

Энтропия Шеннона в изучении стационарных режимов и эволюции complexity

В. М. Еськов^{1,a}, В. В. Еськов¹, Ю. В. Вохмина¹, Д. В. Горбунов¹, Л. К. Иляшенко²

¹ Сургутский государственный университет, Институт естественных и технических наук, кафедра биофизики и нейрокибернетики. Россия, 628415, ХМАО, Сургут, пр. Ленина, д. 1.

² ФГБОУ высшего образования «Тюменский индустриальный университет».

Филиал ТИУ в г. Сургуте, кафедра естественно-научных и гуманитарных дисциплин. Россия, 628404, ХМАО, Сургут, ул. Энтузиастов, д. 38.

E-mail: ^avalery.eskov@gmail.com

Статья поступила 13.04.2016, подписана в печать 19.09.2016.

Остаются дискуссионными вопросы определения сложных биосистем (complexity) как особых самоорганизующихся систем, систем третьего типа, которые впервые ввел W. Weaver в 1948 г. До настоящего времени мы не встречали работ, касающихся оценки энтропии для систем третьего типа. В настоящей работе по параметрам биопотенциалов мышц, регистрируемых методом поверхностной интерференционной электромиографии, выполнены расчеты энтропий Шеннона, автокорреляционных функций, статистических функций распределения для электромиограмм испытуемых, находящихся в разных физиологических состояниях (покой и напряжение мышц). Полученные результаты не позволяют статистически достоверно различать функциональные состояния мышц. В то же время данные, полученные при использовании методов расчета параметров квазиаттракторов электромиограмм и матриц парных сравнений выборок электромиограмм (расчет числа k пар «совпадений» выборок электромиограмм), позволяют дать интегральную характеристику и существенно различить состояния покоя и состояния различной функциональной активности. Необходимы модификации, внедрение новых методов в комплексе с новыми методами теории хаоса–самоорганизации. Парадигма стохастического подхода для биосистем — систем третьего типа — неприменима из-за непрерывного и хаотичного изменения параметров вектора $x(t)$ состояния организма или (наоборот, для энтропии) их неизменяемости.

Ключевые слова: энтропия, квазиаттрактор, система третьего типа, термодинамика неравновесных систем.

УДК: 613.1, 612.014. PACS: 87.10.–e, 87.18.–h, 87.18.Vf.

Введение

Создатели термодинамики неравновесных систем и ее 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 $P = dE/dt$. 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 $d_x P/dt \leq 0$) тоже может не выполняться. В этом случае возникает задача оценки эволюции (скорости эволюции и ее направления) для нелинейных биосистем, которые мы сейчас определяем как СТТ [1–6].

Поскольку Ф. Шлегль [5] 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 предлага-

ется использовать функцию K в качестве функции Ляпунова. Тогда критерий устойчивости Шлегля имеет вид $dK/dt \leq 0$. Критерий устойчивости Ляпунова остается базовым в теории устойчивости сложных неравновесных систем, особенно это касается систем с аналитической возможностью описания их динамики. Для СТТ сейчас практически нет таких моделей, и, поскольку СТТ невозможно относить к описываемым аналитически линейным и нелинейным (в традиционном смысле) системам, возникает проблема оценки устойчивости и эволюции в новой интерпретации именно для СТТ [7–11].

При этом остаются дискуссионными вопросы определения для СТТ обобщенных сил и потоков, которые эффективно используются в термодинамике живых систем, в частности на молекулярном уровне. Так как экспериментальное определение этих сил и потоков для сложных СТТ весьма затруднительно, то прямые термодинамические расчеты для СТТ-complexity выполнить весьма сложно. Остается единственный аналитический вариант решения задач такого уровня — прямой расчет энтропий E и их анализ в оценке стационарных состояний. Одновременно возникает и проблема индикации ухода СТТ от этих стационарных состояний. Она ослож-

няется тем, что, как мы показали ранее [8–13], с позиций стохастики для ССТ 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) [8–14]. В психофизиологии это получило наименование эффект Еськова–Зинченко, который дает количественное описание гипотезы Н. А. Бернштейна в биомеханике («повторение без повторений») [15].

Для количественного сравнения теории И. Р. Пригожина (термодинамика неравновесных систем) и реальных процессов динамики $x(t)$ для ССТ мы используем ряд новых методов, основанных на расчетах матриц парного сравнения выборок x_i и квазиаттракторов (КА). При этом особая проблема возникает с самим понятием — стационарный режим ССТ [2–8]. В рамках этих новых подходов [9–14, 16, 17] мы пошли путем сравнения значений энтропии для ССТ в различных режимах их функционирования. Ожидалось, что в стационарных режимах ССТ энтропия E не будет изменяться, а при эволюции E должна изменяться. Что следует понимать под стационарностью и эволюцией для сложных регуляторных биосистем, например функциональных систем организма человека (ФСО) в интерпретации П. К. Анохина? Можно ли регистрировать количественно изменение в состоянии психики (психических процессов) в психологии? Что считать неизменным состоянием ФСО или состояния психики человека? Какие критерии для этого нужны? Поскольку в психофизиологии можно судить о состоянии психики по параметрам ФСО, то эта задача может быть общей и для физиологии, и для психологии на основе оценки стационарных режимов или эволюции параметров ФСО в условиях различных воздействий на человека. Если мы имеем конкретные числовые значения параметра x_i , то мы можем регистрировать и изменение ФСО, и изменения психического состояния человека [1–3, 8, 16]. В целом сейчас возникла возможность перевести психофизиологию в разряд точных, моделируемых наук даже на фоне общей неопределенности в изменении психики человека, которая доказывается методами стохастики [9–14, 16–18].

