

ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ НЕРВНО-МЫШЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И ПРОБЛЕМА ЭВОЛЮЦИИ COMPLEXITY

© 2017 г. В.В. Еськов, О.Е. Филатова, Т.В. Гавриленко, Д.В. Горбунов

*Сургутский государственный университет,
626415, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Сургут, просп. Ленина, 1*

E-mail: valery.eskov@gmail.com

Поступила в редакцию 21.06.17 г.

После доработки 07.09.17 г.

Скорость эволюции $v(t)$ разных биосистем различна, но если рассматривать динамику вектора состояния биосистемы $x = x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ в m -мерном фазовом пространстве состояний, то возможно построение некоторой общей теории. Для оценки таких процессов мы предлагаем математический аппарат, который описывает процессы с позиции особого хаоса статистических функций распределения $f(x)$. Для сложных многокомпонентных систем, у которых размерность m фазового пространства состояний велика ($m \gg 1$), предлагается расчет матриц парных сравнений выборок $x(t)$ при неизменном гомеостазе и расчет параметров квазиаттракторов. Термодинамический подход И.Р. Пригожина и П. Гленсдорфа в оценке эволюции оказался неэффективным для систем третьего типа. При этом на уровне молекулярных систем он выполняется – работает известная теорема И.Р. Пригожина. Показано, что при изменении состояния нервно-мышечной системы человека статистические функции регистрируемых выборок тремора хаотически изменяются, а параметры квазиаттракторов демонстрируют определенную закономерность.

Ключевые слова: гомеостаз, тремор, хаос, эффект Еськова–Зинченко.

Основоположник термодинамики неравновесных систем И.Р. Пригожин [1] предлагал описывать реальные биосистемы – complexity в рамках понятий: энтропия S , скорость изменения энтропии $P = dS/dt$, 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 (S) в виде $P = dS/dt$ [1]. Для нелинейных процессов и особых систем третьего типа (СТТ), которые сейчас обозначают как complexity, такое неравенство может и не выполняться [2–7], и тогда общий критерий эволюции термодинамических систем Пригожина–Гленсдорфа (в виде $d_x P/dt \leq 0$) может тоже не выполняться. Возникает принципиальная задача оценки эволюции (скорости эволюции и ее направления) для нелинейных биосистем, которые мы сейчас определяем как системы третьего типа [6–8] с особой статистической неустойчи-

востью [7–12] в рамках формализации W. Weaver [13].

Имеются публикации [1,9] в которых показывается, что вторая вариация энтропии H находится в тесной связи с информацией, которая получается при переходе из состояния с вероятностью P_i в состояние с вероятностью $P_i^!$ ($K(P_i, P_i^!) = \sum P_i \ln(P_i/P_i^!)$). Тогда предлагается использовать эту функцию K в качестве функции Ляпунова. Возникает критерий устойчивости в виде $dK/dt \leq 0$. Однако критерий устойчивости Ляпунова остается базовым в теории устойчивости сложных, неравновесных систем, особенно это касается систем с аналитической возможностью описания их динамики. Для СТТ практически сейчас нет таких моделей в рамках детерминистской и стохастической науки, 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 [8–12]. Эта оценка, как мы сейчас доказываем в новой теории хаоса-самоорганизации [2–8,10–12], от-

Сокращения: СТТ – системы третьего типа (по W. Weaver), НМС – нервно-мышечная система, ТМГ – треморограмма, ТПГ – теппинграмма.

личается от теории устойчивости Ляпунова и Пуанкаре.

