

DOI: 10.12737/article\_58ef703d5e53c7.28272158

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ЭНТРОПИИ ДЛЯ ТРЕМОРОГРАММ И ТЕППИНГРАММ С ПОЗИЦИИ ТЕРМОДИНАМИКИ НЕРАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМ

Т.В. ГАВРИЛЕНКО, Д.В. ГОРБУНОВ, А.А. ЧЕРТИЩЕВ, Е.В. ВАЛИЕВА

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

**Аннотация.** Использование новых методов в рамках теории хаоса-самоорганизации помогает выявить различия в ряде параметров гомеостаза, в частности, параметров тремора и теппинга. В этой связи в представленной работе демонстрируется реализация такого подхода на основе метода анализа двумерных фазовых пространств при изучении тремора, т.е. непроизвольные движения и теппинга – произвольные движения. В задачи данного исследования входит проверка эффективности расчета значений энтропии Шеннона при анализе параметров тремора и теппинга. В результате исследования было установлено, что функции распределения  $f(x)$ , энтропия  $E$  и др. статистические подходы весьма проблемно использовать для описания систем третьего типа. Однако, созданные новые методы и подходы, объединяющие стохастику и хаос систем третьего типа, обеспечивают в ряде случаев получение информации о состоянии особых биосистем. Эти системы подчиняются законам эффекта Еськова-Зинченко.

**Ключевые слова:** тремор, теппинг, энтропия Шеннона, эффект Еськова-Зинченко.

## STATISTICAL STABILITY OF ENTROPY PARAMETERS FOR TREMOROGRAMS AND TAPPINGGRAMMS FROM THE POSITION OF THERMODYNAMICS OF NONEQUILIBRIUM SYSTEMS

T.V. GAVRILENKO, D.V. GORBUNOV, A.A. CHERTISHCHEV, E.V. VALIEVA

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

**Abstract.** It was used new methods in the theory of chaos, self-organization helps to identify differences in the number of homeostasis parameters, in particular parameters of tremor and tapping. In this regard, in the present study, display implementation of this approach is based on the method of analysis of two-dimensional phase spaces in the study of tremor, ie no voluntary movements and tapping - voluntary movements. The objective of this study is to check the efficiency of calculating the entropy values of Shannon in the analysis of parameters of tremor and tapping. The study found that the distribution function  $f(x)$ , the entropy  $E$  et al. Quite problematic statistical approaches used to describe a third type of systems. However, by new methods and approaches that combines stochastic and chaos of the third type of system, provided, in some cases to obtain information about the status of specific biological systems. The systems have some typical lows of Eskov-Zinchenko effect.

**Key words:** tremor, tapping, Shannon entropy, Eskov-Zinchenko effect.

**Введение.** В ряде предыдущих работ [1-5,9,11,13,15] было установлено, что использование новых методов в рамках теории хаоса-самоорганизации (ТХС) помогает выявить различия в параметрах гомеостаза, в частности, параметров тремора и теппинга [2,4,5,9]. При различных исследо-

ваниях все более активно используется метод многомерных фазовых пространств [1,3,11,13,15]. При изучении и моделировании сложных биологических объектов существует возможность внедрения традиционных физических методов в биологические исследования и новых методов теории

хаоса-самоорганизации для сравнения их эффективности [7,8,10,12,14]. В этой связи в представленной работе демонстрируется реализация такого подхода на основе метода анализа двумерных фазовых пространств при изучении тремора, т.е. не произвольные движения и теппинга – произвольные движения. Вместо традиционного понимания стационарных режимов биосистем в виде  $dx/dt=0$ , где  $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  является *вектором состояния системы* (ВСС), в этом случае используются параметры *квазиаттракторов* (КА), внутри которых наблюдается движение ВСС в *фазовом пространстве состояний* (ФПС). Эти движения имеют хаотический характер, т.е. всегда  $dx/dt \neq 0$ , но при этом движение ВСС ограничено в ФПС объемом квазиаттрактора [2,4,5,7,10-13,15]. Все это лежит в основе новой ТХС [5,6,16-23].

