

ГРАНИЦА ПРИМЕНИМОСТИ ТЕОРЕМЫ ГЛЕНСДОРФА-ПРИГОЖИНА В ОПИСАНИИ
БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Т.В. ГАВРИЛЕНКО, Д.В. ГОРБУНОВ, Б.Р. ГИМАДИЕВ, А.А. ЧЕРТИЩЕВ

БУ ВО Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет»,
ул. Ленина, 1, Сургут, 628400, Россия

Аннотация. Скорость эволюции $v(t)$ разных систем различна, но механизмы и количественные закономерности при этом могут быть похожими. Для таких разных биосистем мы сейчас предлагаем новый формальный математический аппарат, который бы описывал все эти процессы. Сейчас для сложных, многокомпонентных систем, у которых размерность m фазового пространства состояний велика ($m \gg 1$), не существует интегративных методов расчета скорости эволюции в рамках теории, разработанной И.Р. Пригожиным и П. Гленсдорфом. Термодинамический подход в оценке эволюции оказался неэффективным для систем третьего типа. При этом на уровне молекулярных систем он выполняется – работает известная теорема И.Р. Пригожина (Нобелевская премия за термодинамику неравновесных систем). Показано, что при изменении состояния функциональной системы человека энтропия E измеренного сигнала не изменяется.

Ключевые слова: гомеостаз, тремор, термодинамика неравновесных систем, энтропия Шеннона

LIMIT OF APPLICABILITY THE THEOREM OF GLANSDORF-PRIGOGINE
IN THE DESCRIBING OF BIOMECHANICS SYSTEMS

T.V. GAVRILENKO, D.V. GORBUNOV, B.R. GIMADIEV, A.A. CHERTISHCHEV

Surgut state University, Lenin pr., 1, Surgut, 628400, Russia

Abstract. The speed of the evolution of $v(t)$ of different systems is different, but the mechanisms and quantitative patterns may be similar. For different biological systems, the authors should have a new formal mathematical apparatus, which describes all these processes. Now for complex multi-component systems in which the dimension of the phase space of States is large, $m \gg 1$, there is no integrative methods for calculating of the speed of evolution in the framework of the theory which was developed by I. R. Prigogine and P. Glansdorf. Thermodynamic approach to estimation of the evolution has been effective for systems of third type. In the case as the level of molecular systems it runs – has a famous theorem of I. R. Prigogine (Nobel Prize for thermodynamics of non-equilibrium systems) may be used for such systems. It was proved that the changing of functional system didn't provide the registration changing of signal as an entropy E parameters.

Key words: homeostasis, tremor, thermodynamics of non-equilibrium systems, the Shannon entropy

Введение. Создатели *термодинамики неравновесных систем* (ТНС) и её основоположник И.Р. Пригожин активно пытались описывать реальные биосистемы – *complexity* в рамках понятий: энтропия E , скорость прироста энтропии $P=dE/dt$, устойчивость стационарных состояний и эволюция. Для многих систем (процессов) была доказана теорема (принцип) минимального производства энтропии ($dP/dt \leq 0$), т.е. для скорости P изменения энтропии (E) в виде $P=dE/dt$ при $E=max$. Однако, для нелинейных процессов и особых *систем третьего типа* (СТТ), которые сейчас обозначают как *complexity*, такое неравенство может и не выполняться и тогда общий критерий эволюции термодинамических систем Пригожина-Гленсдорфа (в виде $d_e P/dt \leq 0$) может тоже не выполняться. Тогда возникает задача оценки скорости эволюции и её направления для нелинейных биосистем, которые мы сейчас определяем как СТТ [1-7, 10-15].

Поскольку Ф. Шлегль показывает, что вторая вариация энтропии E находится в тесной связи с информацией, которая получается при переходе из состояния с вероятностью P_i в состояние с вероятностью P_i^1 ($K(P_i, P_i^1) = \sum P_i \ln(P_i/P_i^1)$), то предлагается использовать эту функцию K в качестве функции Ляпунова. Тогда возникает критерий устойчивости Шлегля в виде $dK/dt \leq 0$. Однако, критерий устойчивости Ляпунова остаётся базовым в теории устойчивости сложных, неравновесных систем, особенно это касается систем с аналитической возможностью описания их динамики. Для СТТ практически сейчас нет таких моделей и поскольку СТТ невозможно относить к описываемым аналитически линейным и нелинейным (в традиционном смысле) системам, то возникает проблема оценки устойчивости и эволюции в новой интерпретации именно для СТТ [1-7, 21-23].

