

DOI: 10.12737/10864

ВОЗМОЖНОСТИ СТОХАСТИКИ И ТЕОРИИ ХАОСА В ОБРАБОТКЕ МИОГРАММ

Т.В. ГАВРИЛЕНКО, Д.В. ГОРБУНОВ, К.А. ЭЛЬМАН, В.В. ГРИГОРЕНКО

Сургутский государственный университет, Пр. Ленина, д. 1, г. Сургут, Россия, 628412

Аннотация. В исследованиях используется метод многомерных фазовых пространств. При изучении и моделировании сложных биологических объектов (complexity) возникает возможность внедрения традиционных физических методов в биологические исследования и новых методов на базе теории хаоса-самоорганизации. В работе показана практическая возможность применения метода многомерных фазовых пространств как количественной меры для оценки хаотической динамики на примере работы мышцы (сгибателя мизинца). В качестве меры состояния нервно-мышечной системы человека (слабое напряжение мышцы и сильное, практически максимальное усилие) используются объемы квазиаттракторов многомерных фазовых пространств. Это обеспечивает идентификацию реальных измерений параметров функционального состояния мышцы при слабом ($p=5$ даН) и сильном ($p=10$ даН) статическом напряжении. Была построена временная развертка сигнала, полученного с миографа и были построены автокорреляционные функции $A(t)$ сигнала. В конечном итоге анализ состояния биомеханической системы производился на основе сравнения объема V_G квазиаттрактора, а также на основе анализа энтропии Шеннона H . Объем квазиаттрактора V_G перемещений при слабой нагрузке несколько меньше аналогичным объемам V_G перемещений при сильной нагрузке мышцы сгибателя мизинца, точно так же как и значения энтропии Шеннона при сильной нагрузке увеличивается по сравнению со значениями полученных при слабой нагрузке мышцы.

Ключевые слова: хаос, миограмма, двумерное фазовое пространство.

FEATURES STOCHASTICS AND CHAOS THEORY PROCESSING MYOGRAM

T.V. GAVRILENKO, D.V. GORBUNOV, K.A. ELMAN, V.V. GRIGORENKO

Surgut State University, Lenina, 1, Surgut, Russia, 628412

Abstract. In studies using the method of multi-dimensional phase space. In the study and modeling of complex biological objects (complexity) there is the possibility of introducing traditional physical methods in biological research and new methods based on chaos theory, self-organization. The paper shows the feasibility of applying the method of multi-dimensional phase space as a quantitative measure for the evaluation of chaotic dynamics on the example of the muscles (flexor of the little finger). As a measure of the state of the neuromuscular system of the person (weak muscle tension and strong, almost the maximum force) used quasi-attractors volumes of multidimensional phase space. This enables identification of the actual measurements of the parameters of the functional state with weak muscles ($p = 5$ th Dan) and strong ($P = 10$ daN) static stress. Was built timebase signal obtained with myograph and were built autocorrelation function $A(t)$ signal. In the end analysis of the biomechanical system based on a comparison of volume quasi-attractor, as well as on the basis of analysis of the Shannon entropy N . kvzaziatraktora volume displacement at low load is slightly less than the same amount of displacement under a heavy load of flexor muscles of the little finger, just as the values of the Shannon entropy at a heavy load is increased as compared with the values obtained by the weak muscle load.

Key words: chaos, myogram, two-dimensional phase space.

Введение. Метод многомерных фазовых пространств активно используется в различных исследованиях. При изучении и моделировании сложных биологических объектов возникает возможность внедрения традиционных физических методов в биологические исследования и новых методов теории хаоса-самоорганизации (ТХС) на фоне сравнения их эффективности [6-14]. В представленной работе демонстрируется реализация такого подхода на основе метода анализа двумерных фазовых пространств для изучения особенностей реакции нервно-мышечной системы в ответ на дозированные статистические нагрузки. 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), могут использоваться параметры квазиаттракторов (КА) внутри которых наблюдается движение ВСС в фазовом пространстве состояний (ФПС). Эти движения имеют хаотический характер, т.е. постоянно $dx/dt \neq 0$, но при этом движение ВСС ограничено в ФПС объемом КА [1-7, 17-19].