Однако остаются дискуссионными вопросы определения для СТТ обобщенных сил и потоков, которые так эффективно используются в теории неравновесных систем и в термодинамике живых систем, в частности, на молекулярном уровне. Для многокомпонентных систем определение обобщенных сил и потоков весьма затруднительно, поэтому в данной статье мы использовали только одну переменную $x_1 = x_1(t)$ – координату конечности испытуемого, которую можно рассчитать для стационарных (гомеостатических) состояний СТТ-complexity, но выполнить статистические расчеты весьма сложно с позиции детерминистской и стохастической науки. Аналитический вариант решения задач такого уровня – это прямой расчет энтропии Шеннона H и ее анализ в оценке стационарных состояний сложных биосистем (complexity). Одновременно возникает и проблема индикации ухода СТТ [13] от этих стационарных состояний (можно ли по энтропии H оценить эволюцию СТТ?). Она осложняется тем, что (как мы показали ранее и не только для нервно-мышечной системы (НМС), но и для сердечно-сосудистой системы [2–8,14–19]) с позиций стохастики для СТТ нет понятия стационарности (все статистические функции $f(x)$ любых координат x_i всего вектора состояния системы $x = x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ получаемых подряд выборок хаотически изменяются в гомеостазе) [2–8,14–21]. В психофизиологии это получило наименование эффекта Еськова–Зинченко [2–7,10–12], который дает количественное описание гипотезы Н.А. Берштейна в биомеханике [22], но это применимо и для физиологии в целом («повторение без повторений») [2–8,23–25].

Сравнение теории И.Р. Пригожина и реальных процессов эволюционной динамики $x(t)$ для СТТ возможно на основе методов, использующих расчеты матриц парного сравнения выборок x_i и квазиаттракторов [2–8,14–19]. При этом особая проблема возникает с самим понятием – стационарный режим СТТ [2–9]. В рамках этих новых подходов [10–12,14–21] мы пошли путем сравнения значений выборок x_i на основе оценки энтропии H для биосистем – complexity в различных режимах их функционирования. Ожидалось, что в стационарных режимах СТТ энтропия H не будет изменяться, а при эволюции H должна изменяться. Напомним, что сам термин СТТ был введен W. Weaver еще в 1948 г. [13], но за прошедшие почти 70 лет практически никто не пытался изучить эти СТТ с позиции гипотезы Н.А. Берштейна

о «повторении без повторений» [22], что уже неоднократно подчеркивалось нами [4–8,12,17–20,24,25]. Поэтому главная цель настоящего сообщения сводится к доказательству отсутствия детерминистской устойчивости (в виде $dx/dt = 0$) и стохастической устойчивости (в виде неизменности статистических функций $f(x_i)$ для подряд получаемых выборок треморограмм) и неизменности энтропии Шеннона для гомеостатических систем при переходе из одного гомеостаза (h_1) в другой (h_2) при $h_1 \neq h_2$ (предполагалось, что при изменении стационарных состояний (гомеостазов) совершается дополнительная работа и энтропия должна изменяться).

СТОХАСТИЧЕСКИЙ И ХАОТИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ ТРЕМОРОГРАММ

В наших исследованиях параметров нервно-мышечной системы (более 10000 выборок треморограмм и теппинграмм) при дискретизации треморограмм (ТМГ) или теппинграмм (ТПГ) мы получали выборки $x_1 = x_1(t)$, которые представляли положение конечности (пальца) в пространстве по отношению к датчику регистрации координаты x_1 (x_1 – положение пальца по вертикали в пространстве) в виде выборок треморограмм $x_1(t)$. Далее $x_1(t)$ дифференцировали и получали вектор $x(t) = (x_1, x_2)^T$. Установка для регистрации x_1 включала в себя токовихревой датчик, усилители сигнала, аналого-цифровой преобразователь и ЭВМ, которая кодировала и сохраняла информацию (ее описание мы представляли ранее [7,10–12,15]).

Для получаемых подряд выборок ТМГ (или ТПГ) были рассчитаны матрицы парного сравнения (обычно для 15 серий исследований по 15 выборок в каждой серии). Типичный пример одной из таких матриц парного сравнения выборок треморограмм одного и того же испытуемого (число повторов $N = 15$), полученной с помощью непараметрического критерия Вилкоксона, представлен в табл. 1. Здесь число совпадений выборок ТМГ $k = 3$, т.е. из всех возможных пар сравнения (всего 105 пар) только три пары можно отнести к трем (разным) генеральным совокупностям, остальные 102 пары – разные. Очевидно, что возможность «совпадения» выборок очень невелика, практически все выборки разные, и это является особенностью СТТ-complexity. Для тремора всегда число k совпадений выборок очень невелико ($k \leq 5$) [2,7,11,12,15].