В начале исследования были рассчитаны матрицы парного сравнения для 15 серий исследований по 15 выборок в каждой серии. Как типовой пример одной из таких матриц парного сравнения выборок треморограмм одного и того же испытуемого (число повторов $N=15$) полученную с помощью не параметрического критерия Вилкоксона представлена в табл. 1, здесь число совпадений $k=3$, т.е. из всех возможных пар сравнения (всего 105 пар) только 3 пары можно отнести к одной генеральной совокупности, остальные 102 пары разные. Очевидно, что возможность «совпадения» выборок очень невелика, практически все выборки разные и это является особенностью СТТ, для тремора всегда число совпадение очень невелико. Более того при повторных проведениях исследования 15 раз по 15 выборок, число совпадений k незначительно изменяется и всегда из всевозможных 105 пар имеем 3-7% совпадений.

Так же для полученных 225 выборок тремора от одного испытуемого были рассчитаны параметры КА. При анализе данных результаты исследования были разбиты на 15 серий испытаний по 15 выборок в каждой серии. В результате проделанных расчетов можно сказать, что средние значения каждой серии изменяются от 1.33×10^{-8} до 2.86×10^{-8} . Согласно результатам полученным при парном сравнении каждой серии испытания, число совпадений выборок площадей КА $k=68$, т. е. 37 пар разные, а остальные 68 пар можно отнести к одной генеральной совокупности. Аналогичным образом рассчитывались объемы КА и парно сравнивались все со всеми. Полученные результаты очень близки к результатам для площадей S КА, число совпадений при парном сравнении выборок объемов КА несколько выше, здесь $k=72$.

Энтропийный подход в оценке треморограмм. Использовался один из методов стохастики в виде расчета значения энтропии Шеннона. Энтропия Шеннона связана с распределением вероятностей амплитуд колебаний движения. Фактически, это мера упорядоченности выборок x_i – компонент вектора состояния системы $x(t)$ в *фазовом пространстве состояний* (ФПС). Формальное определение энтропии для независимых случайных событий x с n возможными состояниями (от 1 до n , p – функция вероятности) рассчитывается по формуле: $E = -\sum p_i \log_2 p_i$, где p – функция вероятности. Производилось сравнение значений E с особенностями функциональных состояний [5-11].

Эта процедура нами сейчас выполнена только для одной координаты $x_1(t)$, а вторая координата (скорость) $x_2=dx_1/dt$ входила в вектор $x=(x_1, x_2)^T$. Этот $x(t)$ совершал непрерывные хаотические движения в таком двумерном ФПС. Само это движение у нас оценивалось в рамках расчета энтропией E и параметров КА. Значения энтропии Шеннона E рассчитывались для всех 225 выборок треморограмм. В табл. 2 представлены значения для 15-ти выборок треморограмм, как типовой пример без нагрузки ($P_1=0$ H) и с нагрузкой ($P_2=3$ H).

Таблица 2

Результаты статистической обработки динамики поведения E – энтропии Шеннона для тремора конечности одного и того же человека (число повторов $N=15$) без нагрузки ($P_1=0$) и с нагрузкой ($P_2=3$ H)

	E_1 без нагрузки	E_2 с нагрузкой $P_2=3$ H
1	3.322	3.322
2	3.322	3.322
3	3.122	3.122
4	3.122	2.922
5	3.322	2.922
6	2.922	3.322
7	3.322	2.922
8	3.122	3.322
9	3.322	3.122
10	2.922	2.922
11	3.322	3.322
12	2.922	3.322
13	2.846	3.322
14	3.322	3.322
15	2.922	2.846
<E>	3.143	3.157
Критерий Вилкоксона, уровень значимости $p=0.72$		

Так же для полученных выборок энтропии Шеннона строилась матрица парного сравнения от одного и того же испытуемого. Результат такого сравнения показал, что число совпадений $k=102$. Такое же число совпадений получается и для детерминированного хаоса (выборки, полученные на хаотическом ге-

нераторе чисел). Такие выборки всегда демонстрируют 97-99% совпадений и имеют равномерное распределение [14-17].

Результаты статистической проверки на нормальность распределения треморограмм испытуемых по критерию Шапиро-Уилка, демонстрируют не параметрический тип распределения. Поэтому для выявления различий показателей треморограмм испытуемого без нагрузки и с нагрузкой нами использовались методы непараметрической статистики. Однако, энтропия Шеннона E не дает столь существенных различий для повторов измерения подряд от одного испытуемого и при оценке двух функциональных состояний – тремор без нагрузки ($P_1=0 H$) и с нагрузкой ($P_2=3 H$).

