

III. МАТЕМАТИКА В ОПИСАНИИ ХАОСА И СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

DOI: 10.12737/article_59df74fb6b9b71.44443762

КВАЗИАТТРАКТОРЫ ТРЕМОРОГРАММ ПРИ ВЛИЯНИИ РАЗЛИЧНЫХ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Д.К. БЕРЕСТИН, И.Г. КУРМАНОВ, И.Н. САМСОНОВ, А.И. КОЛОСОВА

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

Аннотация. Изучены особенности моделирования хаотической динамики тремора в виде параметров квазиаттракторов микродвижений верхних конечностей человека без нагрузки и в условиях воздействия различных статических нагрузок ($F_2=3H$, $F_3=5H$). Показана практическая возможность применения метода многомерных фазовых пространств, для идентификации реальных изменений параметров функционального состояния организма человека. Основываясь на методах расчета параметров квазиаттракторов, в качестве количественной меры оценки реакции организма на внешние воздействия, использовались площади квазиаттракторов. В конечном итоге анализ производился на основе сравнения площадей S_G квазиаттрактора. Показано изменение площадей квазиаттракторов S_G при различных статических нагрузках. Были построены фазовые плоскости для всех 15-ти выборок (N) каждого испытуемого. Для квазиаттракторов были рассчитаны площади S , которые находились как произведение двух вариационных размахов фазовых координат Δx_1 и Δx_2 , т.е. $S = \Delta x_1 * \Delta x_2$. Используя площади квазиаттракторов в качестве количественной меры наблюдаемой динамики тремора, было доказано, что в условиях статической нагрузки квазиаттракторы увеличивается под влиянием статических нагрузок.

Ключевые слова: квазиаттрактор, тремор, статическая нагрузка, фазовое пространство.

QUASIAATTRACTOR OF TREMOROGRAMM UNDER THE INFLUENCE OF DIFFERENT STATIC LOADS

D.K. BERESTIN, I.G. KURMANOV, I.N. SAMSONOV, A.I. KOLOSOVA

Surgut State University

Abstract. It was investigated the modeling of tremor chaotic dynamic as a quasiattractor parameters of human limb movement without load and with load ($F_2=3H$, $F_3=5H$). It is possible to use of phase space method for identification of real changing of functional systems parameters of human body. The calculation of quasiattractors squat may be use fullness for such investigation as a measure of input perforation of human body. For tremorogramm we calculate such square of quasiattractor for different load of human limb. It was calculated sample of 15 square S for every man. The square of quasiattractor was calculated according variation of parameters x_1 and x_2 as $S=x_1*x_2$. The increasing of static load increase the value of S . Such dependence was used in physiology for homeostatic investigation.

Key-words: quasiattractor, tremor, static load, phase space.

Введение. Впервые открыты системные закономерности микродвижений и биохимических движений в целом Н.А. Бернштейном, который большое внимание уделял проблемам изучения двигательной активности человека. Он говорил о целостной структуре в организации деятельности *нервно-мышечной системы* (НМС), указывал о необходимости системно-структурного подхода в изучении

строения и функций различных систем движений [16-21]. Н.А. Бернштейн отмечал сложность контроля движений, т.к. подвижность кинематических цепей человеческого тела исчисляются множеством степеней свободы, координация движений – это преодоление избыточных степеней движущегося органа, превращение его в управляемую систему [10-15]. Движениями человека трудно

управлять, соответственно, актуальным является изучение одной из фундаментальных проблем управления движением, а именно, управление степенями свободы тела со стороны мозга, с точки зрения биомеханических и функциональных характеристик [1-6].

Мозг человека и двигательная система решает сложную задачу построения движения, большинство действий динамичны и требуют постоянной и слаженной работы всех элементов системы, которые в итоге, все-таки, работают хаотично [4-8]. Функциональное состояние организма человека в условиях выполнения специфических двигательных задач представляет особый интерес в рамках *теории хаоса и самоорганизации* (ТХС). В рамках нового подхода целесообразно изучение функциональных резервов организма с помощью системного анализа и синтеза его исходного состояния, выявления морфофункциональных особенностей организма в условиях покоя и после нагрузочных тестов. Он позволяет прогнозировать возможные изменения регуляторных систем НМС человека, как одной из важных в аспекте жизнеобеспечения со стороны любых *функциональных систем организма* (ФСО) человека [6-11].

