

СТОХАСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МОДЕЛЕЙ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ  
БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Д.Д. ДАЯНОВА, Т.В. ГАВРИЛЕНКО, Ю.В. ВОХМИНА, Д.С. ИГУМЕНОВ

«Сургутский государственный университет Ханты-Мансийского автономного округа – Югры»,  
проспект Ленина, 1, г. Сургут, Россия, 628412, тел.: + 7 (982) 594-87-40, e-mail: [diyanad@mail.com](mailto:diyanad@mail.com)

**Аннотация.** Моделирование различных процессов одно из основных направлений в науке и технике. При наличии модели простой системы можно получить значение параметров её вектора состояния до начала процесса. Однако, моделирование сложных процессов (систем) в рамках стандартных методов развития вычислительной техники и моделирующего программного обеспечения наталкивается на трудности из-за хаотической динамики таких систем. Количество моделей, которые позволяют описать динамику сложных биологических динамических систем крайне мало, так как повторить одинаковые результаты экспериментов невозможно на основе детерминистских или стохастических моделей. Предлагается модель, которая позволяет проводить описание состояния человека в рамках трёхкомпарментных двухкластерных систем управления. Модель может быть реализована с помощью пакета прикладных программ, которые демонстрируют работу каждого кластера по отдельности. На выходе модели можно наблюдать сигналы, которые сравниваются с данными реальных экспериментов в виде наблюдаемых выходных сигналов. Получаемые на выходе имитационной модели сигналы демонстрируют различные состояния системы в условиях внешних управляющих воздействий, при которых происходило изменение внутренних свойств и состояний за счёт внешнего (возмущающего) сигнала. Управляющий внешний сигнал с первого кластера и соответственно выходной сигнал со 2-го кластера были разделены на четыре основные составляющие, которые имели одноименные аналоги в динамике поведения сложных биологических динамических систем [2, 4].

**Ключевые слова:** трёхкомпарментная двухкластерная модель, биологические системы, внешнее управляющее воздействие, коэффициент диссипации.

STOCHASTIC ESTIMATION OF CHAOTIC DYNAMICS MODELS OF THE BIOLOGICAL SYSTEMS

D.D. DAYANOVA, T.V. GAVRYLENKO, Y.V. VOKHMINA, D.S. IGYMENOV

*Surgut State University, Lenina, 1, Surgut, Russia, 628412, Phone: + 7 (982) 594-87-40, e-mail: [diyanad@mail.com](mailto:diyanad@mail.com)*

**Abstract.** Process modeling is one of the main directions in science and engineering. When there is a model of simple system it is possible to obtain the parameters of its state vector before a process starts. However, the modeling of complex processes (systems) applying standard methods of computing and simulation software is confronted with difficulties of chaotic dynamics of such systems. A number of models that allow to describing the dynamics of complex biological dynamic systems is extremely small, as to repeat the same results of experiments it is impossible on the basis of deterministic or stochastic models. In additional, the authors propose a model for description of human state vector through three-compartment two-cluster control system. This model may be implemented using an application package exhibiting an operation of each cluster separately. The output signals of the model seen can be compared with the actual experimental data observed as output signals. The signals obtained at the output of the simulation model show different states of the system under external control actions which cause the change in the internal properties and states due to external (disturbance) signal. Control external signal from the first cluster and accordingly the output signal from the second cluster were divided into four main components that had the same analogues in the dynamics of complex biological behavior of dynamical systems [2, 4].

**Key words:** three-compartment two-cluster model, biological systems, external control action, dissipation factor.

**Введение.** Одно из основных направлений в науке и технике – это поиск формальных моделей, закономерностей и алгоритмов, описывающих те или иные объекты, системы, процессы, явления, и, как следствие, большинство современных научных исследований посвящено вопросам их адекватной формализации. Несомненно, результаты таких исследований крайне востребованы и практически значимы для любого направления научных знаний человека. Всё это позволяет переходить на всё новый и новый уровень понимания и оперирования окружающим миром, тем более, если речь идёт о сложных биосистемах.

При исследовании относительно простых предметных областей (технических систем) процедура получения формальных описаний предметной области хорошо отработана и известна, получаемые результаты

хорошо согласуются с наблюдаемыми значениями вектора состояния системы на таких реальных объектах. Изучение сложных биосистем, объектов и процессов живой природы сопряжено с дополнительными усилиями и, в ряде случаев, требует нетривиальных решений, которые выходят за рамки *детерминистских и стохастических подходов* (ДСП) и моделей.