В задачи настоящего исследования входит доказательство возможности использования в качестве количественной меры, наблюдаемой в экспериментальных измерениях хаотической динамики миограмм мышцы (сгибатель мизинца), величина объемов КА многомерных фазовых пространств. Это обеспечивает идентификацию изменений параметров функционального состояния мышц при слабой и сильной статической нагрузке мышцы (сгибателя мизинца). 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 [15-19]. Именно это пытались выразить ученые университета в Стенфорде [15] при изучении произвольных движений, но они не представили меру для таких измерений электрофизиологических процессов [15-19].

Объекты и методы исследования. Для исследования была привлечена группа испытуемых (15 девушек) в возрасте от 20 до 25 лет. У испытуемых регистрировались миограммы с частотой дискретизации

$\mu = 0.25$ мс. Записи миограмм мышцы (сгибателя мизинца) обрабатывалась программным комплексом для формирования вектора $x = (x_1, x_2)^T$, где $x_1 = x(t)$ – динамика абсолютного значения биопотенциалов мышцы (БПМ) 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 ВСС и определялись объемы полученных КА V_G по формуле $V_G^{\max} \geq \Delta x_1 * \Delta x_2 \geq V_G^{\min}$ [1-6, 8-12], где Δx_1 – вариационный размах величины биопотенциала, а Δx_2 – для его скорости изменения. В конечном итоге анализ состояния биомеханической системы проводился на основе сравнения V_G КА, а также на основе анализа значений энтропии Шеннона H , где H определяется по формуле

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

где p – функция вероятности. Миограммы фиксировали при слабом статическом напряжении мышцы $p=5$ даН и при сильном напряжении $p=10$ даН.

Результаты и их обсуждения. Для визуальной оценки данных, полученных с миографа, строилась временная развертка сигнала (рис. 1-А), которая преобразовывалась дискретизацией сигнала в некоторые числовые ряды (выборки БПМ). При анализе полученных временных рядов по данным с миографии видно, что получаемый сигнал уникален для каждого испытуемого, но при этом сохраняется некоторая закономерность, которая связана с объемом КА V_G в фазовом пространстве x_1 и x_2 (рис. 1-В).

Каждый из векторов перемещения по осям (x_1 и x_2) может образовывать фазовую плоскость, описывающую динамику поведения двумерного ВСС $x = (x_1, x_2)^T$, которая представлена на рис. 1. Из этого рисунка видно, что миограмма имеет некоторое подобие с автокорреляционной функцией $A(t)$ а КА у разных людей группируются в области $x_1 = [240, 750]$ и $x_2 = [-75, 75]$ у.е. при слабом мышечном напряжении. Эти области образуют КА, внешний вид которого представлен на рис. 1-В.

