

УДК 611.73:616-073.97

ВОЗМОЖНОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДХОДА В ЭЛЕКТРОМИОГРАФИИ

В. В. Еськов

Сургутский государственный университет, firing.squad@mail.ru

С позиции новой теории хаоса-самоорганизации рассматривается проблема моделирования сложных биосистем как систем третьего типа по W. Weaver. Для таких систем регистрируется статистическая неустойчивость подряд получаемых выборок любых параметров гомеостаза x_i . Тогда и целесообразно использовать анализ принципа Гейзенберга и рассчитывать параметры квазиаттракторов. Для разных состояний гомеостаза площади квазиаттракторов различаются. Однако параметры энтропии Шеннона демонстрируют неизменность (при различных гомеостазах). Все это усиливает глобальную неопределенность сложных биосистем.

Ключевые слова: эффект Еськова – Зинченко, хаос, стохастика, электроэнцефалограммы.

POSSIBILITIES OF THERMODYNAMIC APPROACH IN ELECTROMYOGRAPHY

V. V. Eskov

Surgut State University, firing.squad@mail.ru

According to the new theory of chaos-self organization the problem of mathematical modeling of complex bio systems is considered as systems of the third type (W. Weaver classification). For such systems the statistical instability is registered, which can be obtained from any parameters of homeostasis x_i . Subsequently the use of the Heisenberg's uncertainty principle analysis for calculation of quasiattractor parameters is advisable. Parameters of quasiattractors differ for different states of homeostasis. However the Shannon entropy parameters demonstrate invariance (through different states of homeostasis). Overall, this fact intensifies the global uncertainty of complex bio-systems.

Keywords: Eskov – Zinchenko effect, chaos, stochasticity, electroencephalogram.

Введение. В начале XX века основоположник *термодинамики неравновесных систем* (ТНС) И. Р. Пригожин описал реальные биосистемы – *complexity* в рамках понятий: энтропия H ; скорость прироста энтропии $P = dH/dt$; устойчивость стационарных состояний и эволюция. Для многих систем (процессов) была доказана теорема (принцип) минимального производства энтропии ($dP/dt \leq 0$) вблизи положения равновесия. В этом случае для скорости изменения энтропии (H) в виде $P = dH/dt$ мы имеем минимум самой H и минимум P . Однако для нелинейных процессов и особых *систем третьего типа* (СТТ), которые еще в 1948 г. W. Weaver обозначил как *complexity*, такое неравенство может и не выполняться. В этом случае общий критерий эволюции термодинамических систем Пригожина – Гленсдорфа (в виде $d_x P/dt \leq 0$) может тоже не выполняться, и возникает задача оценки эволюции (скорости эволюции и ее направления) для нелинейных биосистем, которые мы сейчас определяем как СТТ [1–8]. Для этих СТТ характерна статистическая неустойчивость у подряд получаемых выборок параметров гомеостаза x_i для одного испытуемого, находящегося в неизменном (стационарном) гомеостазе [9–14].

Для таких СТТ не выполняется (для их вектора состояния $x = x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$) критерий устойчивости в виде $dx/dt = 0$ в любой момент времени t . Тогда возникают (в рамках новой теории хаоса-самоорганизации) другие критерии устойчивости в виде неизменности параметров *квазиаттракторов* (КА) [15]. Однако критерий устойчивости Ляпунова остается базовым в теории устойчивости сложных неравновесных систем, особенно это касается систем с аналитической возможностью описания их динамики. Но для СТТ – *complexity* теория Ляпунова не применяется из-за неповторимости траектории $x(t)$ [9–15]. Для СТТ нет моделей в виде уравнений (функциональный анализ), 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 [12–15]. Эта новая интерпретация устойчивости СТТ, их вектора состояния $x(t)$, разрабатывается сейчас в рамках новой *теории хаоса-самоорганизации* (ТХС) [9–15]. При этом остаются дискуссионными вопросы определения для СТТ обобщенных сил и потоков, которые так эффективно используются в ТНС и в термодинамике живых систем. Их определение экспериментально для сложных СТТ весьма затруднительно и тогда прямые термодинамические расчеты для СТТ-*complexity* выполнить невозможно.

