

МЕТОД МНОГОМЕРНЫХ ФАЗОВЫХ ПРОСТРАНСТВ В ОЦЕНКЕ ХАОТИЧЕСКОЙ
ДИНАМИКИ ТРЕМОРА В УСЛОВИЯХ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

А.Е. БАЖЕНОВА, Е.С. ШЕРСТЮК, А.А. МИРЮГИН, Е.С. ПОТЕТЮРИНА

*БУ ВО Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет»,
пр-т Ленина, 1, г. Сургут, Россия, 628412, тел.: +79224121944, e-mail: yuliya-bashkatova@yandex.ru*

Аннотация. Показана практическая возможность применения метода многомерных фазовых пространств, основанная на методах расчета параметров квазиаттракторов, как количественной меры хаотической динамики тремора. В качестве такой меры используют площади квазиаттракторов в двухмерном фазовом пространстве. Это обеспечивает идентификацию реальных изменений параметров функционального состояния организма без нагрузки и в условиях статических нагрузок. Конкретно, статическая нагрузка приводит к трехкратному увеличению площади квазиаттрактора (от 0,31 у.е. до 0,99 у.е. при нагрузке в 300 г). Это является количественной мерой реакции организма на изменения. Доказано, что расчет параметров квазиаттракторов в трехмерном фазовом пространстве дает более устойчивую статистическую картину квазиаттрактора, чем в двухмерном.

Ключевые слова: квазиаттрактор, тремор, статическая нагрузка, матрица.

THE METHOD OF MULTIDIMENSIONAL PHASE SPACE IN THE ASSESSMENT OF
CHAOTIC DYNAMICS OF TREMOR IN THE STATIC LOADS

A.E. BAZHENOVA, E.S. SHERSTEUK, A.A. MIRUGIN, E.S. POTETEURINA

*Surgut State University, Lenin av., 1, Surgut, Russia, 628400
Phone: +79224121944, e-mail: yuliya-bashkatova@yandex.ru*

Abstract. The article presents the feasibility of application of the method of multidimensional phase spaces, based on the methods of calculating the quasi-attractor parameters as a quantitative measure of the chaotic dynamics of the tremor. The measure is used in two-dimensional quasi-attractor phase space. The quasi-attractor square is used for the identification of the actual changes in the parameters of the functional state of the organism with no load and under static loads. Specifically, the static load provides the threefold increasing of the area of quasi-attractor (from 0.31 to 0.99 cu under load of 300 g). This is a quantitative measure of the body's reaction to changes. It was proved that calculation of quasi-attractor parameters demonstrated at three phase space more statistical stable picture than two dimensional quasi-attractors.

Key words: quasi-attractor, tremor, static load, matrix.

Введение. Изучение функционального состояния организма человека в условиях выполнения специфических двигательных задач представляет особый интерес в рамках *теории хаоса и самоорганизации* (ТХС) [4, 14]. Новый подход в рамках ТХС позволяет прогнозировать возможные изменения регуляторных систем *нервно-мышечной системы* (НМС) человека, как наиболее важной в аспекте жизнеобеспечения *функциональной системы организма* (ФСО) по П.К. Анохину [1]. Так информация о текущей динамике исследуемых функций может обеспечить прогноз развития жизни человека и оценить ее качество в различные возрастные периоды жизни [9, 11-12, 18, 19].

Физиологический поструральный тремор является неотъемлемой функцией опорно-двигательного аппарата, который находится под влиянием внутренних и внешних факторов. К наиболее важным внутренним факторам относят вариабельность сердечного ритма, перистальтику кишечника, зрительное восприятие окружающей среды [15]. К внешним воздействиям относятся средовые факторы, физическая нагрузка, стрессы. Ряд авторов отмечают влияние медикаментозных препаратов и искусственно создаваемого психического состояния на спектральные характеристики треморограмм [8].

Метод многомерных фазовых пространств активно используется в различных физических исследованиях [2, 5, 10, 12, 14]. При изучении и моделировании биологических объектов возникает возможность внедрения традиционных и новых физических методов в биологические исследования [6]. В данной работе предлагается реализация такого подхода на основе метода двухмерного фазового пространства для изучения особенностей реакции НМС в ответ на дозированные статические нагрузки. Предлагается вместо традиционных пониманий стационарных режимов биосистем $dx/dt=0$, где $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ является *вектором состояния системы* (ВСС), использовать параметры *квазиаттракторов* (КА), внут-

ри которых наблюдается движения ВСС в *фазовом пространстве состояний* (ФПС). Эти движения имеют хаотический характер, т.е. постоянно $dx/dt \neq 0$, но это движение ограничено объемом КА [3, 5-11, 17-18].

Цель исследования: изучение особенности динамики поведения параметров КА, описывающих микродвижения конечности человека в условиях статических нагрузок, используя их площади, которые обеспечивают идентификации реальных измерений параметров ФСО без нагрузки и в условиях воздействия статических нагрузок.

Объекты и методы исследования. Для исследования была привлечена группа испытуемых в количестве 15 человек, основной группы здоровья. У испытуемых регистрировались параметры тремора с помощью биофизического измерительного комплекса, разработанного в лаборатории биокриобиологии и биофизики сложных систем при СурГУ. Установка включает металлическую пластинку (крепится жестко к пальцу испытуемого), токовихревой датчик, усилитель, *аналого-цифровой преобразователь* (АЦП) и компьютер с оригинальным программным обеспечением. В качестве фазовых координат, помимо координаты $x_1=x(t)$ перемещения, использовалась координата скорости перемещения пальца $x_2=v(t)=dx_1/dt$ [10, 13, 15-18].