С развитием вычислительной техники и появлением эффективного математического и моделирующего программного обеспечения (ПО) появилась возможность исследовать сложные объекты, процессы, явления и использовать для практических целей сложные формальные модели и алгоритмы их реализации, но все-таки необходимо признать эффективность и достаточно простых методов обработки данных медико-биологических исследований [1].

Биологические системы и, в частности, организм человека остаются наиболее сложными системами (сложными биологическими динамическими системами (БДС)), как с точки зрения их формального описания, так и применения таких описаний, например для прогнозирования функциональных систем организма (ФСО) человека в практических целях. Наибольшую сложность представляет исследование и оценка состояния организма человека по таким измерениям как электроэнцефалограмма, электрокардиограмма, треморограмма, то есть измерения вектора состояния человека на некотором промежутке времени  $\Delta t$ . При этом модели, адекватно описывающих подобные процессы, крайне мало. Одной из причин, по которой крайне сложно создавать модели поведения вектора состояния организма человека является невоспроизводимость результатов экспериментов (невозможно получить идентичную динамику вектора состояния человека даже при одинаковых условиях эксперимента). Каждый раз регистрируемые показатели (сигналы) уникальны и более того уникальностью обладает каждый участок регистрируемого сигнала. Для таких систем традиционная ДСП – наука уже не применима по утверждению И.Р. Пригожина [11] и тогда возможны подходы в рамках теории хаоса-самоорганизации [1, 3, 5].

**Моделирование показателей функциональных систем организма человека.** Для решения задачи моделирования сложных медико-биологических сигналов (как электроэнцефалограмма, электрокардиограмма, ритмограмма, треморограмма), как наиболее типичных сигналов при описания вектора состояния организма (ВСОЧ) человека нами была взята трёхкомпарментная двухкластерная модель системы управления (рис. 1), которая динамически была подробно изучена В.М. Еськовым [7].

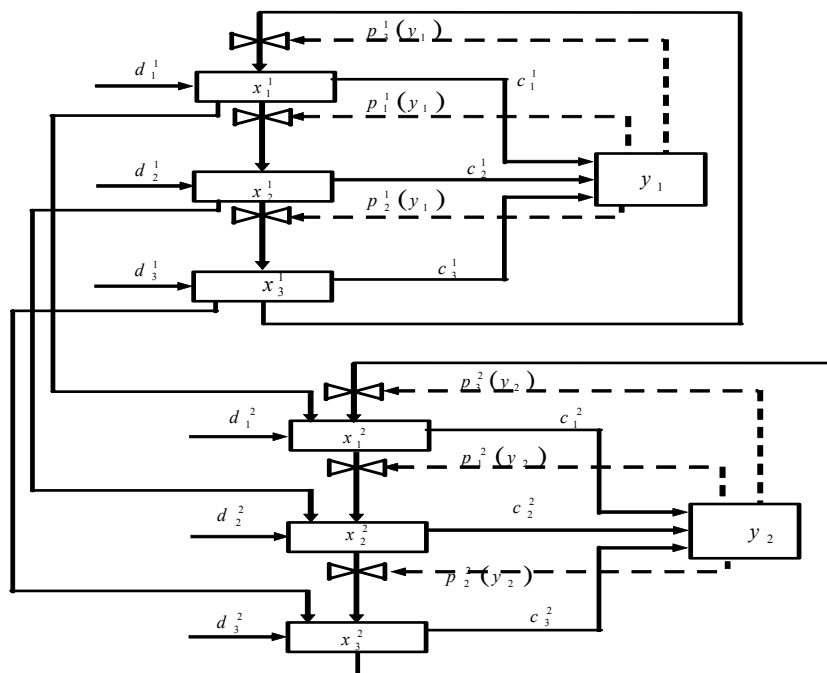


Рис. 1. Граф двухкластерной трехкомпарментной системы управления биосистемами с хаотической динамикой поведения

Система уравнений, описывающая данную модель, имеет вид:

$$\dot{x}_1 = A_{11}(y_1)x_1 - bx_1 + u_1d_1 ,$$

$$\dot{x}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}(y_2)x_2 - bx_2 + u_2d_2 .$$

$$y_1 = c_{11}^T x_1$$

$$y_2 = c_{21}^T x_1 + c_{22}^T x_2$$

Данная модель была реализована в виде пакета прикладных программ, реализующих имитационное моделирование поведения компонент  $x_i$  вектора состояния биосистемы (ВСС) при различных начальных состояниях и различных уровнях управляющего воздействия. Реализованная модель позволяет увидеть результаты работы каждого кластера по отдельности и варьировать уровнем управляющего воздействия с 1-го кластера на 2-ой кластер для управления параметрами динамики 2-го кластера (у нас это нервно-мышечный кластер). На выходе имитационной модели при различных внешних воздействиях мы получаем сигналы, которые по своему характеру и параметрам согласуются с результатами обработки и оценки реальных сигналов [3, 6, 7].