1. Общие законы термодинамики неравновесных систем для живых систем

Главной особенностью ССТ является отсутствие стационарных состояний в традиционном (детерминистско-стохастическом) смысле [8–13, 16]. Как мы уже неоднократно сообщали [11, 13, 14, 16, 17], у ССТ с позиции функционального (детерминистского) анализа $dx/dt \neq 0$ постоянно и непрерывно. Это второй постулат (принцип) организации любой ФСО (и психического статуса человека), и он сразу исключает ССТ из области детерминизма [9–11]. Одновременно для сложных биосистем, находящихся в одном неизменном гомеостазе при регистрации

порядк любых параметров x_i их векторы состояния $x(t)$, их статистические функции распределения $f(x)$ непрерывно изменяются. От выборки к выборке, т.е. для каждого интервала времени δt_j для любого компонента x_i , их любые j -е выборки и их статистические функции $f_j(x_i)$ будут единичными и случайными. Это составляет математическую основу эффекта Еськова–Зинченко в биомеханике и психофизиологии движений. Остается открытым вопрос и о динамике энтропии E для ССТ при их нахождении в некоторых стационарных режимах (гомеостазе). Иными словами, мы ставим принципиальный вопрос: можно ли использовать энтропию и термодинамику неравновесных систем И. Р. Пригожина в целом в изучении ФСО и психофизиологического статуса человека?

Согласно фундаментальной теореме о производстве энтропий E в открытой системе и с не зависящими от времени краевыми условиями (теорема И. Р. Пригожина) для бесконечно малых вариаций производство P энтропии E у любой открытой системы при приближении к состоянию равновесия (когда $E \rightarrow \max$) должно удовлетворять условиям минимума ее скорости изменения:

$$P = dE_i/dt = \min. \quad (1)$$

Более того, при равновесии системы (тогда должно выполняться условие максимального значения энтропии E и минимального изменения скорости производства энтропии и вариаций P) должно выполняться условие в виде второго условия по простоту P :

$$dP = 0. \quad (2)$$

В гипотезе линейности всех исследуемых ниже процессов (почти всегда справедливой на малых интервалах времени δt) мы можем выполнить проверку требования (2) для процессов с изменением параметров тремора и теппинга, с кардиоинтервалами, с сокращением мышц (интерференционная электромиография (ЭМГ) при разных усилиях сокращения), с изменением параметров ЭЭГ у здоровых и больных (эпилепсия) людей, находящихся в условиях внешнего стимуляционного воздействия. Во всех этих случаях мы можем проверить динамику скорости изменения энтропии Шеннона E , которая по высказыванию целого ряда известных физиков (прямого доказательства этому нет для всех процессов), эквивалентна энтропии E Больцмана или термодинамической энтропии S с точностью до констант (по крайней мере, нет доказательств, отрицающих это высказывание) [11, 13]. В целом общее утверждение о равенстве (в пределах постоянных сомножителей) всех трех видов энтропий (Больцмана, Шеннона E и термодинамической S) остается скорее общепринятым утверждением, чем доказанной теоремой. Но для всех известных (и наблюдаемых) процессов оно пока еще выполняется и это утверждение считают верным.

Если эти условия (в виде (1) и (2)) не будут выполняться, то мы можем говорить о потере линейных свойств изучаемой СТТ или о нарушении независимости от времени краевых условий (что более реально для СТТ, учитывая их квазилинейные свойства на малых интервалах t), или вообще о выходе СТТ за пределы термодинамики неравновесных систем И.Р. Пригожина. Последнее сейчас для нас представляется наиболее возможным, как и утверждение о том, что теория хаоса-самоорганизации (ТХС) не входит в современную детерминистско-стохастическую науку [9–11]. Одновременно при этом мы сейчас постараемся проверить и условия эволюции в формулировке Пригожина, когда должно выполняться условие $dE \leq 0$ при отклонении от положения равновесия. Во многих опубликованных статьях и монографиях подчеркивается, что термодинамику неравновесных систем невозможно применять к нелинейным биосистемам, у которых трудно выделить (формализовать) понятие «силы» (термодинамической силы) X_S и термодинамического потока (скорости реакций) из-за большой гетерогенности и даже неопределенности самого понятия «силы». В этом случае возникает парадоксальная ситуация: мы можем регистрировать энтропию $E = E(t)$ при эволюции биосистем, но возникает трудности с регистрацией X_S (и потоков J_r). Обычно величину X_S мы можем оценивать по результатам управления динамикой параметров биосистем, подразумевая при этом, что общеизвестное линейное феноменологическое выражение