Более того, при проведении повторных исследований 15 раз по 15 выборок число совпадений k незначительно изменяется и всегда из всевозможных 105 пар имеем 3–7% совпа-

Таблица 1. Матрица парного сравнения выборок треморограмм испытуемого ГДВ

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,96	0,00	0,00
2	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,02	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
13	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Примечание. Число повторов $N = 15$, использовался критерий Вилкоксона p (для критерия $p > 0,05$ имеем число совпадений $k = 3$).

дений (и не более) для ТМГ и 10–17% совпадает для ТПГ. Все это доказывает низкую эффективность стохастического подхода в оценке СТТ, именно по этой причине мы ввели понятие квазиаттрактора [2,5–8,11,12,14–18]. Расчет параметров квазиаттрактора показывает устойчивость ТМГ и ТПГ (а также других параметров гомеостаза, например кардиоинтервалов) на фоне хаоса стохастических функций распределения $f(x)$ [14,17–20]. Для доказательства этого утверждения продемонстрируем два набора выборок ТМГ и их площади (S) квазиаттракторов в двух разных состояниях (без нагрузки, $F_1 = 0$, и с нагрузкой в три ньютона, $F_2 = 3 \text{ N}$) у одного и того же человека, находящегося (см. табл. 2) в двух разных состояниях гомеостаза (с F_1 и F_2). Из табл. 2 легко видеть, что площади S_1 (без нагрузки) квазиаттрактора 1 и площади S_2 для квазиаттрактора 2 (с нагрузкой F_2) существенно различаются.

Так, например, для полученных 225 выборок тремора от одного испытуемого (находящегося в неизменном гомеостазе h_1) без нагрузки (S_1) и с нагрузкой в гомеостазе h_2 $F = 3 \text{ N}$ (S_2) были рассчитаны средние значения параметров квазиаттракторов (площади $\langle S \rangle$ для вектора $x(t) = (x_1, x_2)^T$, где x_1 – координата конечности (пальца), а $x_2 = dx_1/dt$). Оказалось, что при изменении гомеостаза ($h_1 \neq h_2$) площади квазиаттрактора тоже изменяются. При анализе данных каждого конкретного примера результаты исследования были разбиты на 15 серий

испытаний по 15 выборок в каждой серии. Расчеты показали, что средние значения площади $\langle S \rangle$ для квазиаттрактора в каждой серии изменяются от $1,33 \cdot 10^{-6}$ усл. ед. до $2,86 \cdot 10^{-6}$ усл. ед. Табл. 2 для двух серий (по 15 повторов) фактически демонстрирует изменение параметров квазиаттракторов из-за изменений в системе регуляции тремора при переходе от $F_1 = 0$ к $F_2 = 3 \text{ N}$ у одного и того же испытуемого (средняя площадь $\langle S_2 \rangle = 5,86 \cdot 10^{-6}$ усл. ед. при $F_2 = 3 \text{ N}$ резко возрастает по сравнению с исходной – $\langle S_1 \rangle = 2,25 \cdot 10^{-6}$ усл. ед. при $F_1 = 0$).

Таким образом, при переходе из первого состояния гомеостаза h_1 во второе состояние h_2 мы имеем более чем двукратное возрастание площади $\langle S \rangle$ квазиаттрактора для ТМГ. Такие изменения являются существенными (будем условно их называть эволюционными [5–7,33,34], они характеризуют $h_1 \neq h_2$, что с позиции стохастики трудно установить (там все выборки хаотически изменяются, см. табл. 1). Именно такая особая и без всяких изменений в системе регуляции НМС (отдельно при $F_1 = 0$ или при $F_2 = 3 \text{ N}$) динамика СТТ характеризует их как complexity (стохастика и динамический хаос не могут описывать СТТ-complexity). Для описания таких гомеостатических систем (complexity) мы предлагаем рассчитывать параметры квазиаттракторов [2–8,14–21,23–25]. Использовать стохастику и динамический хаос для СТТ-complexity не имеет смысла из-за статистической неустойчивости выборок ($f_j(x_i) \neq f_{j=1}(x_i)$).