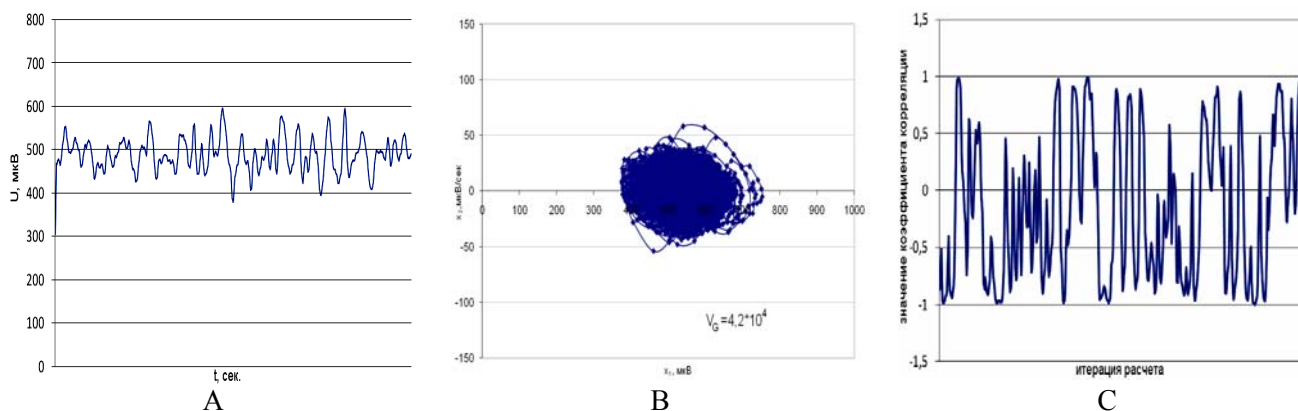


Рис. 1. Результат обработки данных, полученных при слабом напряжении мышцы ($p=5$ даН); испытуемый СКН как типичный пример всей группы: А – временная развертка сигнала; В – фазовые траектории КА; С – автокорреляционная функция сигнала А(t)

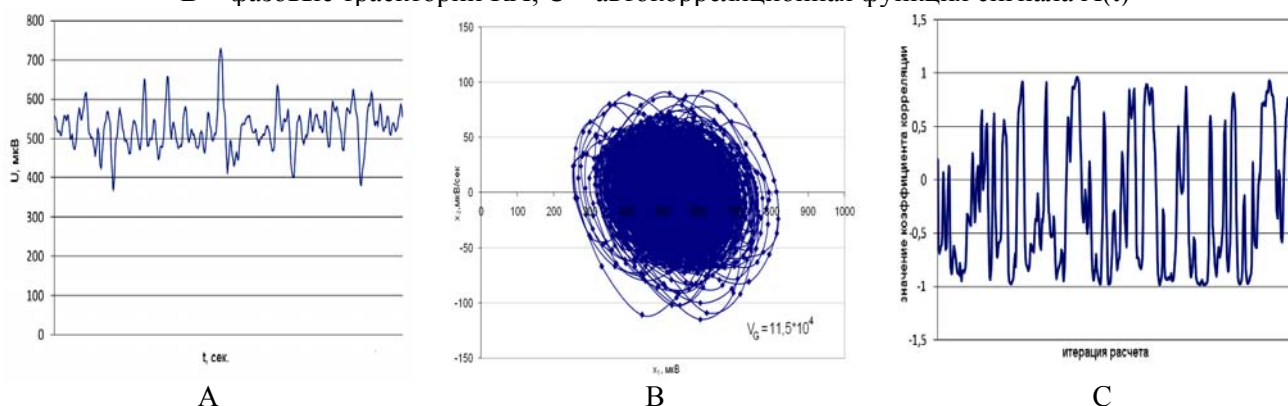


Рис. 2. Результат обработки данных, которые получены при двукратном усилии напряжения мышцы ($p=10$ даН). Здесь испытуемый СКН как типичный пример всей группы: А – временная развертка сигнала; В – фазовые траектории КА; С – автокорреляционная функция сигнала А(t)

Аналогичный анализ всех испытуемых был проведен при сильном напряжении $p=10$ даН. Типичный пример для всех испытуемых представлен на рис. 2 для испытуемого СКН.

Этот рисунок демонстрирует увеличение параметров V_G КА при сильной статической нагрузке ($p=10$ даН) испытуемых в сравнение с V_G КА при слабой статической нагрузке ($p=5$ даН). При сильной статической нагрузке параметры компонент вектора $x(t)$ для КА группируются в области $x_1=[230,850]$ и $x_2=[-125,95]$.