В данной работе предлагается внедрение традиционных и новых физических методов в биологические исследования на основе метода двумерного фазового пространства для изучения особенностей реакции НМС в ответ на дозированные статические нагрузки [14-19]. Предлагается вместо традиционных пониманий стационарных режимов биосистем $dx/dt=0$, где $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ является *вектором состояния системы* (ВСС). При этом используются параметры *квазиаттракторов* (КА), внутри которых наблюдается движения ВСС в *фазовом пространстве состояний* (ФПС). Эти движения имеют хаотический характер, т.е. постоянно $dx/d=0$, но это движение ограничено

объемом КА, что и доказывается в нашем исследовании [13-17].

Объекты и методы исследования. К данному исследованию была привлечена группа испытуемых мужчин в возрасте от 23 до 28 лет, число испытуемых 16 человек. В наших экспериментах регистрировались параметры *треморограмм* (ТМГ) для каждого испытуемого в четырех различных состояниях. Первое состояние без изменения функционального состояния (без нагрузки), а остальные с применением двух видов статической нагрузки: удержание груза подвешенного на указательном пальце кисти в течение 5 секунд, использовались грузы массой 300 г., 500г. Перед испытуемыми стояла задача удержать палец в пределах заданной области, осознанно контролируя его неподвижность. При этом производилось многократное повторение (225 проб) регистрации тремора для каждого испытуемого. Регистрировались параметры тремора с помощью биофизического измерительного комплекса, разработанного в лаборатории биокibernетики и биофизики сложных систем при СурГУ. Установка включает металлическую пластинку (крепится жестко к пальцу испытуемого), токовихревой датчик, усилитель, АЦП и компьютер с оригинальным программным обеспечением. Регистрация ТМГ происходила с периодом квантования $\Delta\tau=10$ мсек, где в результате были получены некоторые выборки $x_1=x_1(t)$, которые представляли положение пальца с металлической пластиной в пространстве по отношению к датчику.

Обработка данных и регистрация тремора конечности испытуемых проводилась на ЭВМ с использованием программы «Charts3». С помощью этой программы осуществлялся анализ данных по временным характеристикам ТМГ. Далее сигнал $x_1(t)$ дифференцировался и получался вектор $x(t)=(x_1, x_2)^T$. На основе полученного вектора $x(t)=(x_1, x_2)^T$

строились КА динамики поведения $x(t)$ и определялись площади полученных КА S_G по формуле $S_G^{max} \geq \Delta x_1 \times \Delta x_2 \geq S_G^{min}$, где Δx_1 – вариационный размах величины ТМГ, а Δx_2 – размах изменений для $x_2(t)$ скорости изменения ТМГ [8-12]. В конечном итоге анализ состояния нервно-мышечной системы проводился на основе сравнения площади КА в виде S .

Результаты и их обсуждение. Для биосистем можно определить площади S_G КА, внутри которых происходит непрерывное хаотическое движение вектора состояния конкретной биосистемы. Для биологических систем мы имеем множество примеров фазового пространства с координатами x и dx/dt . В частности, для ТМГ мы вводим $x(t) = (x_1, x_2)^T$ в виде аналогий обобщенных координат в физике (x_1 и скорости x_2).