$$J_r = \sum_{S=1}^k L_{rs} X_S \quad (3)$$

будет справедливо для любых СТТ. Эти системы не описываются стандартными детерминистскими уравнениями для любых компонент $x_i(t)$ вектора состояния СТТ (в виде $x = x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$, где x_i — любой параметр биосистемы). Мы не можем сейчас оценивать равновесие в виде $dx/dt = 0$ (стационарное состояние) или $dx/dt > 0$ (положительная скорость изменения). Более того, само понятие стационарный режим или движение (эволюция) СТТ приобретают совершенно другой, отличный от детерминистской и стохастической науки смысл [6, 9–11]. Детерминистско-стохастический подход (ДСП) и термодинамика неравновесных систем Пригожина предлагают вполне определенные требования для скорости изменения компонент вектора состояния системы $x = x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ в виде $dx/dt = 0$, или сохранения $f(x)$ для выборок $x(t)$, или выполнения условий теории И.Р. Пригожина, когда вблизи стационарного состояния производство P энтропии минимальное ($dE/dt \rightarrow \min$), а ее значение, наоборот, максимальное ($E = \max$ при $P \rightarrow 0$). Однако для многих СТТ все эти условия не выполняются, что было показано в предыдущих наших различных исследованиях [1–3, 6–13, 16, 19].

Некоторые (наиболее типичные) примеры мы представим ниже для иллюстрации этого утверждения применительно к СТТ.

2. Границы стохастики в анализе треморограмм

Сейчас в рамках детерминистско-стохастической науки мы даже не можем говорить о стационарности СТТ для случаев, когда статистические функции распределения $f(x)$ изменяются при переходе от одной выборки (состояния СТТ) к другой (к другому состоянию СТТ). Мы не можем произвольно получить $f_j(x_i)$ для любой j -й выборки. Ситуация оказалась еще более сложной, так как во многих случаях для биосистем сохранение $f(x)$ не гарантируется даже у одного и того же человека при повторной (число повторов выборок $N = 15$) регистрации параметров ($N = 15$). Согласно расчетам матриц парного сравнения выборок треморограмм или теппинграмм (ТПГ) для 15 серий исследований, по 15 выборок в каждой серии (например, для тремора), возможность «совпадения» выборок очень невелика. Практически все выборки разные, но всегда для тремора число пар совпадений выборок k не превышает в среднем 5–6%, что и является особенностью систем третьего типа для треморограмм. Эти количественные результаты составляют основу эффекта Еськова–Зинченко в биомеханике и психологии [3, 4, 11].

Как типовой пример одной из таких матриц парного сравнения выборок треморограмм для одного и того же испытуемого (число серий повторов $N = 15$), полученную с помощью непараметрического критерия Вилкоксона, мы представляем в табл. 1. Здесь число совпадений $k = 4$ для выборок якобы одинаковых треморограмм, т.е. человек находится в одинаковом физиологическом состоянии (гомеостазе). Из всех возможных пар сравнения (всего разных 105 пар) только 3 пары можно отнести к одной генеральной совокупности, остальные 102 пары были разные. Более того, при многократных повторах проведения исследований (у нас это было 15 раз по 15 выборок треморограмм) число совпадений k незначительно изменяется и всегда из всевозможных 105 пар имеем 3–7% совпадений для тремора. Это фактическая цена стохастического подхода в оценке нервно-мышечной системы. Для треморограмм и электромиограмм (ЭМГ) все статистические функции $f(x)$ различны, и их использование в оценке тремора весьма проблемно (точнее невозможно!), что и является эффектом Еськова–Зинченко.

Анализ всех 15 серий экспериментов, в которых строились матрицы парных сравнений выборок для каждой серии (подобные табл. 1) для этого же испытуемого и для 12 других испытуемых, дает итоговый результат: все $k < 8$, среднее значение $k = 4.9$, что подобно и другим сериям. Иными словами, на фоне неустойчивости $f(x)$, их спектральных плотностей и автокорреляционных функций $A(t)$ матрицы

Таблица 1

Матрица парного сравнения выборок треморограмм испытуемого ГДВ (число повторов $N = 15$), использовался критерий Вилкоксона (уровень значимости $p < 0.05$, число совпадений $k = 4$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.0	0.0	0.0	0.26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.26	0.37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.81	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.81	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.37	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.37	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Таблица 2