Таблица 2. Результаты статистической обработки полученных подряд величин S (площадей квазиаттрактора) для тремора одного и того же человека в неизменном гомеостазе

	$S_1 \times 10^{-6}$ усл. ед., без нагрузки	$S_2 \times 10^{-6}$ усл. ед., с нагрузкой $F_2 = 3$ N
1	2,78	9,47
2	3,84	4,82
3	1,03	8,24
4	0,58	6,79
5	1,12	5,17
6	2,22	6,59
7	0,94	2,15
8	2,34	8,54
9	1,88	5,34
10	2,25	6,70
11	2,36	7,74
12	1,93	5,50
13	2,60	3,68
14	5,12	4,36
15	2,80	2,89
$\langle H \rangle$	2,25	5,86

Примечание. Число повторов $N = 15$, при сравнении двух выборок использован критерий Вилкоксона ($p = 0,01$).

ЭНТРОПИЙНЫЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ ТРЕМОРОГРАММ

Во всех выполненных исследованиях с регистрацией ТМГ мы использовали метод расчета значения энтропии Шеннона H . Энтропия Шеннона H (или информационная энтропия) определяется логарифмом числа доступных состояний системы (основание логарифма может быть различным), она связана с энтропией Гиббса и энтропией Больцмана. Фактически это мера упорядоченности выборок x_i – компонент вектора состояния системы $x(t)$ в фазовом пространстве состояний. Формальное определение энтропии H для независимых случайных событий x с n возможными состояниями (от 1 до n , p – функция вероятности) рассчитывается по формуле

$$H = \sum_{i=1}^n p(i) \log_2 p(i),$$

где p_i – вероятности i -го состояния. Мы проводили сравнение значений H при различных функциональных состояний испытуемых [5–8, 10–12, 14–18].

Таблица 3. Результаты статистической обработки динамики поведения энтропии Шеннона H для треморограмм одного и того же человека

	H_1 , без нагрузки	H_2 , с нагрузкой $F = 3$ N
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
$\langle H \rangle$	3,143	3,157

Примечание. Число повторов $N = 15$, использован критерий Вилкоксона, уровень значимости $p = 0,72$.

Эта процедура нами сейчас выполнялась 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 фазовом пространстве состояний. Само это движение мы оценивали в рамках расчета энтропии H и параметров квазиаттракторов (см. выше табл. 2 как пример для эволюции гомеостаза по параметрам квазиаттракторов в фазовом пространстве состояний). Значения энтропии Шеннона H рассчитывали для всех 225 выборок треморограмм у каждого испытуемого отдельно для гомеостаза h_1 и отдельно для h_2 . В табл. 3 представлены значения для 30 выборок треморограмм как типовой пример (h_1 – без нагрузки на конечность (палец) и h_2 – с грузом $F_2 = 3$ N). При этом площади квазиаттракторов для ТМГ существенно изменялись (см. табл. 2), что и сравнивается с табл. 3 для H . Эти изменения $\langle S_1 \rangle = 2,25 \cdot 10^{-6}$ усл. ед. и $\langle S_2 \rangle = 5,86 \cdot 10^{-6}$ усл. ед. можно рассматривать как эволюционные, так как имеет место кратное изменение S ($\langle S_2 \rangle = 2,6 \langle S_1 \rangle$), что представлено в табл. 2 [5,6]. Однако при реальной эволюции НМС (переходе от h_1 к h_2) параметры энтропии не изменяются (при этом в гомеостазе h_2 затрачивается более существенная энергия, чем в гомеостазе h_1 и биосистема точно пере-

ходит в другой гомеостаз h_2 , с нагрузкой на конечность $F_2 = 3 \text{ N}$).