В задачи данного исследования входит проверка эффективности расчета значений энтропии Шеннона при анализе параметров тремора и теппинга, а так же его сравнение с методами ТХС. В свою очередь возможность использовать в качестве количественной меры, наблюдаемой в экспериментальных измерениях хаотической динамики тремора и теппинга, величина объемов *квазиаттракторов* (КА) многомерных ФПС была установлена ранее [2,4,5,9,11]. Это обеспечивает идентификацию изменений параметров функционального состояния. При этом организм испытуемых представлен особым ВСС  $x=x(t)$ , который совершает непрерывные хаотические движения (т.е. постоянно  $dx/dt \neq 0$ ) в пределах ограниченных КА [9-13,15].

**Объекты и методы исследования.** Для исследования с позиции эффекта Еськова-Зинченко был привлечен один испытуемый ГДВ в возрасте 25 лет. У испытуемого многократно (по 225 раз) регистрировались параметра тремора и теппинга с частотой дискретизации  $\mu=0.1$  мс. Записи тремора и теппинга обрабатывались программным комплексом для формирования вектора  $x=(x_1, x_2)^T$ , где  $x_1=x(t)$  – значение перемещения пальца руки в пространстве на некотором интервале времени  $\Delta t$ , 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 ВСС и определялись *объемы полученных квазиаттракторов* ( $V_G$ ) по формуле  $V_G^{max} \geq \Delta x_1 \times \Delta x_2 \geq V_G^{min}$  [1-5,7,9,10,12,13,15], где  $\Delta x_1$  – вариационный размах перемещения пальца в пространстве, а  $\Delta x_2$  – вариационный размах для скорости перемещения. В конечном итоге анализ состояния биомеханической системы проводился на основе сравнения  $V_G$  КА, а также на основе анализа значений энтропии Шеннона  $E$ , где  $E$  определяется по формуле  $E(x) = -\sum_{i=1}^n p(i) \log_2 p(i)$ , где  $p$  – функция вероятности. Тремограммы и теппинграммы регистрировались в спокойном состоянии (число повторов  $N=15$ ), т.е.  $N$  – число серий опытов по  $n=15$  выборок ТМГ и ТПГ в каждой серии).

**Результаты и их обсуждение.** Для визуализации данных, полученных с тремографа, строилась временная развертка сигнала (рис. 1-I), которая преобразовывалась в некоторые числовые ряды. При анализе полученных временных разверток по полученным данным можно сказать, что получаемые сигналы уникальны для каждого замера при регистрации параметров  $N=15$  раз подряд, но при этом сохраняется некоторая закономерность, которая связана с объемом КА  $S$  в фазовом пространстве  $x_1$  и  $x_2$  (рис. 1-II). Каждый из векторов перемещения по осям ( $x_1$  и  $x_2$ ) образует фазовую плоскость, описывающую динамику поведения двумерного ВСС  $x=(x_1, x_2)^T$ , а каждая серия (из всех  $N=15$  серий) образует матрицу, подобную табл. 1 для ТМГ.

Так как для многих параметров гомеостаза функции распределения  $f(x)$  не могут продемонстрировать устойчивость ( $f(x)$  непрерывно изменяются, что представлено в табл. 1, то возникает вопрос о целесообразности использования функций распределения  $f(x)$  для выборок ЭМГ. Наблюдается их непрерывное изменение при сравнении выборок тремограмм или теппинграмм и любая выборка имеют свой особый закон распределения  $f(x)$  для каждого интервала. В рамках стохастического подхода были построены матрицы парных сравнений выборок тремограмм и теп-

пинграмм для одного и того же испытуемого ГДВ (число повторов  $N=15$ ) и установлена закономерность изменения числа «совпадений» пар выборок  $k$ , получаемых параметров. Оказалось, что в первом случае (для тремора) матрица  $15 \times 15$  (105 разных пар сравнений) показывает  $k_1=4$ , пример такой матрицы представлен в табл. 1. При регистрации теппинга наблюдается увеличение числа совпадений до  $k_2=15$ . Аналогичные расчеты производились и для 15-ти выборок треморограмм и теппинграмм для группы испытуемых (число испытуемых  $Z=15$ ). Здесь получилось, что число пар совпадений  $k_3=5$  для тремора, а для теппинга число пар увеличилось до  $k_4=16$ .