Таблица 1

Площади ($S \times 10^{-6}$) КА выборки ТМГ испытуемого (число повторов $N=15$)

№	S_1 – Измерение без нагрузки	S_2 – Измерение в условиях нагрузки (300 г)	S_3 – Измерение в условиях нагрузки (500 г)
1	0,45	5,21	17,13
2	3,06	4,26	10,71
3	0,88	4,29	21,79
4	1,50	10,36	12,04
5	0,55	8,18	7,03
6	0,45	9,18	4,68
7	0,86	6,14	17,88
8	0,78	5,71	14,65
9	0,55	5,15	16,97
10	0,17	7,81	21,82
11	0,21	7,43	34,56
12	0,27	7,19	13,32
13	1,79	10,28	10,92
14	0,43	10,66	20,13
15	0,36	5,57	12,37
$\langle k \rangle$	0,82	5,21	17,13
σ, \pm	0,74	2,13	6,99

В качестве основной меры КА используется площадь (S_G) области 2-х мерного фазового пространства, внутри

которого заключены все значения $f(x)$ состояния биологической динамической системы на промежутке времени. Для КА с координатами $x_1 = x(t)$ и $x_2 = v(t) = dx_1/dt$, были рассчитаны площади $S = \Delta x_1 \times \Delta x_2$, которые находились как произведение двух вариационных размахов фазовых координат Δx_1 и Δx_2 . При расчете среднего значения площадей ($\langle S \rangle$) и стандартного отклонения (σ, \pm), были получены следующие данные. Среднее значение площади КА без нагрузки $\langle S_1 \rangle = 0,82 \times 10^{-6} \pm 0,74 \times 10^{-6}$ у.е., для площади КА пристатической нагрузки 300 г. $\langle S_2 \rangle = 5,21 \times 10^{-6} \pm 2,13 \times 10^{-6}$ у.е., при статической нагрузке 500 г. $\langle S_3 \rangle = 17,13 \times 10^{-6} \pm 6,99 \times 10^{-6}$ у.е.

Таким образом, методы оценки хаотической динамики (с помощью параметров КА, матриц парных сравнений и скорости v изменения КА) могут быть использованы для изучения произвольности (или непроизвольности) в организации движений и для оценки эффектов физических воздействий на параметры ТМГ.

Для выявления различий между показателями площадей КА ТМГ в 3-х различных состояниях использовался непараметрический критерий Вилкоксона, выявленные статистически значимые различия при сравнении площадей КА ТМГ отображены в табл. 2. В виде матрицы парных сравнений выбор площадей КА ТМГ при различных статических нагрузках, где отображены уровни значимости p .

Таблица 2

Матрица парных сравнений выборки площадей КА ТМГ при различных статических нагрузках.

	S_1	S_2	S_3
S_1		0,0	0,0
S_2	0		0,0
S_3	0	0,0	

Как видно из табл. 2 при попарном сравнении выборок площадей КА ТМГ в четыре уровня значимости p меньше критического уровня значимости (за критический уровень статистической значимости взято $p=0,05$). Полученные уровни значимости говорят о том, что различия между значениями площадей КА ТМГ существенные.

Заключение. Используя площади КА в качестве количественной меры наблюдаемой динамики тремора, было доказано, что в условиях статической нагрузки КА увеличивается. Таким образом, площадь S для КА выборок ТМГ изменяются однонаправлено в сторону увеличения S в зависимости от массы груза. В целом, такая динамика наблюдается у всех испытуемых, но значения параметров КА индивидуальны для каждого испытуемого.