Матрица парного сравнения выборок энтропий Шеннона E для квазиаттракторов треморограмм испытуемого ГДВ (число повторов $N = 15$), использовался критерий Вилкоксона (уровень значимости $p < 0.05$, число совпадений $k = 102$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.0	0.81	0.17	0.76	0.15	0.89	0.94	0.86	0.53	0.31	0.55	0.33	0.53	0.92	0.36
2	0.81	0.0	0.2	0.65	0.16	0.94	0.81	0.86	0.82	0.31	0.75	0.39	0.68	0.75	0.44
3	0.17	0.2	0.0	0.55	0.59	0.18	0.13	0.24	0.55	0.02	0.35	0.96	0.29	0.07	0.59
4	0.76	0.65	0.55	0.0	0.27	0.81	0.74	0.83	0.82	0.29	0.91	0.44	0.75	0.8	0.55
5	0.15	0.16	0.59	0.27	0.0	0.02	0.15	0.17	0.39	0.01	0.16	0.61	0.05	0.09	0.61
6	0.89	0.94	0.18	0.81	0.02	0.0	0.84	0.93	0.54	0.15	0.8	0.31	0.58	0.76	0.45
7	0.94	0.81	0.13	0.74	0.15	0.84	0.0	0.84	0.51	0.39	0.45	0.27	0.66	0.92	0.37
8	0.86	0.86	0.24	0.83	0.17	0.93	0.84	0.0	0.64	0.16	0.83	0.28	0.8	0.78	0.21
9	0.53	0.82	0.55	0.82	0.39	0.54	0.51	0.64	0.0	0.0	0.8	0.72	0.89	0.45	0.55
10	0.31	0.31	0.02	0.29	0.01	0.15	0.39	0.37	0.16	0.0	0.17	0.13	0.13	0.37	0.09
11	0.55	0.75	0.35	0.91	0.16	0.8	0.45	0.83	0.8	0.17	0.0	0.48	1.0	0.68	0.59
12	0.33	0.39	0.96	0.44	0.61	0.31	0.27	0.28	0.72	0.13	0.48	0.0	0.51	0.24	0.93
13	0.53	0.68	0.29	0.75	0.05	0.58	0.66	0.8	0.89	0.13	1.0	0.51	0.0	0.48	0.68
14	0.92	0.75	0.07	0.8	0.09	0.76	0.92	0.78	0.45	0.37	0.68	0.24	0.48	0.0	0.35
15	0.36	0.44	0.59	0.55	0.61	0.45	0.37	0.21	0.55	0.09	0.59	0.93	0.68	0.35	0.0

парных сравнений выборок для одного гомеостаза дают статистическую устойчивость k . Для разных выборок будем иметь статистическую устойчивость числа k пар совпадений выборок в матрицах парных сравнений треморограмм одного испытуемого.

3. Расчет значений энтропии Шеннона для параметров тремора в условиях нагрузки

Для анализа уровня хаотичности во временной развертке треморограмм была рассчитана энтропия

Шеннона для всех серий выборок треморограмм, которые мы представили выше. Как оказалось, энтропийный подход при анализе выборок треморограмм не демонстрирует различий по значениям энтропии E в отличие от статистики, где статистические функции $f(x)$, их автокорреляции $A(t)$ и амплитудно-частотные характеристики хаотически изменяются. Согласно этим результатам, выборки данных тремора в оценке их (треморограмм) энтропии Шеннона можно отнести к одной генеральной сово-

купности. В табл. 2 мы представляем матрицу парных сравнений выборок E для всех 15 серий. Здесь уровень значимости критерия Вилкоксона $p > 0.05$ при критическом уровне значимости $p < 0.05$, при этом число пар совпадений $k = 102$. Иными словами, все эти выборки (15 серий по 15 повторений) с позиции энтропии Шеннона E статистически не различаются (табл. 2). Подобные матрицы мы получаем при экспериментальном сравнении равномерных распределений (хаос — свойство перемешивания), когда матрицы парных сравнений таких выборок тоже показывали 97–99% совпадений. В табл. 2 имеем почти полное статистическое совпадение 15 выборок для E при 15 сериях экспериментов (по 15 треморограмм в каждой серии).

Для более углубленного изучения возможности применения расчета значений энтропии Шеннона было проведено исследование, в котором регистрировались показатели тремора без нагрузки и при статическом удержании груза (300 г), зафиксированном на пальце испытуемого. В результате настоящего исследования была выявлена некоторая закономерность в изменении числа совпадений при построении матриц парного сравнения треморограмм. Она проявлялась в некотором увеличении числа k при регистрации тремора с нагрузкой. Так же в рамках ТХС

были рассчитаны площади квазиаттракторов [10–12] выборок треморограмм и установлено закономерное увеличение значения площадей (табл. 3). Из этой таблицы видно, что выборка из 15 площадей квазиаттракторов S_1 для опыта с нагрузкой существенно отличается ($p = 0.00$) от выборки площадей S без груза ($\langle S_1 \rangle = 3.02$ усл. ед. против $\langle S_2 \rangle = 6.91$ усл. ед. с грузом).

Одновременно результат расчета энтропии Шеннона для этих же двух выборок треморограмм (с грузом и без него) никаких значительных изменений не продемонстрировал. Согласно результатам расчета энтропии Шеннона (табл. 4), удержание груза никак не повлияло на состояние организма человека (параметры тремора). Получается, что человек находился в якобы стационарном состоянии без груза и при удержании груза (уход из спокойного, стационарного состояния). В табл. 4 представлены результаты расчета энтропии Шеннона E , где критерий $p = 0.53$). Очевидно, что с позиции физиологии и психологии человек испытывает ощущения нагрузки, задача по удержанию пальца существенно усложнилась, но энтропия E этого не показывает (стационарный режим психики или ФСО продолжается). Вместе с тем с позиций ТХС произошли существенные изменения параметров квазиаттракторов (табл. 3), которые можно характеризовать как

Таблица 3

**Значения площадей S
для КА выборок треморограмм
от одного испытуемого ГДВ
(число повторов $N = 15$)
в спокойном состоянии и с грузом 300 г
(уровень значимости при парном
сравнении критерия Вилкоксона, $p = 0.00$)**