Изменения параметров СТТ с позиции ТНС И. Р. Пригожина. Особенности систем третьего типа обусловлены отсутствием стационарных состояний ($dx/dt \neq 0, x_i \neq const$) в традиционном (детерминистко-стохастическом) смысле [1–12]. У СТТ $dx/dt \neq 0$ непрерывно и одновременно для сложных биосистем (*complexity*) их статистические функции распределения $f(x)$ непрерывно изменяются от выборки к выборке. У одного и того же испытуемого (в одном гомеостазе) для каждого интервала времени Δt_j для любого компонента x_i их $f_j(x_i)$ будет единичной и случайной. Тогда остается открытым вопрос и о динамике энтропии Шеннона H для СТТ, так как в ТНС для термодинамически равновесного состояния всегда H должна быть максимальной, а ее скорость производства ($P = dH/dt$), наоборот, минимизируется в стационарных состояниях.

Остается единственный аналитический вариант – прямой расчет энтропий H и их анализ при переходе биосистемы из одного гомеостаза G_1 в другой гомеостаз G_2 (при $G_1 \neq G_2$). Именно таким путем мы и пошли для количественного сравнения теории Пригожина (ТНС) и реальных процессов в СТТ на примере организации движений как у отдельного человека (при многократных повторениях измерений $x(t)$, так и у группы (из $n = 15$ разных испытуемых). При этом возникает вопрос, будет ли это наблюдаться для СТТ, и справедлива ли термодинамика И. Р. Пригожина для хаотических, самоорганизующихся СТТ? Если нет, то возникает вопрос о целесообразности использования H и функций распределения $f(x)$ для СТТ. Что тогда вообще использовать для оценки изменений (или неизменности) состояний СТТ во времени и пространстве? Как работать с СТТ, если стохастика и термодинамика к ним неприменимы?

По фундаментальной теореме о производстве энтропии H в открытой системе (и с независимыми от времени краевыми условиями – теореме Пригожина) для бесконечно малых вариаций производство P энтропии H должно удовлетворять условиям минимума ее скорости изменения:

$$P = dH_i/dt = \min \quad (1)$$

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

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

В гипотезе линейности всех исследуемых ниже процессов (это можно считать справедливым на малых интервалах времени t) мы можем выполнить проверку этого требования ($dP = 0$) для процессов с сокращением мышц (интерференционная электромиография при разных усилиях сокращения). Во всех этих случаях мы можем проверить динамику скорости изменения энтропии Шеннона H , которая эквивалентна энтропии S Больцмана или термоди-

намической энтропии S с точностью до констант. В целом, общее утверждение о равенстве (в пределах постоянных сомножителей) всех трех видов энтропий (Больцмана, Шеннона H и термодинамической S) остается скорее общепринятым утверждением, чем доказанной теоремой. Но для всех известных (и наблюдаемых) процессов оно выполняется, и это утверждение считают верным.

Для нелинейных систем (согласно теории Пригожина – ТНС) в стационарном состоянии производство H не обязательно должно быть минимальным. Более того, в теории Пригожина (ТНС) устойчивые стационарные состояния определяются как «текущее равновесие» и приводится характерный график для его описания (рис. 1).

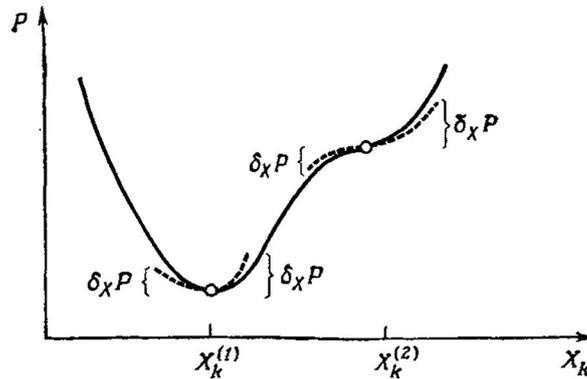


Рис. 1. Стационарные состояния нелинейной системы:
 $x_k^{(1)}$ – текущее равновесие; $x_k^{(2)}$ – неустойчивое стационарное состояние