Литература

1. Башкатова Ю.В., Белощенко Д.В., Мирошниченко И.В., Воробьева Л.А. Проблема статистической неустойчивости кардиоинтервалов в получаемых подряд выборках неизменного гомеостаза в условиях Севера РФ // Вестник новых медицинских технологий. – 2017. – Т. 24. – № 1. – С. 36-42.
2. Белощенко Д.В., Якунин В.Е., Потетюрин Е.С., Королев Ю.Ю. Оценка параметров электромиограмм у женщин при разном статическом усилии в режиме повторения // Клиническая медицина и фармакология. – 2017. – Т. 3. – № 1. – С. 26-31.
3. Белощенко Д.В., Башкатова Ю.В., Филатова Д.Ю., Мороз О.А. Параметры сердечно-сосудистой системы в условиях влияния различных внешних воздействий // Вестник новых медицинских технологий. 2017. Т. 24, № 2. С. 37-43.
4. Гавриленко Т.В., Якунин Е.В., Горбунов Д.В., Гимадиев Б.Р., Самсонов И.Н. Эффект Еськова-Зинченко в оценке параметров теппинга // Вестник новых медицинских технологий. 2017. Т. 24, № 1. С. 9-14.
5. Гавриленко Т.В., Горбунов Д.В., Белощенко Д.В., Чертищев А.А. Теорема Гленсдорфа-Пригожина в оценке параметров треморограмм // Вестник новых медицинских технологий. 2017. Т. 24, № 2. С. 16-21.
6. Гавриленко Т.В., Горбунов Д.В., Гимадиев Б.Р., Чертищев А.А. Граница применимости теоремы Гленсдорфа - Пригожина в описании биомеханических систем // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2017. Т. 11, № 1. С. 68-73.
7. Еськов В.В. Термодинамика неравновесных систем I.R. Prigogine и энтропийный подход в физике живых систем // Вестник новых медицинских технологий. – 2017. – Т. 24. – № 2. – С. 7–15.
8. Еськов В.В. Хаос и самоорганизация в работе нейросетей мозга // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2017. Т. 11, № 1. С. 61-67.
9. Еськов В.М., Филатова О.Е., Полухин В.В. Проблема выбора абстракций при применении биофизики в медицине // Вестник новых медицинских технологий. – 2017. – Т. 24. – № 1. – С. 158-167.
10. Еськов В.М., Зинченко Ю.П., Филатов М.А., Иляшенко Л.К. Теорема Гленсдорфа – Пригожина в описании хаотической динамики тремора при холодовом стрессе // Экология человека. – 2017. – №5. – С. 27-32.
11. Зилов В.Г., Хадарцев А.А., Еськов В.В., Еськов В.М. Экспериментальные исследования статистической устойчивости выборок кардиоинтервалов // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. – 2017. – Т. 164. – № 8. – С. 136-139.
12. Шакирова Л.С., Филатова Д.Ю., Ворошилова О.М., Камалтдинова К.Р. Стохастический и хаотический анализ параметров сердечно-сосудистой системы школьников в условиях широтных перемещений // Вестник новых медицинских технологий. 2017. Т. 24, № 1. С. 15-20.

13. Шакирова Л.С., Филатова Д.Ю., Трусов М.В., Мороз О.А. Матрицы межаттракторных расстояний в оценке показателей параметров сердечно-сосудистой системы мальчиков и девочек в условиях широтных перемещений // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2017. Т. 11, № 1. С. 24-29.

14. Широков В.А, Томчук А.Г, Роговский Д.А. Стохастический и хаотический анализ вертебрoneврологических показателей пациентов при остеохондрозе позвоночника в условиях севера // Клиническая медицина и фармакология. – 2017. – Т. 3. – № 1. – С. 34-38.

15. Betelin V.B., Eskov V.M., Galkin V.A. and Gavrilenko T.V. Stochastic Volatility in the Dynamics of Complex Homeostatic Systems // Doklady Mathematics. – 2017. – Vol. 95. – No.1. – Pp. 92–94.

16. Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V. and Vochmina Yu.V. Formalization of the Effect of “Repetition without Repetition” discovered by N.A. Bernshtein // Biophysics. – 2017. – Vol. 62. – No. 1. – Pp. 143–150.

17. Eskov V.M., Eskov V.V., Vochmina Y.V., Gorbunov D.V., Ilyashenko L.K. Shannon entropy in the research on stationary regimes and the evolution of complexity // Moscow University Physics Bulletin. – 2017. – Vol. 72. – No. 3. – Pp. 309-317.

18. Eskov V.M., Bazhenova A.E., Vochmina U.V., Filatov M.A., Ilyashenko L.K. N.A. Bernstein hypothesis in the description of chaotic dynamics of involuntary movements of person // Russian Journal of Biomechanics. – 2017. – Vol. 21. – No.1. – Pp.14-23.