тремор и теппинг, здесь число совпадений  $k=0$ .

Исследование подтвердило эффективность применения методов многомерных фазовых пространств при изучении эффекта Еськова-Зинченко в качестве меры динамики изменения параметров тремора и теппинга. Сравнение традиционных методов обработки тремора и теппинга и методов ТХС показывает низкую эффективность моделей в рамках расчета энтропий  $E$ , расчета *спектральной плотности сигнала* (СПС), автокорреляционных функций  $A(t)$ .

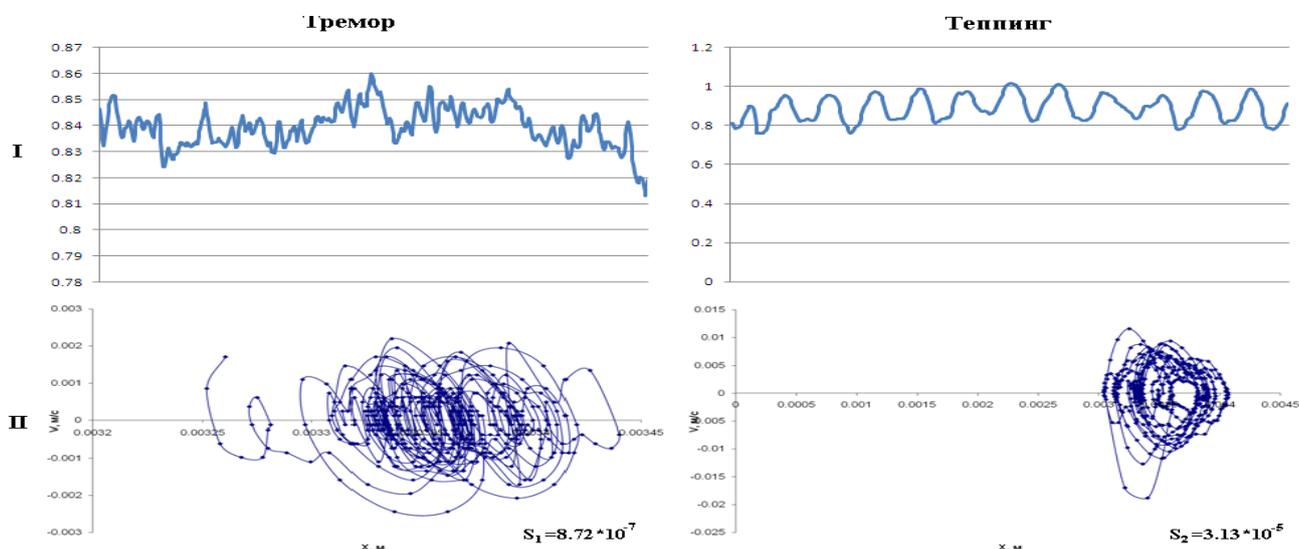


Рис. 1. Результат обработки данных Тремора и теппинга испытуемого ГДВ как типичный пример всех выборок ( $N=225$ ): I – временная развертка сигнала; II – фазовые траектории КА с площадью

Для анализа уровня хаотичности во временной развертке треморограмм и теппинграмм была рассчитана энтропия Шеннона. Как оказалось, энтропийный подход при анализе выборок треморограмм и теппинграмм не демонстрирует различий. Согласно этим результатам, выборки данных тремора и теппинга можно отнести к одной генеральной совокупности (табл. 2), здесь уровень значимости критерия Вилкоксона  $p > 0.05$  (число совпадений  $k_5=199$ ) при критическом уровне значимости  $p < 0.05$ . Иными словами эти выборки для  $E_1$  (тремор) и  $E_2$  (теппинг) статистически не различаются. А площади КА однозначно могут различить

Основу третьей парадигмы и ТХС составляет проблема определенности параметров КА и статической неопределенности биосистем – *complexity* (СТТ), которая в итоге сводится к проблеме порядка и беспорядка оценки и моделирования *complexity*. На этом фоне все еще отсутствует понимание особенностей (а их сейчас 5) и принципов организации биосистем, принципиальной невозможности их описания в рамках детерминизма, стохастики и детерминированного хаоса Арнольда-Тома.