Однако в реальных СТТ координата x_k^1 и x_k^2 могут хаотически изменяться без изменения самих термодинамических сил или внешних условий (ВУВов). Это обусловлено внутренними перестройками в системах регуляции функциональных систем организма (ФСО). В целом, это вообще является базовым свойством любой СТТ, так как все эти системы нестабильны не только по динамике, но и по характеру связей, их структуре, все это непрерывно изменяется. Вся структура связей в системе управления ФСО находится в непрерывном динамическом изменении. Подобная организация происходит в *нейроэмуляторах* (НЭВМ), если мы непрерывно изменяем начальные веса W_{io} признаков (например, произвольно их задаем из хаотического интервала $(0, 1)$) или подобная хаотическая динамика (в виде моделей тремора) получается при хаотическом задании параметров модели (например, b – коэффициент диссипации) в компартментных моделях тремора [15]. При хаосе параметра мы можем наблюдать калейдоскоп функций $f(x)$ [10–15].

Результаты исследования и их обсуждения. Для исследования была привлечена группа испытуемых (15 девушек) в возрасте от 20 до 25 лет. У испытуемых регистрировались электромиограммы с частотой дискретизации $\mu = 0,25$ мс. Записи биполярным электродом электромиограмм мышцы (отводящей мышцы мизинца – МДАМ) обрабатывались программным комплексом для формирования вектора $x = (x_1, x_2)^T$, где $x_1 = x(t)$ – абсолютное значение *биопотенциалов мышцы*, в виде электромиограмм (ЭМГ), на некотором интервале времени Δt , а x_2 – скорость изменения x_1 , т. е. $x_2 = dx_1 / dt$. На основе полученного вектора $x(t) = (x_1, x_2)^T$ строились КА динамики поведения вектора состояния системы $x(t)$ и определялись площади полученных квазиаттракторов S по формуле $S^{\max} \geq \Delta x_1 * \Delta x_2 \geq S^{\min}$ [1–6, 9–15], где Δx_1 – вариационный размах величины биопотенциала, а Δx_2 – вариационный размах для его скорости изменения $x_2(t)$. В конечном итоге анализ состояния биомеханической системы проводился на основе сравнения S КА, а также, на основе анализа значений энтропии Шен-

нона H , где H определяется по формуле $H(x) = -\sum_{i=1}^n p(i) \log_2 p(i)$, где p – функция вероятности.

Электромиограммы фиксировали при слабом статическом напряжении мышцы $F_1 = 5$ даН и при сильном напряжении $F_2 = 10$ даН.

Для визуализации данных, полученных с электромиографа, строилась временная развертка сигнала (рис. 2а), которая преобразовывалась в некоторые числовые ряды (выборки ЭМГ). При анализе полученных временных разверток по данным электромиографии видно, что получаемые сигналы уникальны для каждого испытуемого, но при этом сохраняется некоторая закономерность, которая связана с площадью КА S в фазовом пространстве x_1 и x_2 (рис. 2б).

Каждый из векторов перемещения по осям (x_1 и x_2) образует фазовую плоскость, описывающую динамику поведения двумерного вектора $x = (x_1, x_2)^T$, которая представлена на рис. 1В. Из этого рисунка видно, что ЭМГ имеет некоторое подобие с автокорреляционной функцией $A(t)$ (рис. 2с).

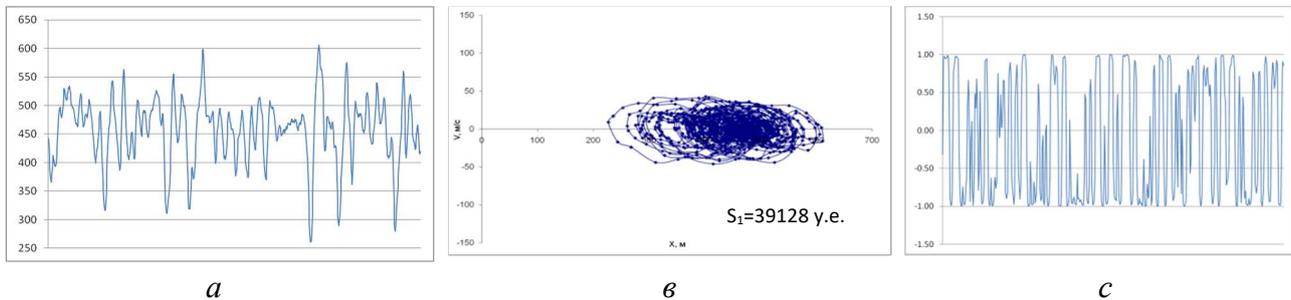


Рис. 2. Результат обработки данных, полученных при слабом напряжении мышцы ($F_1 = 50$ Н); испытуемый КАЕ как типичный пример всей группы:
а – временная развертка сигнала ЭМГ; б – фазовые траектории КА с площадью $S_1 = 39\ 128$ у. е.;
с – автокорреляционная функция сигнала $A(t)$.