19. Eskov V.M., Gudkov A.B., Bazhenova A.E., Kozupitsa G.S. The tremor parameters of female with different physical training in the Russian North // Human Ecology. – 2017. – No. 3. – Pp. 38-42.

20. Zilov V.G., Eskov V.M., Khadartsev A.A., Eskov V.V. Experimental Verification of the Bernstein Effect “Repetition without Repetition” // Bulletin of Experimental Biology and Medicine. – 2017. – No. 1. – Pp. 1-5.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ «Разработка новых информационных моделей и вычислительных алгоритмов для идентификации параметров порядка в описании и прогнозах сложных медико-биологических систем», №15-41-00034 p_урал_a.

References

1. Bashkatova Ju.V., Beloshhenko D.V., Miroshnichenko I.V., Vorob'eva L.A. Problema statisticheskoj neustojchivosti kardiointervalov v poluchaemyh podryad vybornkah neizmennogo gomeostaza v uslovijah Severa RF [Problem of statistical instability in samples of rr intervals recorded consecutively during constant homeostasis in conditions of the Russian North] // Vestnik novyh medicinskih tehnologij. – 2017. – Т. 24. – № 1. – S. 36-42.

2. Beloshhenko D.V., Jakunin V.E, Potetjurina E.S., Korolev Ju.Ju. Ocenka parametrov jelektromiogramm u zhenshhin pri raznom staticheskom usilii v rezhime povtorenija [Assesment of electromyograms parameters in women with different static physical loads during repetitions] // Klinicheskaja medicina i farmakologija. – 2017. – Т. 3. – № 1. – S. 26-31.

3. Beloshhenko D.V., Bashkatova Ju.V., Filatova D.Ju., Moroz O.A. Parametry serdechno-sosudistoj sistemy v uslovijah vlijanija razlichnyh vneshnih vozdeystvij [The parameters of cardiovascular system in conditions of external influences] // Vestnik novyh medicinskih tehnologij. 2017. Т. 24, № 2. S. 37-43.

4. Gavrilenko T.V., Jakunin E.V., Gorbunov D.V., Gimadiev B.R., Samsonov I.N. Jeffekt Es'kova-Zinchenko v ocenke parametrov teppinga [Eskov-Zinchenko effect in the estimation of tapping parameters] // Vestnik novyh medicinskih tehnologij. 2017. Т. 24, № 1. S. 9-14.

