Эффект Н.А. Бернштейна в оценке параметров тремора при различных акустических воздействиях // Национальный психологический журнал. 2015. № 4. С. 66–73.
 8. Еськов В.М., Полухин В.В., Филатова Д.Ю.,
- Bernshteyn NA. Biomekhanika i fiziologiya dvizheniy [Biomechanics and Physiology of movements]. Pod red. V.P. Zinchenko. Institut prakticheskoy psikhologii, 1997. Russian.
 - Betelin VB, Es'kov VM, Galkin VA, Gavrilenko TV. Stokhasticheskaya neustoychivost' v dinamike povedeniya slozhnykh gomeostaticeskikh sistem [Stochastic instability in the dynamics of the behavior of the complex homeostatic systems]. Doklady Akademii Nauk. Matematicheskaya fizika. 2017;472(6):1-3. Russian.
 - Veraksa AN, Filatova DYu, Poskina TYu, Klyus LG. Termodinamika v effekte Es'kova – Zinchenko pri izuchenii statsionarnykh sostoyaniy slozhnykh biomeditsinskikh sistem [Thermodynamics in the effect Of eskova – Zinchenko during the study of the steady states of the complex biomedical systems]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2016;23(2):18-25. Russian.
 - Es'kov VM, Filatova OE, Khadartsev AA, Es'kov VV, Filatova DYu. Neopredelennost' i neprognoziruemost' – bazovye svoystva sistem v biomeditsine [Uncertainty and unpredictability - basic properties of systems in biomedicine]. Slozhnost'. Razum. Postneklassika. 2013;1:67-82. Russian.
 - Es'kov VM, Khadartsev AA, Filatova OE, Khadartseva KA, Litovchenko OG. Problema otsenki effektivno-sti kinematoicheskoy kharakteristiki vektora so-stoyaniya organizma [Estimation problem of the effec-tiveness of the kinematic characteristic of the state vector of the organism]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2015;22(1):143-52. Russian.
 - Es'kov VM, Polukhin VV, Filatova DYu, El'man KA, Glazova OA. Gomeostaticheskie sistemy ne mogut opisyyvat'sya stokhasticheskim ili determinirovannym khaosom [Homeostatic system can not be described by stochastics or deterministic chaos]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2015;22(4):28-33. Russian.
 - Es'kov VM, Zinchenko YuP, Filatov MA, Poskina TYu. Effekt N.A. Bernshteyna v otsenke parametrov tremora pri razlichnykh akusticheskikh vozdeystviyakh [The effect of NA Bernstein in the evaluation of tremor parameters for different acoustic effects]. Natsional'nyy psikhologicheskii zhurnal. 2015;4:66-73. Russian.
 - Es'kov VM, Polukhin VV, Filatova DYu, El'man

- Эльман К.А., Глазова О.А. Гомеостатические системы не могут описываться стохастическим или детерминированным хаосом // Вестник новых медицинских технологий. 2015. Т. 22, № 4. С. 28–33.
9. Еськов В.М., Хадарцев А.А., Филатова О.Е., Филатов М.А. Живые системы (complexity) с позиций теории хаоса – самоорганизации // Вестник новых медицинских технологий. 2015. Т. 22, № 3. С. 25–32.
10. Еськов В.М., Зинченко Ю.П., Филатов М.А., Еськов В.В. Эффект Еськова – Зинченко опровергает представления I.R. Prigogine, J.A. Wheeler и M. Gell-Mann о детерминированном хаосе биосистем – complexity // Вестник новых медицинских технологий. 2016. Т. 23, №2. С. 34–43.
11. Еськов В.М., Зинченко Ю.П., Филатова О.Е., Веракса А.Н. Биофизические проблемы в организации движений с позиций теории хаоса – самоорганизации // Вестник новых медицинских технологий. 2016. Т. 23, №2. С. 182–188.
12. Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В. Формализация эффекта «Повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // Биофизика. 2017. Т. 62, № 1. С. 168–176.
13. Зинченко Ю.П., Еськов В.М., Еськов В.В. Понятие эволюции Глендсдорфа-Пригожина и проблема гомеостатического регулирования в психофизиологии // Вестник Московского университета. Серия 14: Психология. 2016. № 1. С. 3–24.
14. Филатова О.Е., Козлова В.В., Белошченко Д.В., Прасолова А.А. Стохастическая и хаотическая оценка параметров нервно-мышечной системы человека в осенний и весенний периоды года // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2015. № 4. С. 42–50.
15. Филатов М.А., Веракса А.Н., Филатова Д.Ю., Поскина Т.Ю. Понятие произвольных движений с позиций эффекта Еськова-Зинченко в психофизиологии движений // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. №1. С. 24–32.
- KA, Glazova OA. Gomeostaticheskie sistemy ne mogut opisivyvat'sya stokhasticheskim ili determinirovannym khaosom [Homeostatic system can not be described by stochastics or deterministic chaos]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2015;22(4):28-33. Russian.
- Es'kov VM, Khadartsev AA, Filatova OE, Filatov MA. Zhivye sistemy (complexity) s pozitsiy teorii khaosa – samoorganizatsii [Living systems (complexity) from the point of chaos and self-organization theory]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2015;22(3):25-32. Russian.
- Es'kov VM, Zinchenko YuP, Filatov MA, Es'kov VV. Effekt Es'kova – Zinchenko oprovergaet predstavleniya I.R. Prigogine, JA. Wheeler i M. Gell-Mann o determinirovannom khaose biosistem – complexity [The effect Of eskova – Zinchenko refutes the ideas I.R. Prigogine, JA. Wheeler and M. Gell-Mann on determined chaos of the biosystems – complexity]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2016;23(2):34-43. Russian.
- Es'kov VM, Zinchenko YuP, Filatova OE, Veraksa AN. Biofizicheskie problemy v organizatsii dvizheny s pozitsiy teorii khaosa – samoorganizatsii [Biophysical problems in the organization of dvizheny from the positions of the theory of chaos – of self-organizing]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2016;23(2):182-8. Russian.
- Es'kov VM, Es'kov VV, Gavpilenko TV, Voxmina YuV. Fopmalizatsiya effekta «Povtopenie bez povtopeniya» N.A. Bepnshteyna [Fopmalizatsiya of effect “Povtopenie without povtopeniya” OF N.A. Bepnshteyna]. Biofizika. 2017;62(1):168-76. Russian.
- Zinchenko YuP, Es'kov VM, Es'kov VV. Ponya-tie evolyutsii Glensdorfa-Prigozhina i problema gomeostaticheskogo regulirovaniya v psikhofiziologii [Concept of the evolution of Glensdorfa- Prigogine and the problem of homeostatic regulation in psychophysiology]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 14: Psikhologiya. 2016;1:3-24. Russian.
- Filatova OE, Kozlova VV, Beloshchenko DV, Prasolova AA. Stokhasticheskaya i khaoticheskaya otsenka parametrov nervno-myshechnoy sistemy cheloveka v osenniy i vesenniy periody goda [Stochastic and chaotic estimation of the parameters of the neuromuscular system of man in the autumnal and spring periods of the year]. Slozhnost'. Razum. Postneklassika. 2015;4:42-50. Russian.
- Filatov MA, Veraksa AN, Filatova DYU, Poskina TYU. Ponyatie proizvol'nykh dvizheniy s pozi-tsiy effekta Es'kova-Zinchenko v psikhofiziologii dvizheniy [The concept of voluntary movements with positions Eskova-Zinchenko effect in psychophysiology of movements]. Slozhnost'. Razum. Postneklassika. 2016;1:24-32. Russian.