В частности, на рис.2 приведён пример моделируемого сигнала, который получается от 2-го кластера (модель I) при управлении со стороны 1-го кластера, при разных значениях коэффициента диссипации  $b_1$  (рис. 2), при фиксированных значениях  $b_2=1$ ,  $b_3=0,1$  и внешнем управляющем воздействии  $U_d=90$  у.е. Существенно, что с увеличением диссипации в системе параметры квазиаттракторов модельного тремора уменьшаются.

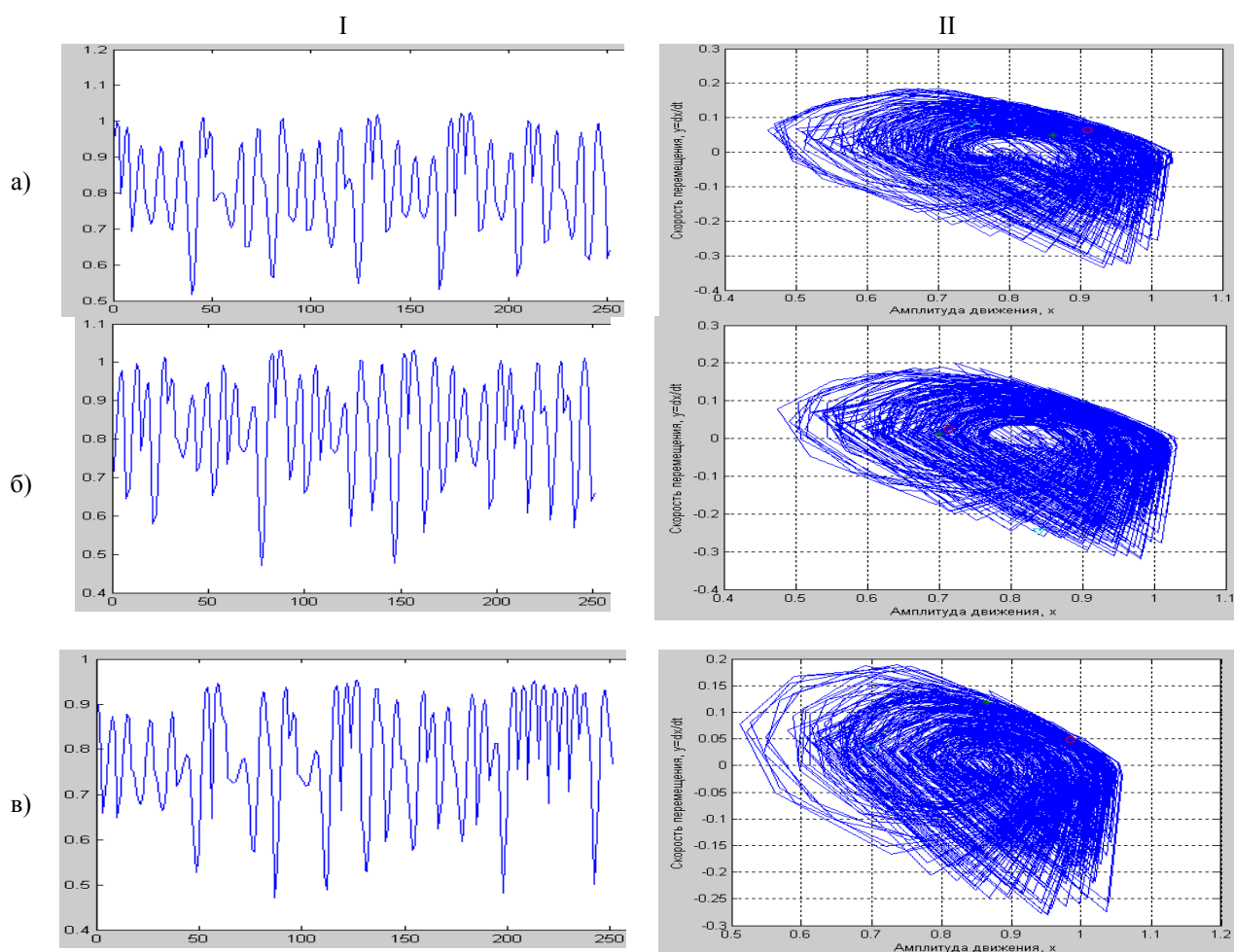


Рис. 2. Пример модельного сигнала и его обработка: а) модельный с выхода второго кластера при разных значениях коэффициента диссипации  $b_1$ ; б) фазовый портрет модельного сигнала в координатах  $x$  и  $dx/dt$

На рис. 2 а (I) – представлен модельный сигнал со второго кластера при  $b_1=1,6$ ;  $b_2=1$ ;  $b_3=0,1$ ;  $U_d=90$ , а на рис. 2а (II) – фазовая плоскость модельного сигнала на выходе со второго кластера при этих же параметрах. При увеличении  $b_1$  картина изменяется: на рис. 2 б (I) – представлен модельный сигнал со второго кластера при  $b_1=1,8$ ;  $b_2=1$ ;  $b_3=0,1$ ;  $U_d=90$ , а на рис. 2б (II) – фазовая плоскость модельного сигнала на выходе со второго кластера при этих же параметрах. Наконец, на рис. 2 в (I) – представлен модельный сигнал со второго кластера при  $b_1=2,2$ ;  $b_2=1$ ;  $b_3=0,1$ ;  $U_d=90$ , а на рис. 2в (II) – фазовая плоскость модельного сигнала на выходе со второго кластера при этих же параметрах.

В целом, метод ФПС позволил идентифицировать параметры квазиаттракторов модели не только в двумерном, но и в трехмерном фазовом пространстве, путем расчета их объемов ( $V_{ij}$ ). Данные расчёта для  $m=2$  представлены в табл. 1.

**Значения площадей квазиаттракторов модели, при разных значениях коэффициента диссипации  $b_1$**

	$b_1=1,6; b_2=1; b_3=0,1; U_d=90$	$b_1=1,8; b_2=1; b_3=0,1; U_d=90$	$b_1=2,2; b_2=1; b_3=0,1; U_d=90$
Площадь КА $V_G$ (y.e.)	0,49565	0,47151	0,44526