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		.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
2	.00		.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.44	.00	.00	.01	.00
3	.00	.00		.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
4	.00	.00	.00		.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
5	.00	.00	.00	.00		.33	.00	.01	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
6	.00	.00	.00	.00	.33		.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
7	.00	.00	.00	.00	.00	.00		.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
8	.00	.00	.00	.00	.01	.00	.00		.00	.00	.00	.00	.00	.00	.90
9	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00		.88	.00	.00	.00	.03	.00
10	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.88		.00	.00	.00	.00	.00
11	.00	.44	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00		.00	.00	.00	.00
12	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00		.00	.00	.00
13	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00		.00	.00
14	.00	.01	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.03	.00	.00	.00	.00		.00
15	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.90	.00	.00	.00	.00	.00	.00	

Таблица 2

**Матрица парного сравнения выборок энтропии Шеннона для треморограмм и теппинграмм испытуемого ГДВ (число повторов  $N=15 \times 15$ ), использовался критерий Вилкоксона (уровень значимости  $p<0.05$ , число совпадений  $k=199$ )**

	ТМГ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$E_1$																
ТПГ $E_2$																
1		.92	.86	.96	.31	.67	.93	.96	.34	.35	.44	.12	.17	.15	.56	.80
2		.75	.90	.78	.33	.31	.97	.94	.56	.33	.67	.05	.26	.13	.59	.57
3		.07	.09	.05	.03	.18	.13	.08	.11	.44	.01	.02	.01	.29	.04	
4		.80	.89	.65	.41	.16	1.0	.76	.33	.33	.91	1.0	.22	.10	.86	.59
5		.09	.16	.09	.03	.03	.17	.13	.08	.08	.31	.00	.02	.01	.12	.03
6		.76	.88	.78	.24	.56	.84	.89	.41	.26	.58	.03	.19	.10	.58	.51
7		.92	.81	.61	.37	.88	.78	.73	.48	.36	.56	.07	.29	.10	.55	.37
8		.78	.94	.68	.44	.56	.96	.93	.50	.40	.68	.06	.24	.10	.55	.55
9		.45	.42	.31	.10	.37	.58	.33	.21	.11	.94	.02	.04	.08	.67	.36
10		.37	.55	.64	.96	.59	.29	.31	.81	.93	.14	.21	.60	.49	.10	.61
11		.68	.51	.44	.14	.19	.76	.69	.25	.35	.81	.03	.10	.07	.79	.43
12		.24	.26	.13	.08	.14	.35	.13	.19	.05	.58	.01	.03	.02	.55	.09
13		.48	.58	.40	.15	.24	.65	.58	.20	.26	.89	.04	.09	.04	.87	.20
14		.42	.95	.88	.46	.89	1.0	.91	.51	.37	.28	.11	.29	.08	.55	.77
15		.35	.44	.29	.13	.25	.43	.31	.20	.10	.80	.01	.08	.03	.81	.18

**Литература**

1. Башкатова Ю.В., Добрынина И.Ю., Горленко Н.П., Ельников А.В., Хадарцева К.А., Фудин Н.А. Стохастическая и хаотическая оценка состояния параметров сердечно-сосудистой системы испытуемых в условиях дозированной физической нагрузки // Вестник новых медицинских технологий. 2014. Т. 21, № 4. С. 24–29.