Выводы:

1. На основе проведенных исследований можно сделать сказать, что метод расчета энтропий Шеннона E может быть использован в оценке адаптивных изменений в системе регуляции тремора, но он обладает слабой чувствительностью и с позиций стохастики может быть вообще не чувствительным. В результате построения матрицы парного сравнения для энтропии Шеннона можно сказать, что число совпадений пар выборок энтропии Шеннона в такой матриц такое же как и для детерминированного хаоса, порядка 97-99% пар совпадений.

2. Метод расчета матриц парных сравнений выборок треморограмм целесообразно использовать для оценки реакции системы регуляции тремора. Так как этот метод может уловить незначительные изменения в параметрах гомеостаза.

Литература

1. Адайкин В.И., Берестин К.Н., Глушук А.А., Лазарев В.В., Полухин В.В., Русак С.Н., Филатова О.Е. Стохастические и хаотические подходы в оценке влияния метеофакторов на заболеваемость населения на примере ХМАО-Югры // Вестник новых медицинских технологий. 2008. Т. 15, № 2. С. 7–9.

2. Башкатова Ю.В., Карпин В.А., Еськов В.В., Филатова Д.Ю. Статистическая и хаотическая оценка параметров кардиоинтервалов в условиях физической нагрузки // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2015. №2. С. 5–10

3. Берестин Д.К., Черников Н.А., Поскина Т.Ю., Потетюрин Е.С. Хаотическая динамика амплитудно - частотных характеристиках треморограмм при многократных повторах измерений // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. №1. С. 71–78

4. Бетелин В. Б., Еськов В. М., Галкин В. А., Гавриленко Т. В. Стохастическая неустойчивость в динамике поведения сложных гомеостатических систем // Доклады академии наук. 2017. Т. 472, № 6. С. 642–644.

5. Вохмина Ю.В., Еськов В.М., Гавриленко Т.В., Филатова О.Е. Измерение параметров порядка на основе нейросетевых технологий // Измерительная техника. 2015. № 4. С. 65–68.

6. Гавриленко Т.В., Майстренко Е.В., Горбунов Д.В., Черников Н.А., Берестин Д.К. Влияние статической нагрузки мышц на параметры энтропии электромиограмм // Вестник новых медицинских технологий. 2015. Т. 22, № 4. С. 7–12.

7. Дудин Н.С., Русак С.Н., Хадарцев А.А., Хадарцева К.А. новые подходы в теории устойчивости биосистем-альтернатива теории Ляпунова А.М. // Вестник новых медицинских технологий. 2011. Т. 18, № 3. С. 336.

8. Еськов В.В., Филатов М.А., Филатова Д.Ю., Журавлева О.А. Complexity и эмерджентность в представлениях и.р. пригожина и третьей парадигмы // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 3. С. 59–67.

9. Еськов В.В., Филатов М.А., Филатова Д.Ю., Прасолова А.А. Границы детерминизма и стохастики в изучении биосистем - complexity // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. №1. С. 83–91

10. Еськов В.М., Филатова О.Е., Проворова О.В., Химикова О.И. Нейроэмуляторы при идентификации параметров порядка в экологии человека // Экология человека. 2015. № 5. С. 57–64.

11. Еськов В.М., Зинченко Ю.П., Филатова О.Е. К проблеме самоорганизации в биологии и психологии // Вестник новых медицинских технологий. 2016. Т. 23, №3. С. 174–181.

12. Еськов В.М., Зинченко Ю.П., Филатова О.Е. Развитие психологии и психофизиологии в аспекте третьей парадигмы естествознания // Вестник новых медицинских технологий. 2016. Т. 23, №3. С. 187–194.

13. 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.

14. 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.