Так как для многих параметров гомеостаза функции распределения $f(x)$ не могут демонстрировать устойчивость [15] ($f(x)$ непрерывно изменяются), то возникает вопрос о целесообразности использования функций распределения $f(x)$ для выборок ЭМГ. Наблюдается их непрерывное изменение при сравнении выборок ЭМГ и любая ЭМГ имеет свой особый закон распределения $f(x)$ для каждого интервала времени Δt . В рамках стохастического подхода были построены матрицы парных сравнений выборок ЭМГ для 15 испытуемых при 2 силах сжатия динамометра ($F_2 = 2F_1$) и установлена закономерность изменения числа «совпадений» пар выборок k , получаемых параметров ЭМГ [15]. Оказалось, что в первом случае (для F_1) матрица 15×15 (105 разных пар сравнений) при усилии $F_1 = 50$ Н показывает $k_1 = 5$. При увеличении напряжения до $F_2 = 100$ Н наблюдается и увеличение числа совпадений до $k_2 = 20$. Аналогичные расчеты производились и для 15 выборок ЭМГ от одной испытуемой (число повторов $N = 15$). Здесь получилось, что число пар совпадений $k_1 = 11$ при слабой статической нагрузке, а при двукратном увеличении прилагаемого усилия число пар увеличилось до $k_2 = 22$.

Сравнение площадей S для КА у группы из 15 девушек и 15 выборок от одной испытуемой представлены в табл. 2. Из этой таблицы видно, что в обоих случаях четко выражено различие в этих двух состояниях при слабом напряжении и сильном напряжении мышцы (MADM). Здесь средние значения отличаются в 2–4 раза. В среднем, для группы девушек имеем: $\langle S_1 \rangle = 32\ 721$ у. е. для $F_1 = 50$ Н у. е., и $\langle S_2 \rangle = 129\ 155$ у. е. для $F_2 = 100$ Н, сходную динамику на увеличение S демонстрируют данные, полученные от одной испытуемой: $\langle S_1 \rangle = 23\ 992$ у. е. и $\langle S_2 \rangle = 115\ 333$ у. е. (для F_2). Такое резкое увеличение площади квазиаттракторов в ТХС представляется как изменение, так как $\langle S_2 \rangle / \langle S_1 \rangle = 4$, т. е. имеем кратное

увеличение S для КА при переходе из одного гомеостаза G_1 в другой гомеостаз G_2 (при $\langle G_2 \rangle \neq \langle G_1 \rangle$).

Таблица 1

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

№	Разные испытуемые		Один испытуемый (повторения)	
	$S_1 \times 10^4, 5 \text{ даН}$	$S_2 \times 10^4, 10 \text{ даН}$	$S_1 \times 10^4, 5 \text{ даН}$	$S_2 \times 10^4, 10 \text{ даН}$
1	2,68	10,62	2,65	10,73
2	2,98	20,39	2,43	11,49
3	4,21	10,12	3,58	13,97
4	7,78	14,99	2,76	11,17
5	1,54	10,29	3,22	11,97
6	2,31	12,30	1,88	10,11
7	4,28	10,57	2,98	15,26
8	3,91	29,85	2,43	19,13
9	1,64	7,26	1,69	10,00
10	1,78	8,16	1,69	6,89
11	4,18	18,92	2,12	11,69
12	1,80	16,29	1,52	10,14
13	2,86	6,17	1,89	10,47
14	2,63	9,36	2,03	11,36
15	4,51	8,42	3,09	8,60
$\langle S \rangle$	3,27	12,91	2,39	11,53
	Критерий Вилкоксона, значимость функций $f(x) p = 0,01$		Т-критерий значимости функций $f(x) p = 0,00$	