**Заключение.** Функции распределения  $f(x)$ , энтропия  $E$  и др. статистические (термодинамические) подходы весьма проблемно использовать для описания СТТ. Однако, созданные новые методы и подходы, объединяющие стохастику и хаос СТТ, обеспечивают в ряде случаев получение информации о состоянии особых биосистем. Таким образом, становится возможным объединить усилия основоположников синергетики (H.Haken) и теории *complexity* – эмерджентности (I.R. Prigogine, M. Gell-Mann,

J.A. Wheeler и др.) в рамках третьей парадигмы и ТХС в деле описания и моделирования свойств сложных биосистем. При этом главная проблема такого объединения – это проблема описания гомеостаза, гомеостатических систем (*complexity*), которые демонстрируют отсутствие статистической устойчивости подряд получаемых выборок.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-41-00034 р\_урал\_а «Разработка новых информационных моделей и вычислительных алгоритмов для идентификации параметров порядка в описании и прогнозах сложных медико-биологических систем»*

**References**

Bashkatova YuV, Dobrynina IYu, Gorlenko NP, El'nikov AV, Khadartseva KA, Fudin NA. Stokhasticheskaya i khaoticheskaya otsenka sostoyaniya parametrov serdechnososudistoy sistemy ispytuemykh v usloviyakh dozirovannoy fizicheskoy nagruzki [Stochastic and chaotic estimation of the state of the parameters of the cardiovascular system of subjects under the conditions of the dosed physical load]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnology.

2. Белощенко Д.В., Баженова А.Е., Щипицин К.П., Королев Ю.Ю. Эффект Еськова-Зинченко в организации произвольных движений человека в режиме повторения // Вестник новых медицинских технологий. 2017. Т. 24, №1. С. 29–35. DOI: 12737/25261  
Beloshchenko DV, Bazhenova AE, Shchipitsin KP, Korolev YuYu. Effekt Es'kova-Zinchenko v organizatsii neproizvol'nykh dvizheniy cheloveka v rezhime povtoreniya [The effect of Eskova-Zinchenko in organizing involuntary movements of a person in a repetition mode]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2017;24(1):29-35. DOI: 12737/25261. Russian.
3. Белощенко Д.В., Майстренко Е.В., Алиев А.А., Сорокина Л.С. Влияние локального холодового воздействия на параметры электромиограмм тренированного испытуемого // Клиническая медицина и фармакология. 2016. Т. 2, № 3. С. 42–46.  
Beloshchenko DV, Maystrenko EV, Aliev AA, Sorokina LS. Vliyanie lokal'nogo kholodovogo vozdeystviya na parametry elektromiogramm trenirovannogo ispytuemogo [Influence of local cold impact on the parameters of electromyograms of the trained subject]. Klinicheskaya meditsina i farmakologiya. 2016;2(3):42-6. Russian.
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.  
Betelin VB, Es'kov VM, Galkin VA, Gavrilenko TV. Stokhasticheskaya neustoychivost' v dinamike povedeniya slozhnykh gomeostaticheskikh sistem [Stochastic instability in the dynamics of behavior of complex homeostatic systems]. Doklady akademii nauk. 2017;472(6):642-4. Russian.
5. 1. Газя Г.В., Соколова А.А., Баженова А.Е., Ярмухаметова В.Н. Анализ и синтез параметров вектора состояния вегетативной нервной системы работников нефтегазовой отрасли // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2012. Т. 11, № 4. С. 886–892.  
Gazyia GV, Sokolova AA, Bazhenova AE. Yarmukhametova VN. Analiz i sintez parametrov vektora sostoyaniya vegetativnoy nervnoy sistemy rabotnikov neftegazovoy otrasli [Analysis and synthesis of the vector parameters of the vegetative nervous system state of workers in the oil and gas industry]. Sistemnyy analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh. 2012;11(4):886-92. Russian.
6. Дудин Н.С., Русак С.Н., Хадарцев А.А., Хадарцева К.А. Новые подходы в теории устойчивости биосистем – альтернатива теории А.М. Ляпунова // Вестник новых медицинских технологий. 2011. Т. 18, № 3. С. 336.  
Dudin NS, Rusak SN, Khadartsev AA, Khadartseva KA. Novye podkhody v teorii ustoychivosti biosistem – al'ternativa teorii A.M. Lyapunova [New approaches in the theory of biosystems stability – alternative to a.m. lyapunov's theory]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2011;18(3):336. Russian.
7. Еськов В.М., Гудков А.Б., Баженова А.Е., Козупица Г.С. Характеристика параметров тремора у женщин с различной физической нагрузкой в условиях севера России // Экология человека. 2017. № 1. С. 38–42.  
Es'kov VM, Gudkov AB, Bazhenova AE, Kozupitsa GS. Kharakteristika parametrov tremora u zhenshchin s razlichnoy fizicheskoy nagruzkoy v usloviyakh severa Rossii [Characteristics of tremor parameters in women with different physical activity in the conditions of the north of Russia]. Ekologiya cheloveka. 2017;1:38-42. Russian.
8. Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В. Формализация эффекта «Повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // Биофизика. 2017. Том 62, № 1. С. 168–176.  
Es'kov VM, Es'kov VV, Gavrilenko TV, Vokhmina YuV. Formalizatsiya effekta «Povtorenie bez povtoreniya» N.A. Bernshteyna [Formalization of the effect "Repetition without repetition" NA. Bernstein]. Biofizika. 2017;62(1):168-76. Russian.
9. Еськов В.М., Еськов В.В., Филатова О.Е., Хадарцев А.А. Фрактальные закономерности развития человека и человечества на базе смены трёх парадигм // Вестник новых медицинских технологий. 2010. Т. 17, № 4. С. 192–194.  
Es'kov VM, Es'kov VV, Filatova OE, Khadartsev AA. Fraktal'nye zakonomernosti razvitiya cheloveka i chelovechestva na baze smeny trekh paradigm [Synergetic paradigm at fractal description of man and human]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2010;17(4):192-4. Russian.
10. Еськов В.М., Зинченко Ю.П., Филатова О.Е., Веракса А.Н. Биофизические про-  
Es'kov VM, Zinchenko YuP, Filatova OE, Veraksa AN. Biofizicheskie problemy v organizatsii dviz-