Для полученных 225 выборок ТМГ и расчета для каждой выборки энтропии Шеннона H (в этом же примере) строились матрицы парного сравнения энтропий H от одного и того же испытуемого. Результат такого парного сравнения 15-ти выборок H (в виде матрицы, похожей на табл. 1, но для H) показал, что для H число совпадений $k = 102$. Такое же число совпадений получается и для детерминированного хаоса на примере выборок, полученных на хаотическом генераторе чисел, т.е. в режиме равномерного распределения (при числе повторов в каждой выборке $n = 15$). Такие выборки всегда демонстрируют 97–99% совпадений и имеют равномерное распределение [11,12,15,16]. Подчеркнем, что в аттракторе Лоренца мы также имеем эффект перемешивания, но динамический хаос не имеет никакого отношения к эффекту Еськова–Зинченко, когда хаотически изменяется статистическая функция $f(x)$. Это означает ошибочность утверждений Н. Накен [26,27] о возможности использования энтропии H и динамического хаоса Лоренца в описании СТТ, вместе с утверждениями I.R. Prigogine [1] и J.A. Wheeler [28] об описании живых систем в рамках динамического хаоса (для СТТ мы имеем хаос статистических функций распределения, точнее, стохастическую неустойчивость подряд получаемых выборок у одного испытуемого в неизменном гомеостазе).

Результаты статистической проверки на нормальность распределения треморограмм испытуемых по критерию Шапиро–Уилка демонстрируют непараметрический тип распределения. Поэтому для выявления различий показателей треморограмм испытуемых нами использовались методы непараметрической статистики. Однако энтропия Шеннона H не дает столь существенных различий при повторях измерений x_i подряд от одного испытуемого, находящегося в двух разных гомеостазах ($h_1 \neq h_2$). Это характерно именно для живых систем, которые особым образом были представлены в обзорах Г.Р. Иваницкого [35–37]. Подчеркнем, что в «пессимистической» оценке [37] Иваницкий отмечает опасную тенденцию «...когда виртуальный мир вытесняет реальный мир» (информационный психоз). Разработка теории хаоса-самоорганизации (мы в этом убеждены) должна приблизить реальные биосистемы (СТТ-complexity) к их объективному описанию, что выходит за рамки стохастики и динамического хаоса, которые являются (как мы сейчас доказываем) скорее виртуальными моделями гомеостатических систем.

При оценке двух функциональных состояний (например, тремор до холодового воздействия и после [12,15] или в нашем примере с нагрузкой $F_2 = 3 \text{ N}$) целесообразно использовать расчет квазиаттракторов или в крайнем случае матриц парных сравнений выборок ТМГ (табл. 1). Отметим, что математические методы моделирования неустойчивости выборок ТМГ сейчас можно получить только в рамках компартментно-кластерного подхода [20,21,23–25,29–32], в котором мы задаем хаотическое изменение самих параметров моделей [23,29–34]. Отметим, что все исследователи обычно вводят в правую часть моделей движений в виде дифференциальных уравнений малое слагаемое $\xi(t)$ (как имитатор хаотических возмущений). Но это ошибочный подход, так как необходимо хаотически изменять параметры самой модели, что эквивалентно непрерывной перестройке в нейросетях мозга. В любом случае энтропия H почти не изменяется при переходе из одного гомеостаза (h_1) в другой гомеостаз (h_2), но это два разных устойчивых (с позиций теории хаоса-самоорганизации) состояния системы, и в термодинамике неравновесных систем Пригожина энтропия должна изменяться (должно быть $H_1 \neq H_2$). Во всех наших исследованиях биосистемы-complexity показывают стационарность H , т.е. $H_1 = H_2$ для двух различных гомеостазов. Эта стационарность (по параметрам сохранения квазиаттракторов) относится только к гомеостатическим системам, поэтому мы в теории хаоса-самоорганизации говорим о новом подходе.

ВЫВОДЫ

Метод расчета матриц парных сравнений выборок треморограмм целесообразно использовать для оценки реакции системы регуляции тремора при различных гомеостазах h_1 и h_2 . Этот метод может выявить изменения в параметрах гомеостаза, когда стохастика (традиционная) показывает хаотический калейдоскоп $f(x)$, и это является маркером СТТ-complexity.