Для анализа уровня хаотичности во временной развертке электромиограмм была рассчитана энтропия Шеннона H . Из табл. 2 видно, что энтропийный подход при анализе ЭМГ не демонстрирует различий. Согласно этим результатам, выборки данных ЭМГ для группы девушек и для одной и той же девушки можно отнести к одной генеральной совокупности. Здесь уровень значимости критерия Вилкоксона $p = 0,82$ и $p = 0,24$ соответственно, при критическом уровне значимости $p < 0,05$. Иными словами, эти выборки для двух разных гомеостазов G_1 и G_2 статистически не различаются (как для группы, так и для одного человека, но в режиме многократных повторений регистрации $x_i(t)$ – ЭМГ).

Внешний вид фазовых траекторий и площадей квазиаттракторов для F_1 (на примере одного опыта) мы уже представили на рис. 1. Здесь фазовые координаты x_1 – реальные значения биопотенциалов, а $x_2 = dx_1/dt = V$ – скорость изменения $x(t)$. Очевидно, что мы имеем почти четырехкратное увеличение площади S_2 по отношению к S_1 . Расчет этих двух значений площадей КА в виде S_1 и S_2 мы производили для многих испытуемых и везде картина одинакова: всегда регистрируется при увеличении силы напряжения мышцы в 2 раза увеличение и площади квазиаттрактора ЭМГ в 3–4 раза от исходного (при $F_1 = 50 \text{ Н}$ и при $F_2 = 100 \text{ Н}$). Характерно, что для одного испытуемого (при 15 повторях) всегда критерии Вилкоксона $p < 0,05$ (за редким исключением). При этом значения энтропии H вообще не отличаются (табл. 2).

Таблица 2

Значения энтропии Шеннона H для ЭМГ группы девушек и одной и той же девушки

№	Разные испытуемые		Один испытуемый (повторения)	
	E , при $F = 5$ даН	E , при $F = 10$ даН	E , при $F = 5$ даН	E , при $F = 10$ даН
1	3,984	3,546	3,441	3,584
2	3,441	3,822	3,822	3,441
3	3,684	3,584	3,522	3,384
4	3,133	3,884	3,584	3,584
5	3,346	3,646	3,546	3,684
6	3,346	3,546	3,822	3,209
7	2,533	2,204	3,641	3,722
8	3,322	0,848	3,641	3,484
9	3,322	0,848	3,641	3,484
10	3,622	3,441	3,784	3,584
11	3,304	3,339	3,784	3,784
12	3,984	3,684	3,541	3,441
13	3,346	3,484	4,122	3,784
14	3,484	3,784	3,441	3,722
15	3,139	3,446	3,546	3,922
<E>	3,4	3,141	3,659	3,588
	Критерий Вилкоксона, значимость функций $f(x)$ $p = 0,82$		Т-критерий, значимость функций $f(x)$ $p = 0,24$	

В рамках ТХС мы можем использовать фазовую плоскость при повторении опытов (получать выборки с повторением) и для них строить КА выборок ЭМГ. Однако полностью уходить от стохастики пока не следует. Необходимы модификации, внедрение новых методов в комплексе с методами ТХС [3–12], которые всегда [10–15] показывают большую чувствительность в оценке гомеостаза, чем любые методы стохастики [8–15]. Отметим, что функциональный анализ вообще имеет исторический характер (выборки уникальны, нет $dx/dt = 0$).

Заключение. Основу ТХС составляет проблема определенности и неопределенности биосистем – *complexity* (СТТ), которая в итоге сводится к проблеме порядка и беспорядка в оценке и моделировании *complexity*. На этом фоне все еще отсутствует понимание особенностей (сейчас их 5) и главных принципов организации биосистем, принципиальной невозможности их описания в рамках детерминизма, стохастики и детерминированного хаоса Арнольда – Тома [15].

Исследование подтвердило эффективность применения методов многомерных фазовых пространств в качестве меры динамики изменения ЭМГ. Площадь КА при слабом напряжении всегда меньше площади КА при сильной нагрузке отводящей мышцы мизинца (MADM). При этом мы наблюдаем существенное (почти в 4 раза) увеличение S для КА.