№	Площадь квазиаттрактора для тремора без груза	Площадь квазиаттрактора для тремора с грузом 300 г
	$S_1 \cdot 10^{-8}$, усл. ед.	$S_2 \cdot 10^{-8}$, усл. ед.
1	5.78	38.59
2	2.29	8.7
3	1.42	6.8
4	3.89	4.5
5	1.61	5.34
6	3.03	6.75
7	3.86	9.75
8	1.69	7.23
9	1.77	9.76
10	6.27	4.56
11	1.92	4.06
12	2.02	9.44
13	3.42	4.84
14	3.98	2.86
15	2.27	5.77
$\langle S \rangle$	3.02	6.81

Таблица 4

**Значения энтропии Шеннона E для выборок треморограмм от одного испытуемого ГДВ
(число повторов $N = 15$)
в спокойном состоянии и с грузом 300 г
(уровень значимости при парном
сравнении критерия Вилкоксона, $p = 0.53$)**

№	Площадь квазиаттрактора для тремора без груза	Площадь квазиаттрактора для тремора с грузом 300 г
	$S_1 \cdot 10^{-8}$, усл. ед.	$S_2 \cdot 10^{-8}$, усл. ед.
1	3.32	3.12
2	3.12	2.92
3	3.32	3.32
4	3.12	3.32
5	3.32	3.12
6	2.92	3.32
7	3.32	3.32
8	3.32	3.12
9	3.32	3.32
10	3.32	3.12
11	3.12	3.32
12	3.12	3.12
13	3.32	3.12
14	3.32	3.12
15	3.12	3.32
$\langle E \rangle$	3.23	3.20

эволюцию. Это доказывается тем, что $\langle S_2 \rangle$ превосходит $\langle S_1 \rangle$ более чем в 2 раза, т.е. по критериям эволюции [11, 14] мы имеем существенные перемены в состоянии СТТ (у нас речь идет о реакции психики и изменении параметров функциональных систем организма — ФСО).

Таким образом, мы не наблюдаем изменений E при переходе из одного стационарного состояния в другое (неустойчивое, так как данный груз мы удерживать не можем физически). Однако при этом мы наблюдаем двукратное увеличение объема квазиаттрактора, что в ТХС характеризуется эволюционным (существенным) изменением СТТ. Отметим, что в спокойном состоянии энтропия E и площади квазиаттракторов в виде S существенно не изменялись, т.е. такой покой был покоем и с позиции термодинамики неравновесных систем, и с позиции ТХС. Возмущение психофизиологического состояния испытуемого (воздействие нагрузки) приводит к уходу из этого (исходного) стационарного состояния психики (и ФСО тоже).

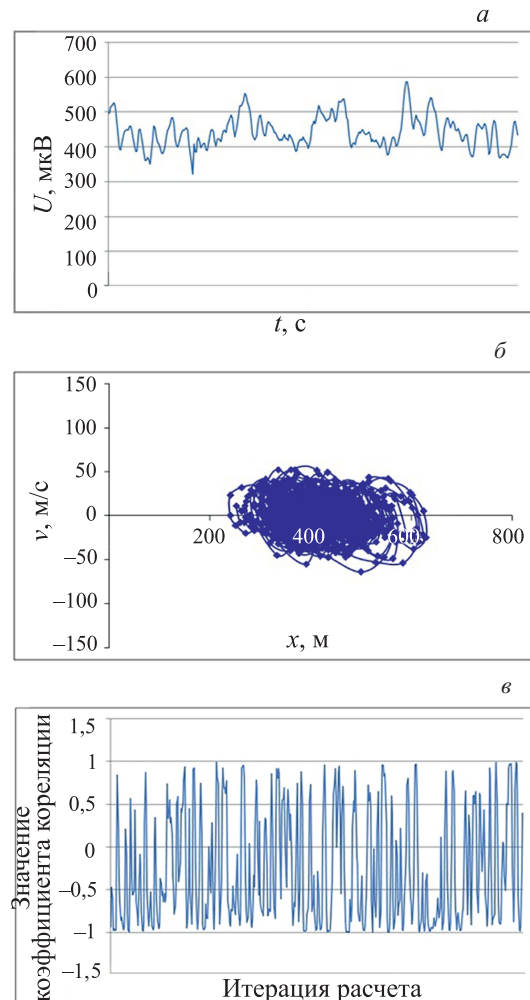
4. Расчет значений энтропии Шеннона для параметров электромиограмм при разной статической нагрузке

Для визуальной оценки данных, полученных от электромиографа, строилась временная развертка сигнала (рисунок, а), которая преобразовывалась в некоторые числовые ряды (выборки биопотенциалов мышц (БПМ)). При анализе полученных временных рядов по данным с электромиографии видно, что наблюдаемый сигнал БМП $x = x(t)$ уникален как функция времени для каждого испытуемого. При этом сохраняется некоторая закономерность, которая связана с площадью S квазиаттрактора в фазовом пространстве x_1 и x_2 (рисунок, б), где $x_1 = x(t)$ — величина БМП, $x_2 = dx_1/dt$ — скорость изменения БМП.

Каждый из векторов динамики электромиограммы (ЭМГ) в виде $x = x(t)$ по осям (x_1 и x_2) может находиться в фазовой плоскости, описывающей хаотическую динамику поведения двумерного вектора $x = (x_1, x_2)^T$, которая представлена на рисунке, б. Из рисунка видно, что ЭМГ имеет некоторое подобие с треморограммой и автокорреляционной функцией $A(t)$ (в смысле нет произвольных статистических повторов ни тремора, ни ЭМГ, ни их $A(t)$).