Сравнение традиционных методов обработки треморограмм и методов теории хаоса-самоорганизации показывает низкую эффективность моделей в рамках расчета энтропий H . ТМГ испытуемых, находящихся в разных физиологических состояниях (напряжениях мышц), весьма затруднительно оценивать с позиций стохастики, но изменение параметров квазиаттракторов можно рассматривать как эволюцию НМС (при изменении гомеостаза).

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что метод расчета энтропий

Шеннона H может быть использован в оценке адаптивных изменений в системе регуляции движений (например, ТМГ), но он обладает слабой чувствительностью и с позиций стохастики может быть вообще не чувствительным. В результате построения матриц парного сравнения для энтропии Шеннона установлено, что число совпадений пар выборок энтропии Шеннона в такой матрице такое же, как и для детерминированного хаоса, т.е. порядка 97–99% пар совпадений (что характерно для равномерного распределения).

Расчет квазиаттракторов для ТМГ, который использует двумерное фазовое пространство с координатами ТПГ x_1 и x_2 , и расчет матриц парных сравнений выборок ТМГ (расчет числа k пар «совпадений» выборок ТМГ) могут характеризовать интегральные значения параметров ТМГ при разных гомеостазах НМС. Аналог принципа Гейзенберга в биологии [2,5,6,16] является наиболее эффективным и значимым методом оценки состояния ТМГ испытуемых. Он эффективен, когда используются фазовые координаты $x_1 = x_1(t)$ (реальное положение конечности) и $x_2 = dx_1/dt$ (скорость изменения x_1 во времени). В этом двумерном (а в общем случае мы использовали и $x_3 = dx_2/dt$, т.е. трехмерное фазовое пространство состояний) фазовом пространстве состояний можно рассчитывать параметры квазиаттракторов (у нас площади S или объемы $V = \Delta x_1 \cdot \Delta x_2 \cdot \Delta x_3$, где Δx_i – вариационные размахи координаты x_i), которые являются моделями физиологического состояния НМС. Хаотическая динамика ТМГ не может описываться в рамках стохастики или современной теории хаоса, но модели ТМГ все-таки можно построить в рамках теории хаоса-самоорганизации (в виде квазиаттракторов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. R. Prigogine, *The End of Certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature* (Free Press, 1997).
2. V. B. Betelin, V. M. Eskov, V. A. Galkin, et al., *Doklady Mathematics* **95** (1), 92 (2017).
3. V. M. Eskov, *Modelling, Measurement and Control C* **48** (1–2), 47 (1995).
4. V. M. Eskov, *Emergence: Complexity and Organization* **16** (2), 107 (2014).
5. V. M. Eskov, V. V. Eskov, T. V. Gavrilenko, et al., *Moscow University Physics Bulletin* **70** (2), 140 (2015).
6. V. M. Eskov, V. V. Eskov, J. V. Vochmina, et al., *Moscow University Physics Bulletin* **71** (2), 143 (2016).
7. V. M. Eskov, V. V. Eskov, T. V. Gavrilenko, et al., *Biofizika* **62** (1), 143 (2017).
8. В. А. Галкин, О. Е. Филатова, О. А. Журавлева и др., *Сложность. Разум. Постнеклассика*, № 1, 74 (2017).
9. И. И. Горбань, *Журн. техн. физики* **84** (3), 22–30 (2014).
10. О. Е. Филатова, Ю. П. Зинченко, В. В. Еськов и др., *Сложность. Разум. Постнеклассика*, № 3, 23 (2016).
11. Ю. П. Зинченко, А. А. Хадарцев и О. Е. Филатова, *Сложность. Разум. Постнеклассика*, № 3, 6 (2016).
12. В. Г. Зилов, В. М. Еськов, А. А. Хадарцев и др., *Бюл. эксперим. биологии и медицины*, № 1, 4 (2017).
13. W. Weaver, *Amer. Scientist* (1948).
14. V. M. Eskov, A. A. Khadartsev, V. V. Eskov, et al., *Adv. Gerontol.* **6** (3), 191 (2016).
15. V. M. Eskov, A. E. Bazhenova, Y. V. Vochmina, et al., *Rus. J. Biomechanics* **21** (1), 14 (2017).
16. V. M. Eskov, V. V. Eskov, T. V. Gavrilenko, et al., *Moscow University Physics Bulletin* **69** (5), 406 (2014).
17. T. V. Gavrilenko, V. M. Es'kov, A. A. Khadartsev, et al., *Adv. Gerontol.* **27** (1), 30 (2014).
18. S. N. Rusak, V. V. Eskov, D. I. Molyagov, et al., *Human Ecology*, № 11, 19 (2013).
19. V. A. Karpin, O. E. Filatova, T. V. Soltys, et al., *Human Ecology*, № 7, 3 (2013).
20. V. M. Es'kov, S. V. Kulaev, Yu. M. Popov, et al., *Measurement Techniques* **49** (1), 59 (2006).
21. О. Е. Филатова, V. M. Eskov, Y. M. Popov, in *RNNS/IEEE Symp. on Neuroinformatics and Neurocomputers* (1995), p. 166.
22. Н. А. Бернштейн, *О построении движений* (Медгиз, М., 1947).
23. V. M. Es'kov, V. A. Papshev, and O. E. Filatova, *Measurement Techniques* **46** (3), 304 (2003).
24. V. M. Eskov, T. V. Gavrilenko, Y. V. Vokhmina, et al., *Measurement Techniques* **57** (6), 720 (2014).
25. Y. V. Vokhmina, V. M. Eskov, T. V. Gavrilenko, et al., *Measurement Techniques* **58** (4), 462 (2015).
26. H. Haken and J. Portugali, *Entropy* **18**, 197 (2016).
27. H. Haken and J. Portugali, *Entropy* **19**, 18 (2017).
28. J. A. Wheeler, in *Feynman and Computation: Exploring the Limits of Computers* (MA, Perseus Books, 1999).
29. V. M. Es'kov and O. E. Filatova, *Neurophysiology* **25** (6), 348 (1995).
30. V. M. Es'kov and O. E. Filatova, *Biofizika* **44** (3), 518 (1997).
31. V. M. Es'kov and O. E. Filatova, *Biofizika* **48** (3), 526 (2003).
32. V. M. Es'kov, V. A. Papshev, V. V. Es'kov, et al., *Measurement Techniques* **46** (1), 93 (2003).
33. V. M. Es'kov, V. V. Es'kov, Yu. V. Vochmina, et al., *Moscow University Physics Bulletin* **72** (3), 309 (2017).
34. В. М. Еськов, О. Е. Филатова, В. В. Еськов и Т. В. Гавриленко, *Биофизика* **62** (5), 984 (2017).
35. G. R. Ivanitskii, *Phys. Usp.* **53**, 327 (2010).
36. G. R. Ivanitskii, *Phys.Usp.* **55**, 1155 (2012).
37. G. R. Ivanitskii, *Phys.Usp.* **187**, 757 (2017).