5. Gavrilenko T.V., Gorbunov D.V., Beloshhenko D.V., Chertishhev A.A. Teorema Glensdorfa-Prigozhina v ocenke parametrov

- tremorogramm [The Glensdorf-Prigogine theorem in the estimation of tremorograms parameters] // Vestnik novyh medicinskih tehnologij. 2017. T. 24, № 2. S. 16-21.
6. Gavrilenko T.V., Gorbunov D.V., Gimadiev B.R., Chertishhev A.A. Granica primenimosti teoremy Glensdorfa - Prigozhina v opisanih biomehanicheskikh sistem [Limit of applicability the theorem of Glansdorff-Prigogine in the describing of biomechanics systems] // Vestnik novyh medicinskih tehnologij. Jelektronnoe izdanie. 2017. T. 11, № 1. S. 68-73.
7. Es'kov V.V. Termodinamika neravnovesnyh sistem I.R. Prigogine i jentropijnyj podhod v fizike zhivyh sistem [Thermodynamics of nonequilibrium systems I.R. Prigogine and entropy approach in the physics of living systems] // Vestnik novyh medicinskih tehnologij. – 2017. – T. 24. – № 2. – S. 7–15.
8. Es'kov V.V. Haos i samoorganizacija v rabote nejrosetej mozga [Chaos and self-organization in the neural networks of the brain] // Vestnik novyh medicinskih tehnologij. Jelektronnoe izdanie. 2017. T. 11, № 1. S. 61-67.
9. Es'kov V.M., Filatova O.E., Poluhin V.V. Problema vybora abstrakcij pri primenenii biofiziki v medicine [Problem of a choice of abstractions: application the biophysics in medicine] // Vestnik novyh medicinskih tehnologij. – 2017. – T. 24. – № 1. – S. 158-167.
10. Es'kov V.M., Zinchenko Ju.P., Filatov M.A., Iljashenko L.K. Teorema Glensdorfa – Prigozhina v opisanih haoticheskoy dinamiki tremora pri holodovom stresse [Glansdorff-Prigogine theorem in the description of tremor chaotic dynamics in cold stress] // Jekologija cheloveka. – 2017. – №5. – S. 27-32.
11. Zilov V.G., Hadarcev A.A., Es'kov V.V., Es'kov V.M. Jeksperimental'nye issledovanija statisticheskoy ustojchivosti vyborok kardiointervalov [The absence of statistical stability in rr-intervals of human body] // Bjulleten' jeksperimental'noj biologii i mediciny. – 2017. – T. 164. – № 8. – S. 136-139.
12. Shakirova L.S., Filatova D.Ju., Voroshilova O.M., Kamaltdinova K.R. Stohasticheskij i haoticheskij analiz parametrov serdechno-sosudistoj sistemy shkol'nikov v uslovijah shirotnyh peremeshhenij [Stochastic and chaotic analysis of parameters of cardiovascular system in the students in terms of latitudinal displacement] // Vestnik novyh medicinskih tehnologij. 2017. T. 24, № 1. S. 15-20.
13. Shakirova L.S., Filatova D.Ju., Trusov M.V., Moroz O.A. Matricy mezhattraktornyh rasstojanij v ocenke pokazatelej parametrov serdechno-sosudistoj sistemy mal'chikov i devochek v uslovijah shirotnyh peremeshhenij [Megafactory matrix of distances in the assessment of parameters of cardiovascular system of girls and boys in terms of latitudinal displacement] // Vestnik novyh medicinskih tehnologij. Jelektronnoe izdanie. 2017. T. 11, № 1. S. 24-29.
14. Shirokov V.A., Tomchuk A.G., Rogovskij D.A. Stohasticheskij i haoticheskij analiz vertebronevrologicheskikh pokazatelej pacientov pri osteohondroze pozvonochnika v uslovijah severa [Stochastic and chaotic analysis of vertebroneurological indicators of patients with osteochondrosis of the vertebra in the north] // Klinicheskaja medicina i farmakologija. – 2017. – T. 3. – № 1. – S. 34-38.
15. Betelin V.B., Eskov V.M., Galkin V.A. and Gavrilenko T.V. Stochastic Volatility in the Dynamics of Complex Homeostatic Systems // Doklady Mathematics. – 2017. – Vol. 95. – No.1. – Pp. 92–94.
16. Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V. and Vochmina Yu.V. Formalization of the Effect of “Repetition without Repetition” discovered by N.A. Bernshtein // Biophysics. – 2017. – Vol. 62. – No. 1. – Pp. 143–150.
17. Eskov V.M., Eskov V.V., Vochmina Y.V., Gorbunov D.V., Ilyashenko L.K. Shannon entropy in the research on stationary regimes and the evolution of complexity // Moscow University Physics Bulletin. – 2017. – Vol. 72. – No. 3. – Pp. 309-317.
18. Eskov V.M., Bazhenova A.E., Vochmina U.V., Filatov M.A., Ilyashenko L.K. N.A.

Bernstein hypothesis in the description of chaotic dynamics of involuntary movements of person // Russian Journal of Biomechanics. – 2017. – Vol. 21. – No.1. – Pp.14-23.

19. Eskov V.M., Gudkov A.B., Bazhenova A.E., Kozupitsa G.S. The tremor parameters of female with different physical training in the Russian North // Human Ecology. – 2017. – No. 3. – Pp. 38-42.

21. Zilov V.G., Eskov V.M., Khadartsev A.A., Eskov V.V. Experimental Verification of the Bernstein Effect “Repetition without Repetition” // Bulletin of Experimental Biology and Medicine. – 2017. – No. 1. – Pp. 1-5.