Как мы видим, из табл. 1 при увеличении коэффициента диссипации  $b_1$  происходит уменьшение объема квазиаттрактора, то есть он сжимается.

**Статистическая обработка модельных данных.** Статистическая обработка данных, получим на модели (1) для примеров рис. 2 осуществлялась при помощи следующих программных пакетов – «ExcelMSOffice-2003» и «Statistica 6.1». Соответствие структуры данных закону нормального распределения оценивалось на основе вычисления критерия Колмогорова-Смирнова и критерия Лиллиефорса (для больших выборок). При этом за нулевую гипотезу принимается то, что изучаемое распределение отличается от нормального. Если достигнутый уровень значимости ( $p$ ) при проверке гипотезы будет меньше, чем критический (принимаемый за 0,05), то нулевая гипотеза отклоняется, а это значит, что распределение отличается от нормального. Выявлено, что все параметры спектра ВСП не описываются законом нормального распределения, поэтому дальнейшие исследования зависимостей производились методами непараметрической статистики. Эти результаты представлены в табл. 2. Здесь все значения критерия Лиллиефорса менее 0,05 ( $p < 0,05$ ). Выявление различий между конкретными группами выполнялись при помощи одновыборочного критерия Вилкоксона. Надежность используемых статистических оценок принималась не менее 95%.

Таблица 2

**Уровень значимости коэффициента диссипации  $b_1$**

		Критерий нормальности			
		N	макс.D	К.-С. p	Лиллиеф. p
Var1	$b_1=1,6$	17400	0,072081	$p < 0,01$	$p < 0,01$
Var2	$b_1=1,8$	18354	0,07364	$p < 0,01$	$p < 0,01$
Var3	$b_1=2,2$	20194	0,057407	$p < 0,01$	$p < 0,01$

Учитывая, что распределения модельных треморограмм отличается от нормального (тип распределения определяли с помощью критерия Шапиро-Уилка), все данные представлены в виде медианы и интерквартильного размаха. Итоговые результаты представлены в табл. 3, откуда видно, что для всех значений  $p < 0,05$ . Интерквартильный размах указывается в виде 25 и 75% перцентилей.