Поскольку для многих параметров гомеостаза функции распределения $f(x)$ не могут показывать устойчивость ($f(x)$ непрерывно и хаотически изменяются), то возникает вопрос о целесообразности использования функций распределения $f(x)$ для ЭМГ (для матриц, подобных табл. 1, когда для ЭМГ мы имеем $\langle k \rangle \approx 5$, как и для тремора). Наблюдается их непрерывное изменение при сравнении выборок ЭМГ, и любая ЭМГ имеет свой особый закон распределения и $f_j(x)$ для каждого интервала наблюдения δt_j . Были составлены матрицы парных сравнений выборок ЭМГ для всех 15 испытуемых

при двух силах (F_1 и F_2) сжатия динамометра ($F_2 = 2F_1$) и установлена закономерность изменения числа «совпадений» пар выборок k , получаемых параметров ЭМГ. Оказалось, что в первом случае (для F_1) матрица 15×15 (105 разных пар сравнений) при усилии $F_1 = 5$ даН показывает $k_1 = 5$ (табл. 5). При увеличении напряжения до $F_2 = 10$ даН наблюдается и увеличение числа совпадений до $k_2 = 20$. Вид такой матрицы для F_1 представлен в табл. 5. Аналогичные расчеты производились и для 15 выборок ЭМГ для других испытуемых. Например, получилось, что число пар совпадений $k_1 = 11$ при слабой статической нагрузке, а при двукратном увеличении прилагаемого усилия число пар увеличилось до $k_2 = 22$ у другого испытуемого. Это означает, что число совпадений k пар выборок ЭМГ может характеризовать особенность организма БМП для каждого человека. Однако разные испытуемые в парном сравнении все-таки дают сходную картину



Результат обработки данных, полученных при слабом напряжении мышцы ($F_1 = 5$ даН); испытуемый КАЕ как типичный пример всей группы: а — временная развертка сигнала; б — фазовые траектории электромиограммы (x — БМП, $v = dx/dt$ — скорость изменения БМП) с площадью квазиаттрактора $S_1 = 29\,824$ усл. ед.; в — автокорреляционная функция сигнала $A(t)$

Таблица 5

Матрица парного сравнения электромиограмм группы девушек (число повторов $N = 15$) при слабом напряжении мышцы ($F_1 = 5$ даН), использовался критерий Вилкоксона (значимость $p < 0.05$, число совпадений $k = 5$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.0	0.0	0.0	0.26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.26	0.37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.18	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.04	0.0
9	0.0	0.01	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.81	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.81	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.37	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.37	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

с одним испытуемым, что и показывает табл. 5 [4, 6, 22–24].

Сравнение площадей S для КА для группы из 15 девушек и 15 выборок от одной испытуемой представлены в табл. 6. Из таблицы видно, что в обоих случаях четко выражено различие в этих двух состояниях при слабом напряжении (F_1) и сильном напряжении мышцы (F_2). Здесь средние значения $\langle S \rangle$ площадей квазиаттракторов S приблизительно отличаются в 5 раз для одного испытуемого. Одновременно для группы девушек $\langle S_1^I \rangle = 32721$ усл. ед. и $\langle S_2^I \rangle = 129155$ усл. ед., т.е. $\langle S_2^I \rangle / \langle S_1^I \rangle \approx 4$. Сходную кратную динамику демонстрируют данные, полученные от одной испытуемой: $\langle S_1^I \rangle = 23992$ усл. ед. и $\langle S_2^I \rangle = 115333$ усл. ед. (табл. 6).

Одновременно в сравнительном варианте для анализа уровня хаотичности во временной развертке электромиограмм была рассчитана энтропия Шеннона. Оказалось, что энтропийный подход при анализе электромиограмм не демонстрирует различий. Согласно его результатам, выборки данных для группы девушек или для одной и той же девушки можно отнести к одной генеральной совокупности. Более того, согласно результатам расчетов парных сравнений 4 пар выборок энтропии E все пары статистически не различаются (все выборки относятся к одной генеральной совокупности), даже если сравнивать группы с выборками E одного человека с помощью термодинамического подхода [10, 12].

Внешний вид фазовых траекторий и площадей квазиаттракторов для F_1 и F_2 (на примере одного опыта) мы уже представили на рисунке. Здесь фазовые координаты x_1 — реальные значения биопотенциалов, а $x_2 = dx_1/dt = V$ — это скорость изменения

Таблица 6

Значение площадей квазиаттракторов S выборок миограмм группы из 15 девушек и одной и той же девушки при слабом ($F_1 = 5$ даН) и сильном ($F_2 = 10$ даН) напряжении мышцы

№	Группа девушек		Одна и та же девушка	
	$S_1^I, 5 \text{ даН}$	$S_2^I, 10 \text{ даН}$	$S_1^I, 5 \text{ даН}$	$S_2^I, 10 \text{ даН}$
1	26 794	106 222	26 508	107 260
2	29 824	203 886	24 300	114 935
3	42 051	101 192	35 802	139 755
4	77 848	149 919	27 459	111 734
5	15 420	102 954	32 208	119 712
6	23 095	123 024	18 792	101 084
7	42 824	105 701	29 848	152 609
8	39 128	298 496	24 336	191 360
9	16 435	72 625	16 968	100 000
10	17 770	81 557	16 968	68 904
11	41 832	189 280	21 242	116 864
12	18 028	162 909	15 200	101 403
13	28 586	61 712	18 984	104 682
14	26 342	93 635	20 304	113 634
15	45 124	84 224	30 965	86 064
$\langle S \rangle$	32 721	129 155	23 992	115 333
	Критерий Вилкоксона, значимость функций $f(x), p = 0.01$.		Т-критерий значимости функций $f(x), p = 0.00$.	