15. Еськов В.М., Хадарцев А.А., Филатова О.Е., Хадарцева К.А., Литовченко О.Г. Проблема оценки эффективности лечения на основе кинематической характеристики вектора состояния организма // Вестник новых медицинских технологий. 2015. Т. 22, № 1. С. 143–152.
16. Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В. Формализация эффекта «повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // Биофизика. 2017. Т. 62, вып. 1. С. 168–176.
17. Зилон В.Г., Еськов В.М., Хадарцев А.А., Еськов В.В. Экспериментальное подтверждение эффекта «Повторение без повторения» Бернштейна Н.А. // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2017. № 1. С. 4–9.
18. Зинченко Ю.П., Филатова О.Е., Еськов В.В., Стрельцова Т.В. Объективная оценка сознательного и бессознательного в организации движений // Вестник новых медицинских технологий. 2016. Т. 23, №3. С. 31–38.
19. Русак С.Н., Козупица Г.С., Филатова О.Е., Еськов В.В., Шевченко Н.Г. Динамика статуса вегетативной нервной системы у учащихся младших классов в погодных условиях г. Сургута // Вестник новых медицинских технологий. 2013. Т. 20, № 4. С. 92–95.
20. Филатова О.Е., Еськов В.В., Вохмина Ю.В., Зимин М.И. Принцип относительности покоя и движения гомеостатических систем или является ли биомеханика разделом физической механики и термодинамики? // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2015. №3. С. 66–76
21. Филатова О.Е., Зинченко Ю.П., Еськов В.В., Стрельцова Т.В. Сознательное и бессознательное в организации движений // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 3. С. 23–30.
22. Хадарцев А.А., Еськов В.М., Козырев К.М., Гонтарев С.Н. Медико-биологическая теория и практика. Тула. 2011. 231 с.
23. Es'kov V.M., Filatova O.E. A compartmental approach in modeling a neuronal network. role of inhibitory and excitatory processes // Биофизика. 1999. Т. 44. № 3. С. 518–525.

References

1. Adaykin VI, Berestin KN, Glushchuk AA, Lazarev BV, Polukhin VV, Rusak CN, Filatova OE. Stokhasticheskie i khaoticheskie podkhody v otsenke vliyaniya meteofaktorov na zabolevaemost' naseleniya na primere KhMAO-Yugry [Stochastic and chaotic approaches in assessing the influence of metefactors on the incidence of the population on the example of Hmao-Ugra]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2008;15(2):7-9. Russian.
2. Bashkatova YV, Karpin VA, Es'kov VV, Filatova DY. Statisticheskaya i khaoticheskaya otsenka parametrov kardiointervalov v usloviyakh fizicheskoy nagruzki [Statistical and chaotic evaluation of parameters of cardiointervals in conditions of physical activity]. Slozhnost'. Razum. Postneklassika. 2015;2:5-10. Russian.
3. Berestin DK, Chernikov NA, Poskina TY, Potetyurina ES. Khaoticheskaya dinamika amplitudno - chastotnykh kharakteristikakh tremorogramm pri mnogokratnykh povtorakh izmereniy [Chaotic dynamics of amplitude - frequency characteristics of tremorograms with multiple replicates of measurements]. Slozhnost'. Razum. Postneklassika. 2016;1:71-8. Russian.
4. Betelin VB, Es'kov VM, Galkin VA, Gavrilenko TV. Stokhasticheskaya neustoychivost' v dinamike povedeniya slozhnykh gomeostaticheskikh system [Stochastic instability in the dynamics of behavior of complex homeostatic systems]. Doklady akademii nauk. 2017;472(6):642-4. Russian.
5. Vokhmina YV, Es'kov VM, Gavrilenko TV, Filatova OE. Izmerenie parametrov poryadka na osnove neyrosetevykh tekhnologiy [Measurement of order parameters based on neural network technologies]. Izmeritel'naya tekhnika. 2015;4:65-8. Russian.
6. Gavrilenko TV, Maystrenko EV, Gorbunov DV, Chernikov NA, Berestin DK. Vliyanie staticheskoy nagruzki myshts na parametry entropii elektromiogramm [Influence of static load of muscles on parameters of entropy of electromyograms]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2015;22(4):7-12. Russian.
7. Dudin NS, Rusak SN, Khadartsev AA, Khadartseva KA. novye podkhody v teorii ustoychivosti biosistem-al'ternativa teorii Lyapunova AM [New approaches in the theory of stability of biosystems-alternative to the theory of Lyapunov AM]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2011;18(3):336. Russian.
8. Es'kov VV, Filatov MA, Filatova DY, Zhuravleva OA. Complexity i emerdzhentnost' v predstavleniyakh i.r. prigozhina i tret'ey paradigme [Complexes and emergence in the representations of. Prigozhina and the third paradigm]. Slozhnost'. Razum. Postneklassika. 2016;3:59-67. Russian.
9. Es'kov VV, Filatov MA, Filatova DY, Prasolova AA. Granitsy determinizma i stokhastiki v izuchenii biosistem – complexity [Boundaries of determinism and stochastics in the study of biosystems - complexites]. Slozhnost'. Razum. Postneklassika. 2016;1:83-91. Russian.
10. Es'kov VM, Filatova OE, Provorova OV, Khimikova OI. Neyroemulyatory pri identifikatsii parametrov poryadka v ekologii cheloveka [Neuromuscents in the identification of order parameters in human ecology]. Ekologiya cheloveka. 2015;5:57-64. Russian.