- ва Д.Ю., Шерстюк Е.С. Анализ параметров спектральной мощности variability сердечного ритма детей югры в условиях санаторного лечения // Клиническая медицина и фармакология. 2016. Т. 2, № 3. С. 36–41.
20. Хадарцев А.А., Беляева Е.А., Киркина Н.Ю. Система НЭБА при разных формах гипертрофии сердца // Клиническая медицина и фармакология. 2016. Т. 2, № 3. С. 32–35.
21. Хадарцев А.А., Еськов В.М., Филатова О.Е., Хадарцева К.А. Пять принципов функционирования сложных систем, систем третьего типа // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №1. Публикация 1-2. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-1/5123.pdf> (дата обращения: 25.03.2015). DOI: 10.12737/10410
22. Хадарцев А.А., Филатова О.Е., Джумагалиева Л.Б., Гудкова С.А. Понятие трех глобальных парадигм в науке и социумах. // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2013. №3. С. 35–45.
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.
- tyuk ES. Analiz parametrov spektral'noy moshchnosti variabel'nosti serdechnogo ritma detey yugry v usloviyakh sanatornogo lecheniya [Analysis of spectral power parameters of heart rate variability of children of Yugra in conditions of sanatorium treatment]. Klinicheskaya meditsina i farmakologiya. 2016;2(3):36-41. Russian.
- Khadartsev AA, Belyaeva EA, Kirkina NYu. Sistema NEBA pri raznykh formakh gipertrofii serdtsa [The NEA system with different forms of cardiac hypertrophy]. Klinicheskaya meditsina i farmakologiya. 2016;2(3):32-5. Russian.
- Khadartsev AA, Es'kov VM, Filatova OE., Khadartseva KA. Pyat' printsipov funktsionirovaniya slozhnykh sistem, sistem tret'ego tipa [The five principles of the functioning of complex systems, systems of the third type]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. Elektronnoe izdanie [internet]. 2015[cited 2015 Mar 25];1[about 6 r.]. Russian. Available from: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-1/5123.pdf>. DOI: 10.12737/10410
- Khadartsev AA, Filatova OE, Dzhumagalieva LB, Gudkova SA. Ponyatie trekh global'nykh paradigm v nauke i sotsiumakh. Slozhnost'. Razum. Postneklassika. 2013;3:35-45. Russian.
- 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.