БПМ. В данном примере наблюдается трехкратное увеличение площади S_2 по отношению к S_1 . Расчет этих двух значений площадей квазиаттрактора в виде S_1 и S_2 мы производили для многих испыту-

мых, и везде картина одинакова: увеличение силы напряжения мышцы в 2 раза увеличивает площадь квазиаттрактора ЭМГ в 3–5 раз от исходного (при $F_1 = 5$ даН и при $F_2 = 10$ даН). Характерно, что для одного испытуемого (при 15 повторях) всегда критерий Вилкоксона $p < 0.05$ (за редким исключением).

Мы высказываем утверждение, что других способов количественного описания параметров изменения биопотенциалов мышц (ЭМГ) при увеличении силы напряжения мышцы (при $F_2 = 2F_1$) на сегодня в рамках детерминизма или стохастики нет. Сейчас можно говорить о том, что квазиаттракторы ЭМГ в ФПС являются определенными моделями состояния электрической активности мышц. В рамках стохастики (расчет амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), $A(t)$, $f(x)$ и др.) мы не можем получить модели, которые бы существенно различали эти два состояния мышцы (ЭМГ при F_1 и F_2). Очевидно, что для эффективной оценки хаоса в ЭМГ в рамках ТХС мы можем использовать фазовую плоскость при повторении опытов (получать выборки с повторением) и для них строить квазиаттракторы выборок ЭМГ. Однако полностью уходить от стохастики пока не следует. Необходимы модификации, внедрение новых методов в комплексе с методами ТХС [1–3, 6–14, 16, 17, 19].

Заключение

1. Многократные повторы измерений треморограмм (15 серий по 15 выборок в каждой серии) показывают статистическую устойчивость и параметров ФСО, и психофизиологического статуса испытуемого в спокойном состоянии. Изменение состояния ФСО (и психики, так как возникают другие ощущения) приводит к изменению параметров квазиаттракторов треморограмм. Площадь квазиаттракторов S увеличилась более чем в 2 раза. Эти изменения в рамках ТХС следует считать эволюционными (хотя они и действуют кратковременно, но такая ситуация могла бы быть постоянной при перемещении на другую планету, например где условие ускорения $g_2 > g_1 = 9.81$ м/с для Земли).

2. Энтропия E и в стационарном состоянии для треморограмм и при уходе из стационарного режима (покоя) в неустойчивое состояние не изменяется. Это ограничивает возможности применения термодинамики неравновесных систем И. Р. Пригожина в описании неравновесных биосистем (у нас это ФСО и психофизиологический статус человека). Эффективным критерием таких изменений является расчет площади квазиаттракторов в виде S .

3. Сравнение традиционных статистических методов обработки электромиограмм и методов ТХС показывает низкую эффективность подобных моделей. Использование расчетов энтропий E , расчета АЧХ, автокорреляционных функций $A(t)$, статистических функций распределения $f(x)$ для ЭМГ испытуемых, находящихся в разных физиологических

состояниях (напряжениях мышц), весьма затруднительно (с позиций стохастики). Парадигма стохастики для СТТ неприменима из-за непрерывного и хаотичного изменения или (наоборот, для E) неизменяемости.

4. Новые методы расчета ЭМГ на основе ТХС, которые используют двумерное фазовое пространство с координатами ЭМГ x_1 и x_2 , и метод расчета матриц парных сравнений выборок электромиограмм (расчет числа k пар «совпадений» выборок треморограмм и электромиограмм) реально может характеризовать интегральные значения параметров треморограмм, электромиограмм и многих других параметров ФСО [4–14] при разных состояниях мышц и ФСО в целом.