Сравнение площадей V_G для КА представлена в табл. 1. Так же для анализа уровня хаотичности во временной развертке миограмм была рассчитана энтропия Шеннона. Из табл. 1 видно, что энтропия, как и объемы КА, увеличивается с увеличением статической нагрузки от $p=5$ даН до $p=10$ даН. Это объясняется тем, что для

данной группы испытуемых, состоящей из 15 девушек, сильное статическое напряжение ($p=10$ даН) на протяжении 5 сек. является практически максимальным напряжением, в следствии чего происходит увеличение объемов V_G для КА и рост значений энтропии Шеннона [11,12].

Таблица 1

Объемы квазиаттракторов и значения энтропии Шеннона при слабом напряжении и сильном напряжении мышцы сгибателя мизинца

	V_G , при слабой нагрузке	V_G , при сильной нагрузке	Е, энтропия Шеннона при слабой нагрузке	Е, энтропия Шеннона при сильной нагрузке
Испытуемый СКН	$4,2 \times 10^4$	$11,5 \times 10^4$	2,6183	2,7219

В табл. 2 продемонстрирована динамика изменения энтропии Шеннона для всей группы испытуемых. Для 1-го и 2-го столбца распределение E непараметрическое. Более того, различие среднего значения $\langle E \rangle$ при слабой нагрузке ($\langle E \rangle = 2,547$) от таковых для сильного напряжения ($\langle E \rangle = 2,607$) весьма незначительно. Это говорит о слабой чувствительности метода расчета энтропии E . Более того, как видно из табл. 2 динамика изменения значения энтропии Шеннона неустойчива для всей группы, а с позиции статистики различия отсутствуют ($p = 0,68$, при критическом значении $p < 0,05$) [1-6].

Таблица 2

Значения энтропии Шеннона для всей группы испытуемых (15 девушек)

№ испытуемого	E , энтропия Шеннона при слабой нагрузке	E , энтропия Шеннона при сильной нагрузке
1	2.850	2.751
2	2.678	2.656
3	2.867	2.909
4	2.573	2.699
5	2.924	2.752
6	2.753	2.488
7	2.793	2.905
8	1.678	1.919
9	1.678	1.919
10	2.520	2.394
11	2.822	2.817
12	2.736	2.561
13	1.631	2.596
14	2.890	2.882
15	2.816	2.850
среднее	2.547	2.607
медиана	2,7	2,6

Заключение. Исследование подтвердило эффективность применения методов многомерных фазовых пространств в качестве меры динамики изменения миограмм. Площадь КА при слабом напряжении всегда меньше площади КА при сильной нагрузке мышцы сгибателя мизинца, точно так же как и значения энтропии Шеннона при сильном напряжении увеличивается по сравнению со значениями полученных при слабой нагрузке мышцы. Это можно объяснить тем, что приложенная нагрузка $p = 10 \text{ даН}$ при статическом напряжении во-

влекает максимальное число двигательных единиц для испытуемых. При этом мы наблюдаем существенное (почти в 3 раза) увеличение V_G для КА, а рост значений энтропии Шеннона весьма незначительный (на 0,05 у.е).

Литература

1. Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В., Даянова Д.Д., Берестин Д.К. Параметры квазиаттракторов в оценке стационарных режимов биологических динамических систем с позиций компартментно-кластерного подхода // Вестник новых медицинских технологий.– 2014.– Т. 21, № 1.– С. 134–137.
2. Даянова Д.Д., Берестин Д.К., Вохмина Ю.В., Игуменов Д.С. Моделирование показателей функциональных систем организма человека на основе двухкластерной трехкомпаратментной системы управления // Вестник новых медицинских технологий.– 2014.– Т. 21, № 4.– С. 7–10.
3. Даянова Д.Д., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В., Игуменов Д.С. Стохастическая оценка моделей хаотической динамики биологических систем // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание.– 2014.– №1. Публикация 2-19.– <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2014-1/4773.pdf>. (Дата обращения: 30.04.2014). DOI: 10.12737/3861
4. Еськов В.М., Майстренко В.И., Майстренко Е.В., Филатов М.А., Филатова Д.Ю. Исследование корреляции показателей функциональной асимметрии полушарий головного мозга с результатами учебной деятельности учащихся // Вестник новых медицинских технологий.– 2007.– Т. 14, № 3.– С. 205–207.
5. Еськов В.М., Нанченко Е.А., Козлова В.В., Климов О.В., Майстренко Е.В. Параметры квазиаттракторов поведения вектора состояния организма пловцов // Вестник новых медицинских технологий.– 2009.– Т. 16, № 4.– С. 24–26.
6. Еськов В.М., Брагинский М.Я., Козлова В.В., Майстренко Е.В. Диагностика физиологических функций женщин-пловцов югры методом расчета матриц межкластерных расстояний // Системный