Таблица 3

**Оценка наличия различий между группами**

Ранговый ДА и конкордация Кендалла ДА хи-кв. (N=17400, cc=2)=952,3233 $p < 0,000001$ Коэфф. конкордации=0,02737 Средн. ранг $r=0,02731$			
	Медиана	25,000 %	75,000 %
$b_1=1,6$	0,811852	0,711615	0,913648
$b_2=1,8$	0,824874	0,717045	0,911606
$b_3=2,2$	0,854255	0,777634	0,940354

Проверка влияния коэффициента диссипации  $b_1$  на возможность нормальность распределения с помощью критерия Лиллиефорса (для подтверждения представлены результаты расчета критерия Колмогорова – Смирнова), при заданных значениях  $b_2=1, b_3=0,1$  и внешнем управляющем воздействии  $U_d=90$  y.e. Позволили установить, что для разных величин  $b_1$  (рис. 2) оценка уровня значимости  $p$  всегда менее 0,05. Следовательно по этому критерию мы имеем разные генеральные совокупности для всех трёх измерений (модельных треморограмм), что представлено в табл. 4.

Действительно, в табл. 4 представлены результаты попарного сравнения всех выборок для разных коэффициентов диссипации  $b_1$  в виде матрицы по критерию Вилкоксона (для связанных выборок и их числе  $n \geq 3$ ), где в последнем столбце демонстрируется все  $p < 0,05$ .

Таблица 4

**Попарное сравнение выборки коэффициента диссипации  $b_1$  по критерию Вилкоксона**

	Число набл.	T	Z	p-уров.
$b_1=1,6 \& b_1=1,8$	17400	73107409	3,89143	0,000100
$b_1=1,6 \& b_1=2,2$	17400	54877462	31,41694	0,000000
$b_2=1,8 \& b_1=2,2$	17400	56485679	28,97918	0,00

**Заключение.** Таким образом, мы показали, что наша двухкластерная трёхкомпарментная модель генерирует сигналы с изменяющимися характеристиками, если мы будем изменять коэффициент диссипации  $b_1$ . В реальных биосистемах все параметры пребывают в непрерывной вариации. Никогда  $b \neq 0$  и это является основой второго постулата ТХС.

Результаты имитационного моделирования демонстрируют влияние разных значений коэффициента диссипации  $b_1$  на изменение объемов квазиаттракторов. Увеличение  $b_1$  приводит к уменьшению объемов и сужению границ квазиаттракторов, что свидетельствует о повышении уровня жесткости в управлении системой регуляции тремора.

Для получения различных показателей ФСО человека (в нашем случае это нервно-мышечная система) необходимо подбирать коэффициенты  $b$  и  $ud$  направленно. Однако, для имитации хаотической динамики эффекты самоорганизации должны проявляться в непрерывной хаотической подстройке параметров модели. Последнее сейчас является объектом моделирования в рамках теории хаоса-самоорганизации с помощью параметров квазиаттракторов. Объемы этих квазиаттракторов и координаты их центров характеризуют эффекты внешних управляющих воздействий.