Сравнение традиционных методов обработки электромиограмм и методов ТХС показывает низкую эффективность моделей в рамках расчета энтропий H , расчета *спектральных плотностей сигнала* (СПС), автокорреляционных функций $A(t)$. ЭМГ испытуемых, находящихся в разных физиологических состояниях (напряжениях мышц), изучить весьма затруднительно с позиций стохастики. На фоне непрерывного хаоса $f(x)$, СПС, $A(t)$ мы регистрируем устойчивые показатели квазиаттракторов и их эволюции в фоновом пространстве состояний при переходе из одного гомеостаза G_1 в другой квазиаттрактор G_2 .

Литература

1. Еськов В. М., Филатова О. Е., Еськов В. В., Гавриленко Т. В. Эволюция понятия гомеостаза: детерминизм, стохастика, хаос-самоорганизация // Биофизика. 2017. Т. 62. № 5. С. 984–997.
2. Зилов В. Г., Хадарцев А. А., Еськов В. В., Еськов В. М. Экспериментальные исследования статистической устойчивости выборок кардиоинтервалов // Бюл. эксперимент. биологии и медицины. 2017. Т. 164. № 8. С. 136–139.
3. Попов Ю. М., Русак С. Н., Бикмухаметова Л. М., Филатова О. Е. Хаотические методы оценки погодной динамики на примере ХМАО – Югры // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2017. № 2. С. 32–35.
4. Еськов В. В., Гавриленко Т. В., Еськов В. М., Вохмина Ю. В. Феномен статистической неустойчивости систем третьего типа – *complexity* // Журн. технич. физики. 2017. Т. 87. № 11. С. 1609–1614.
5. Еськов В. В. Математическое моделирование неэргодичных гомеостатических систем // Вестн. новых мед. технологий. 2017. Т. 24. № 3. С. 33–39.
6. Белощенко Д. В., Якунин В. Е, Потетюрина Е. С., Королев Ю. Ю. Оценка параметров электромиограмм у женщин при разном статическом усилии в режиме повторения // Клинич. медицина и фармакология. 2017. Т. 3. № 1. С. 26–31.
7. Betelin V. B., Eskov V. M., Galkin V. A., Gavrilenko T. V. Stochastic Volatility in the Dynamics of Complex Homeostatic Systems // Doklady Mathematics. 2017. Vol. 95. № 1. P. 92–94.
8. Белощенко Д. В., Майстренко Е. В., Живаева Н. В., Алиев Н. Ш. Хаотическая динамика параметров нервно-мышечной системы у мужчин при многократных повторениях // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2017. № 1. С. 5–11.
9. Еськов В. М., Филатова О. Е., Полухин В. В. Проблема выбора абстракций при применении биофизики в медицине // Вестн. новых мед. технологий. 2017. Т. 24. № 1. С. 158–167.
10. Русак С. Н., Бикмухаметова Л. М., Филатова О. Е., Попов Ю. М. Метеочувствительность и метеопатия: современные хаотические методы оценки погодной динамики на примере ХМАО – Югры // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2017. № 1. С. 19–25.
11. Томчук А. Г., Широков В. А., Мирошниченко И. В., Яхно В.Г. Стохастический и хаотический анализ психо-эмоционального статуса и вегетативных показателей в комплексном лечении хронических мышечно-скелетных болей // Вестн. новых мед. технологий. 2017. Т. 24. № 3. С. 40–46.
12. Хадарцев А. А., Еськов В. М. Внутренние болезни с позиции теории хаоса и самоорганизации систем : науч. обзор // Терапевт. 2017. № 5–6. С. 5–12.
13. Широков В. А, Томчук А. Г, Роговский Д. А. Стохастический и хаотический анализ вертеброневрологических показателей пациентов при остеохондрозе позвоночника в условиях Севера // Клинич. медицина и фармакология. 2017. Т. 3. № 1. С. 34–38.
14. Eskov V. M., Bazhenova A. E., Vochmina U. V., Filatov M. A., Piyashenko L. K. N. A. Bernstein hypothesis in the description of chaotic dynamics of involuntary movements of person // Russian Journal of Biomechanics. 2017. Vol. 21. № 1. P. 14–23.
15. 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. № 3. P. 38–42.