анализ и управление в биомедицинских системах.– 2010.– Т. 9, № 3.– С. 500–504.

7. Еськов В.М., Еськов В.В., Козлова В.В., Филатов М.А. Способ корректировки лечебного или физкультурно-спортивного воздействия на организм человека в фазовом пространстве состояний с помощью матриц расстояний // патент на изобретение RUS 2432895 от 09.03.2010 г.

8. Еськов В.М., Еськов В.В., Филатова О.Е. Способ корректировки лечебного или лечебно-оздоровительного воздействия на пациента // патент на изобретение RUS 2433788 от 01.02.2010 г.

9. 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.

10. 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.

11. Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Зимин М.И. Неопределенность в квантовой механике и биофизике сложных систем // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия.– 2014.– № 5.– С. 41–46.

12. Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вахмина Ю.В. Кинематика биосистем как эволюция: стационарные режимы и скорость движения сложных систем – complexity // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.– 2015.– № 2.– С. 62–73.

13. Козупица Г.С., Даянова Д.Д., Бурькин Ю.Г., Берестин Д.К. Компарментно-кластерное моделирование неопределённостей в рамках детерминизма // Сложность. Разум. Постнеклассика.– 2014.– № 2.– С. 68–80.

14. Нифонтова О.Л., Бурькин Ю.Г., Майстренко Е.В., Хисамова А.В. Системный анализ в сравнительной оценке антропометрических показателей детей школьного возраста Тюменского севера // Информатика и системы управления.– 2010.– № 2.– С. 167–170.

15. Churchland M.M., Cunningham J.P., Kaufmann M.T. Neural population dynamics

during reaching // Nature.– 2012.– V. 487.– P. 51–56.

16. Eskov V.M., Filatova O.E. Respiratory rhythm generation in rats: the importance of inhibition // Neurophysiology.– 1993.– Т. 25, № 6.– P. 420.

17. 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.– Т. 49, № 1.– P. 59–65.

18. Eskov V.M., Eskov V.V., Filatova O.E. Medical and biological measurements: characteristic features of measurements and modeling for biosystems in phase spaces of states // Measurement Techniques.– 2011.– Т. 53, № 12.– P. 1404–1410.

19. Eskov V.M., Eskov V.V., Braginskii M.Ya., Pashnin A.S. Determination of the degree of synergism of the human cardiorespiratory system under conditions of physical effort // Measurement Techniques.– 2011.– Т. 54, № 8.– P. 832–837.

References

1. Gavrilenco TV, Vokhmina YuV, Dayanova DD, Berestin DK. Parametry kvaziattraktorov v otsenke statsionarnykh rezhimov biologicheskikh dinamicheskikh sistem s pozitivnyy kompartmentno-klasterного podkhoda. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2014;21(1):134-7. Russian.

2. Dayanova DD, Berestin DK, Vokhmina YuV, Igumenov DS. Modelirovanie pokazateley funktsional'nykh sistem organizma cheloveka na osnove dvukhklasterной trekhkompartmentnoy sistemy upravleniya. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2014;21(4):7-10. Russian.