**Литература**

1. Еськов В.М. Физика и теория хаоса-самоорганизации в изучении живого и эволюции разумной жизни // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2013. № 2. С. 77-95.
2. Еськов В.М., Хадарцев А.А., Гавриленко Т.В., Ватамова С.Н. Вариабельность состояния параметров функциональных систем организма человека на примере произвольных и произвольных движений человека. // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2013: Труды III всероссийской конференции г. Нижний Новгород 24-27 сентября 2013. Нижний Новгород: Институт прикладной физики НИИ РАН, 2013. С. 55–59.
3. Еськов В.М., Хадарцев А.А., Гудков А.В., Гудкова С.А., Сологуб Л.И. Философско-биофизическая интерпретация жизни в рамках третьей парадигмы // Вестник новых медицинских технологий. 2012. Т. 19. № 1. С. 38-41.
4. Еськов В.М., Антонишкис Ю.А., Лобзин Ю.В., Несмеянов А.А., Хадарцев А.А. Новые представления о механизме защитной реакции клеток крови на экстремальное воздействие // Вестник новых медицинских технологий. 2012. Т. 19. № 1. С. 24–28.
5. Еськов В.М., Еськов В.В., Филатова О.Е., Хадарцев А.А. Особые свойства биосистем и их моделирование // Вестник новых медицинских технологий. 2011. Т. 18. №3. С. 331–332.
6. Еськов В.М., Филатова О.Е., Хадарцев А.А., Хадарцева К.А. Фрактальная динамика поведения человекомерных систем // Вестник новых медицинских технологий. 2011. Т. 18. №3. С. 330–331.
7. Eskov V.M. Models of hierarchical respiratory neuron networks // Neurocomputing, 1996. 11. P. 203-226.
8. Eskov V.M., Eskov V.V., Filatova O.E. Characteristic features of measurements and modeling for biosystems in phase spaces of states // Measurement Techniques (Medical and Biological Measurements). 2011. V. 53 (12). P. 1404-1410.
9. Eskov V. M., Gavrilenko T. V., Kozlova V. V., Filatov M. A.. Measurement of the dynamic parameters of microchaos in the behavior of living biosystems // Measurement Techniques. 2012. Vol. 55. №. 9. P. 1096-1100.
10. Eskov V.M., Kulaev S.V., Popov Yu. M., Filatova O.E. Computer technologies in stability measurements on stationary states in dynamic biological systems // Measurement Techniques. 2006. Vol. 49. № 1. P.59–65
11. Prigogine I. The Die Is Not Cast // Futures. Bulletin of the World Futures Studies Federation. 2000. Vol. 25. № 4. P. 17–19.

**References**

1. Es'kov VM. Fizika i teoriya khaosa-samoorganizatsii v izuchenii zhivogo i evolyutsii razumnoy zhizni. Slozhnost'. Razum. Postneklassika. 2013;2:77-95. Russian.
2. Es'kov VM, Khadartsev AA, Gavrilenko TV, Vatamova SN. Variabel'nost' sostoyaniya parametrov funktsional'nykh sistem organizma cheloveka na primere neproizvol'nykh i proizvol'nykh dvizheniy cheloveka. Nelineynaya dinamika v kognitivnykh issledovaniyakh – 2013: Trudy III vserossiyskoy konferentsii g. Nizhniy Novgorod 24-27 sentyabrya 2013. Nizhniy Novgorod: Institut prikladnoy fiziki NII RAN; 2013. Russian.
3. Es'kov VM, Khadartsev AA, Gudkov AV, Gudkova SA, Sologub LI. Filosofsko-biofizicheskaya interpretatsiya zhizni v ramkakh tret'ey paradigmy [Philosophical and biophysical interpretation of life within the framework of third paradigm]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2012;19(1):38-41. Russian.
4. Es'kov VM, Antonishkis YuA, Lobzin YuV, Nesmeyanov AAKhadartsev AA. Novye predstavleniya o mekhanizme zashchitnoy reaktsii kletok krovi na ekstremal'noe vozdeystvie [New representations about the mechanism of protective reaction of blood cells on extreme influence]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2012;19(1):24-8. Russian.
5. Es'kov VM, Es'kov VV, Filatova OE, Khadartsev AA. Osobyie svoystva biosistem i ikh modelirovaniye [Special oriperties of biosystems and their modelling]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2011;18(3):331-2. Russian.
6. Es'kov VM, Filatova OE, Khadartsev AA, Khadartseva KA. Fraktal'naya dinamika povedeniya chelovekomernykh sistem [Fractal dynamics of conduct chelovekomernykh]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2011;18(3):330-1. Russian.
7. Eskov VM. Models of hierarchical respiratory neuron networks. Neurocomputing, 1996;11:203-26.
8. Eskov VM, Eskov VV, Filatova OE. Characteristic features of measurements and modeling for biosystems in phase spaces of states. Measurement Techniques (Medical and Biological Measurements). 2011;53(12):1404-10.
9. Eskov VM, Gavrilenko TV, Kozlova VV, Filatov MA. Measurement of the dynamic parameters of microchaos in the behavior of living biosystems. Measurement Techniques. 2012;55(9):1096-100.
10. Eskov VM, Kulaev SV, Popov YuM, Filatova OE. Computer technologies in stability measurements on stationary states in dynamic biological systems. Measurement Techniques. 2006;49(1):59-65.
11. Prigogine I. The Die Is Not Cast. Futures. Bulletin of the World Futures Studies Federation. 2000;25(4):17-9.