Список литературы

1. Eskov V.M., Eskov V.V., Braginskii M.Ya., Pashnin A.S. // Measurement Techniques. 2011. **54**, N 7. P. 832.
2. Eskov V.M., Eskov V.V., Filatova O.E. // Measurement Techniques. 2011. **53**, N 12. P. 1404; Phys. B. 1986. **271**. P. 188.
3. Eskov V.M., Gavrilenko T.V., Kozlova V.V., Filatov M.A. // Measurement Techniques. 2012. **55**, N 9. P. 1096. **33**.
4. Rusak S.N., Eskov V.V., Molyagov D.I., Filatova O.E. // Human Ecology. 2013. N 11. P. 19.
5. Schlegel F. // Z. Phys. 1971. **243**. P. 303.
6. Vokhmina Y.V., Eskov V.M., Gavrilenko T.V., Filatova O.E. // Measurement Techniques. 2015. **58**(4), A018. P. 65.
7. Eskov V.V., Filatova O.E., Gavrilenko T.V., Khimikova O.I. // Human Ecology. 2014. N 11. P. 3.
8. Eskov V.M., Gavrilenko T.V., Vokhmina Y.V. et al. // Measurement Techniques. 2014. **57**, N 6. P. 720.
9. Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Зимин М.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2014. № 5. С. 41. (Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V., Zimin M.I. // Moscow University Phys. Bull. 2014. **69**, N 5. P. 406.)
10. Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2015. № 2. С. 62. (Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V., Vokhmina J.V. // Moscow University Phys. Bull. 2015. **70**, N 2. P. 140.)
11. Еськов В.М., Еськов В.В., Вохмина Ю.В., Гавриленко Т.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2016. № 2. С. 3. (Eskov V.M., Eskov V.V., Vokhmina Y.V., Gavrilenko T.V. // Moscow University Phys. Bull. 2016. **71**, N 2. P. 143.)
12. Eskov V.M., Filatova O.E., Provorova O.V., Khimikova O.I. // Human Ecology. 2015. N 5. P. 57.
13. Eskov V.M., Eskov V.V., Filatova O.E. et al. // Uspechi gerontologii. 2015. **28**, N 3. P. 435.
14. Garaeva G.R., Eskov V.M., Eskov V.V. et al. // Human Ecology. 2015. N 9. P. 50.
15. Bernstein N. / London. 1967.
16. Filatova O.E., Provorova O.V., Volokhova M.A. // Human Ecology. 2014. N 6. P. 16.
17. Gavrilenko T.V., Eskov V.M., Khadartsev A.A., Sokolova A.A. // Uspechi gerontologii. 2014. **27**. N 1. P. 30.
18. Glansdorff P., Prigogine I. / Mir. 1973.

19. Es'kov V.M., Filatova O.E. // Biophysics. 1999. **44**, N 3. P. 518.
20. Eskov V.M., Filatova O.E. // Biophysics. 2003. **48**, N 3. P. 497.
21. Eskov V.M., Kulaev S.V., Popov Yu.M., Filatova O.E. // Measurement Techniques. 2006. **49**, N 1. P. 59.
22. Karpin V.A., Filatova O.E., Soltys T.V. et al. // Human Ecology. 2013. N 7. P. 3.
23. Batelin V.B., Eskov V.M., Galkin V.A., Gavrilenko T.V. // Doklady Mathematics. 2017. **95**, N 1. P. 92.
24. Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V., Vochmina Yu.V. // Doklady Mathematics. 2017. **95**, N 1. P. 92.

Shannon entropy in the research on stationary regimes and the evolution of complexity

V. M. Eskov^{1,a}, V. V. Eskov¹, Yu. V. Vochmina¹, D. V. Gorbunov¹, L. K. Ilyashenko²

¹ Department of Biophysics and Neurocybernetics, Institute of Natural and Technical Sciences, Surgut State University. Surgut 628415, Russia.

² Science and Humanitarian Department, Surgut Branch, Tyumen Industrial University. Surgut 628404, Russia.

E-mail: ^avalery.eskov@gmail.com.

The questions of the identification of complex biological systems (complexity) as special self-organizing systems or systems of the third type first defined by W. Weaver in 1948 continue to be of interest. No reports on the evaluation of entropy for systems of the third type were found among the publications currently available to the authors. The present study addresses the parameters of muscle biopotentials recorded using surface interference electromyography and presents the results of calculation of the Shannon entropy, autocorrelation functions, and statistical distribution functions for electromyograms of subjects in different physiological states (rest and tension of muscles). The results do not allow for statistically reliable discrimination between the functional states of muscles. However, the data obtained by calculating electromyogram quasiattractor parameters and matrices of paired comparisons of electromyogram samples (calculation of the number k of «coinciding» pairs among the electromyogram samples) provide an integral characteristic that allows the identification of substantial differences between the state of rest and the different states of functional activity. Modifications and implementation of new methods in combination with the novel methods of the theory of chaos and self-organization are obviously essential. The stochastic approach paradigm is not applicable to systems of the third type due to continuous and chaotic changes of the parameters of the state vector $x(t)$ of an organism or the contrasting constancy of these parameters (in the case of entropy).

Keywords: entropy, quasiattractor, third-type system, thermodynamics of non-equilibrium systems.

PACS: 87.10.-e, 87.18.-h, 87.18.Vf.

Received 13 April 2016.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2017. **72**, No. 3. Pp. 309–317.

Сведения об авторах

1. Еськов Валерий Матвеевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (3462) 76-30-88, e-mail: valery.eskov@gmail.com.
2. Еськов Валерий Валериевич — канд. мед. наук, доцент; тел.: (3462) 76-30-79, e-mail: z.asconcrete@gmail.com.
3. Вохмина Юлия Владимировна — аспирант; тел.: (3462) 76-30-90, e-mail: vachmina@mail.ru.
4. Горбунов Дмитрий Владимирович — аспирант, мл. науч. сотрудник; тел.: (3462) 76-30-90, e-mail: gorbunov.dv@mail.ru.
5. Иляшенко Любовь Кирьяловна — канд. пед. наук, доцент; тел.: (3462) 35-83-87, e-mail: end_fiz@mail.ru.