3. Dayanova DD, Gavrilenco TV, Vokhmina YuV, Igumenov DS. Stokhasticheskaya otsenka modeley khaoticheskoy dinamiki biologicheskikh sistem. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. Elektronnoe izdanie [Internet]. 2014 [cited 30 apr 2014];1:[about 6 p.]. Russian. Available from: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2014-1/4773.pdf>. DOI: 10.12737/3861

4. Es'kov VM, Maystrenko VI, Mays-

trenko EV, Filatov MA, Filatova DYU. Issledovanie korrelyatsii pokazateley funktsional'noy asimmetrii polushariy golovnoy mozga s rezul'tatami uchebnoy deyatel'nosti uchashchikhsya. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2007;14(3):205-7. Russian.

5. Es'kov VM, Nanchenko EA, Kozlova VV, Klimov OV, Maystrenko EV. Parametry kvaziattraktorov povedeniya vektora sostoyaniya organizma plovtsov. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2009;16(4):24-6. Russian.

6. Es'kov VM, Braginskiy M., Kozlova VV, Maystrenko EV. Diagnostika fiziologicheskikh funktsiy zhenshin-plovtsov yugry metodom rascheta matrits mezhklasternykh rasstoyaniy. Sistemnyy analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh. 2010;9(3):500-4. Russian.

7. Es'kov VM, Es'kov VV, Kozlova VV, Filatov MA, inventors. Sposob korrektyrovki lechebnogo ili fizkul'turno-sportivnogo vozdeystviya na organizm cheloveka v fazovom prostranstve sostoyaniy s pomoshch'yu matrits rasstoyaniy. Russian federation patent RU 2432895. 2010. Russian.

8. Es'kov VM, Es'kov VV, Filatova OE, inventors; Sposob korrektyrovki lechebnogo ili lechebno-ozdorovitel'nogo vozdeystviya na pacienta. Russian Federation patent RU 2433788. 2010. Russian.

9. Es'kov VM, Filatova OE, Khadartsev AA, Khadartseva KA. Fraktal'naya dinamika povedeniya chelovekomernykh sistem. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2011;18(3):330-1. Russian.

10. Es'kov VM, Es'kov VV, Filatova OE, Khadartsev AA. Osobyie svoystva biosistem i ikh modelirovanie. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2011;18(3):331-2. Russian.

11. Es'kov VM, Es'kov VV, Gavrilenko TV, Zimin MI. Neopredelennost' v kvanto-

voy mekhanike i biofizike slozhnykh sistem. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3: Fizika. Astronomiya. 2014;5:41-6. Russian.

12. Es'kov VM, Es'kov VV, Gavrilenko TV, Vakhmina YuV. Kinematika biosistem kak evolyutsiya: statsionarnye rezhimy i skorost' dvizheniya slozhnykh sistem – complexity. Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 3. Fiz. Astron. 2015;2:62-73. Russian.

13. Kozupitsa GS, Dayanova DD, Burykin YuG, Berestin DK. Kompartmentno-klasternoe modelirovanie neopredelennostey v ramkakh determinizma. Slozhnost'. Razum. Postneklassika. 2014;2:68-80. Russian.

14. Nifontova OL, Burykin YuG, Maystrenko EV, Khisamova AV. Sistemnyy analiz v sravnitel'noy otsenke antropometricheskikh pokazateley detey shkol'nogo vozrasta Tyumenskogo severa. Informatika i sistemy upravleniya. 2010;2:167-70. Russian.

15. Churchland MM, Cunningham JP, Kaufmann MT. Neural population dynamics during reaching. Nature. 2012;487:51-6.

16. Eskov VM, Filatova OE. Respiratory rhythm generation in rats: the importance of inhibition. Neurophysiology. 1993;25(6):420.

17. 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.

18. Eskov VM, Eskov VV, Filatova OE. Medical and biological measurements: characteristic features of measurements and modeling for biosystems in phase spaces of states. Measurement Techniques. 2011;53(12):1404-10.

19. Eskov VM, Eskov VV, Braginskii MYa, Pashnin AS. Determination of the degree of synergism of the human cardiorespiratory system under conditions of physical effort. Measurement Techniques. 2011;54(8):832-7.