Chaotic Dynamics of Neuromuscular System Parameters and the Problem of the Evolution of Complexity

V.V. Eskov, O.E. Filatova, T.V. Gavrilenko, and D.V. Gorbunov

Surgut State University, prosp. Lenina 1, Surgut, Khanty-Mansi Autonomous Okrug, 626415 Russia

The evolution rate of diverse biosystems $v(t)$ is different but when the dynamics of the biosystem state vector $x = x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ is considered in m -dimensional phase space of states, it is possible to form a general theory. For estimation of such processes we propose a mathematical approach which describes the processes from the standpoint of particular chaos of statistical distribution functions $f(x)$. For complex multicomponent systems with high number of dimensions m ($m \gg 1$) we propose to use pairwise comparison matrices of samples $x(t)$ in case of constant homeostasis and calculation of quasiattractors parameters. The Glensdorff and Prigogine thermodynamic approach to estimation of the evolution turns out to be ineffective in assessment of third-type systems. At the same time the known Prigogine theorem is applicable to molecular systems. It has been shown that alteration to the state of human neuromuscular system leads to chaotic changes of statistical functions $f(x)$ of recorded tremor samples while quasiattractor parameters demonstrate clear regularity.

Keywords: homeostasis, tremor, chaos, Eskov–Zinchenko effect