11. Es'kov VM, Zinchenko YP, Filatova OE. K probleme samoorganizatsii v biologii i psikhologii [To the problem of self-organization in biology and psychology]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2016;23(3):174-81. Russian.

12. Es'kov VM, Zinchenko YP, Filatova OE. Razvitiye psikhologii i psikhofiziologii v aspekte tret'ey paradigmy estestvoznaniya [The development of psychology and psychophysiology in the aspect of the third paradigm of natural science]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2016;23(3):187-94. Russian.

13. Es'kov VM, Zinchenko YP, Filatova OE, Veraksa AN. Biofizicheskie problemy v organizatsii dvizheniy s pozitsiy teorii khaosa – samoorganizatsii [Biophysical problems in the organization of movements from the perspective of chaos theory - self-organization]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2016;23(2):182-8. Russian.

14. Es'kov VM, Zinchenko YP, Filatova OE, Veraksa AN. Biofizicheskie problemy v organizatsii dvizheniy s pozitsiy teorii khaosa-samoorganizatsii [Biophysical problems in the organization of movements from the perspective of the theory of chaos-self-organization]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2016;23(2):182-8. Russian.

15. Es'kov VM, Khadartsev AA, Filatova OE, Khadartseva KA, Litovchenko OG. Problema otsenki effektivnosti lecheniya na osnove kinematicheskoy kharakteristiki vektora sostoyaniya organizma [The problem of assessing the effectiveness of treatment based on the kinematic characteristics of the body state vector]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2015;22(1):143-52. Russian.

16. Es'kov VM, Es'kov VV, Gavrilenko TV, Voxmina YV. Formalizatsiya effekta «povtorenie bez povtoreniya» Bernshteyna NA [Formalization of the "repetition without repetition" effect of Bernstein NA]. Biofizika. 2017;62(1):168-76. Russian.

17. Zilov VG, Es'kov VM, Khadartsev AA, Es'kov VV. Eksperimental'noe podtverzhenie effekta «Povtorenie bez povtoreniya» Bernshteyna NA [Experimental confirmation of the effect of "Repetition without repetition" of Bernstein NA]. Byulleten' eksperimental'noy biologii i meditsiny. 2017;1:4-9. Russian.

18. Zinchenko YP, Filatova OE, Es'kov VV, Strel'tsova TV. Ob"ektivnaya otsenka soznatel'nogo i bes-soznatel'nogo v organizatsii dvizheniy [About a conscious assessment of the conscious and unconscious in the organization of movements]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2016;23(3):31-8. Russian.

19. Rusak SN, Kozupitsa GS, Filatova OE, Es'kov VV, Shevchenko NG. Dinamika statusa vegetativnoy nervnoy sistemy u uchashchikhsya mladshikh klassov v pogodnykh usloviyakh g. Surguta [Dynamics of the vegetative nervous system status in primary school children in weather conditions in Surgut]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2013;20(4):92-5. Russian.

20. Filatova OE, Es'kov VV, Vokhmina YV, Zimin MI. Printsip otnositel'nosti pokoya i dvizheniya gomeostaticeskikh sistem ili yavlyaetsya li biomekhanika razdelom fizicheskoy mekhaniki i termodinamiki? [The principle of the relativity of rest and the motion of homeostatic systems or whether the biomechanics is a division of physical mechanics and thermodynamics] Slozhnost'. Razum. Postneklassika. 2015;3:66-76. Russian.

21. Filatova OE, Zinchenko YP, Es'kov VV, Strel'tsova TV. Soznatel'noe i bessoznatel'noe v organizatsii dvizheniy [Conscious and unconscious in the organization of movements]. Slozhnost'. Razum. Postneklassika. 2016;3:23-30. Russian.

22. Khadartsev AA, Es'kov VM, Kozyrev KM, Gontarev SN. Mediko-biologicheskaya teoriya i praktika [Medico-biological theory and practice]. Tula; 2011. Russian.

23. Es'kov VM, Filatova OE. A compartmental approach in modeling a neuronal network. role of inhibitory and excitatory processes. Biofizika. 1999;44(3):518-25.

Библиографическая ссылка:

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. №1. Публикация 1-9. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2017-1/1-9.pdf> (дата обращения: 22.03.2017). DOI: 12737/25235.