Тремор регистрировался без нагрузки и в условиях статических нагрузок, которые представляли собой удержание груза в 300 г, подвешенного на указательном пальце кисти, в течение 5 секунд. Испытуемые проходили эксперимент 15 раз без нагрузки и столько же в условиях статических нагрузок. Перед испытуемыми стояла задача удержать палец в пределах заданной области, осознанно контролируя его неподвижность. Обработка данных и регистрация тремора конечности испытуемых проводилась на ЭВМ с использованием программы «Charts3». С помощью этой программы осуществлялся анализ данных по временным и спектральным характеристикам кинематограмм испытуемых, в низко-, средне- и высокочастотном диапазонах. Благодаря запатентованному программному продукту удалось построить фазовые плоскости и рассчитать площади КА [5, 10].

Статистическая обработка данных осуществлялась при помощи программного пакета «Statistica 10». Анализ соответствия вида распределения полученных данных закону нормального распределения производился на основе вычисления критерия Шапиро-Уилка. Дальнейшие исследования производились методами непараметрической статистики (критерий Вилкоксона) [7].

Результаты исследования и их обсуждение. Для КА с координатами $x_1=x(t)$ и $x_2=v(t)=dx_1/dt$, были рассчитаны площади $\Delta S=\Delta x_1 \times \Delta x_2$. В качестве примера взяты значения площадей КА испытуемого ААЕ представленных в таблице 1. Всего подобных таблиц было получено $N=15$, при этом в каждой серии мы выполняли 15 измерений.

При расчете среднего значения площадей ($\langle S \rangle$) и стандартного отклонения (σ, \pm), были получены следующие данные: $\langle S \rangle$ без нагрузки $0,31 \times 10^{-6} \pm 0,24 \times 10^{-6}$; $\langle S \rangle$ в условиях статической нагрузки $1,06 \times 10^{-6} \pm 0,53 \times 10^{-6}$, свидетельствующие о том, что в условиях воздействия статической нагрузки КА увеличивается в 3,4 раза.

Таблица 1

Площади ($S \times 10^{-6}$) квазиаттракторов испытуемого ААЕ (число повторов $N=15$)

| № изм. | Без нагрузки | Нагрузка 300 г |
|---------------------|--------------|----------------|
| 1 | 0,36 | 1,62 |
| 2 | 0,30 | 0,74 |
| 3 | 0,27 | 1,29 |
| 4 | 0,32 | 1,27 |
| 5 | 0,75 | 0,75 |
| 6 | 0,30 | 1,68 |
| 7 | 0,11 | 0,85 |
| 8 | 0,23 | 1,06 |
| 9 | 0,20 | 0,87 |
| 10 | 0,15 | 0,56 |
| 11 | 0,96 | 0,77 |
| 12 | 0,17 | 0,67 |
| 13 | 0,16 | 1,27 |
| 14 | 0,23 | 0,62 |
| 15 | 0,09 | 0,80 |
| $\langle S \rangle$ | 0,31 | 0,99 |
| σ, \pm | 0,24 | 0,36 |

На основании среднего значения площадей КА, были выбраны приближенные значения по всем 15-ти сериям проделанных испытаний, и построены фазовые параметры движения пальцев рук без нагрузки и в условиях статической нагрузки. Характерный пример представлен на рис. 1 для регистрации площади КА, а на рис. 2 – для регистрации объема V_G КА. Расчет объемов V_G для КА более предпочтителен, т.к. они менее подвержены вариациям и возмущениям (параметры объемов V_G для КА даже устойчивее в статистическом плане).

Из рис. 1 и 2 видно, что в условиях воздействия статической нагрузки площадь КА и его V_G характеризуется большим значением ($1,06 \times 10^{-6}$; $0,39 \times 10^{-6}$) и имеет область больших значений x и y , чем КА и V_G испытуемого без нагрузки ($0,32 \times 10^{-6}$; $0,11 \times 10^{-6}$).

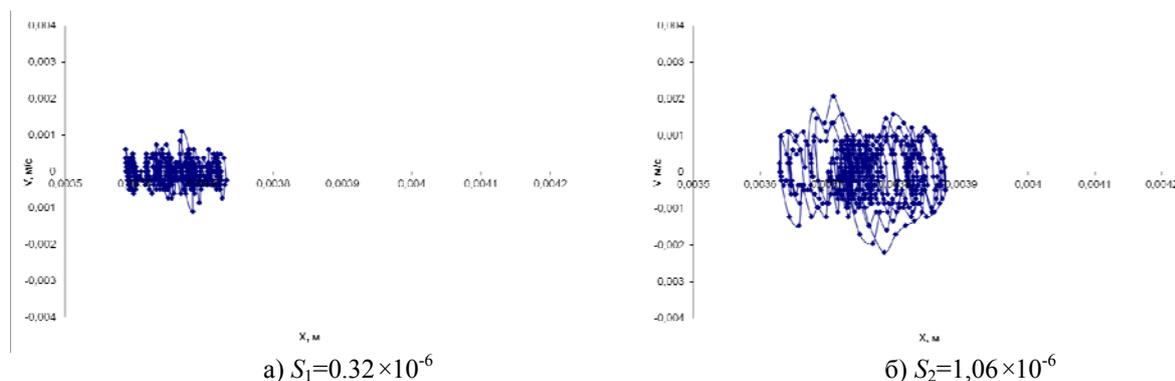


Рис. 1. Фазовые параметры движения пальцев руки для S КА испытуемого ААЕ: а) без нагрузки; б) в условиях нагрузки 300 г

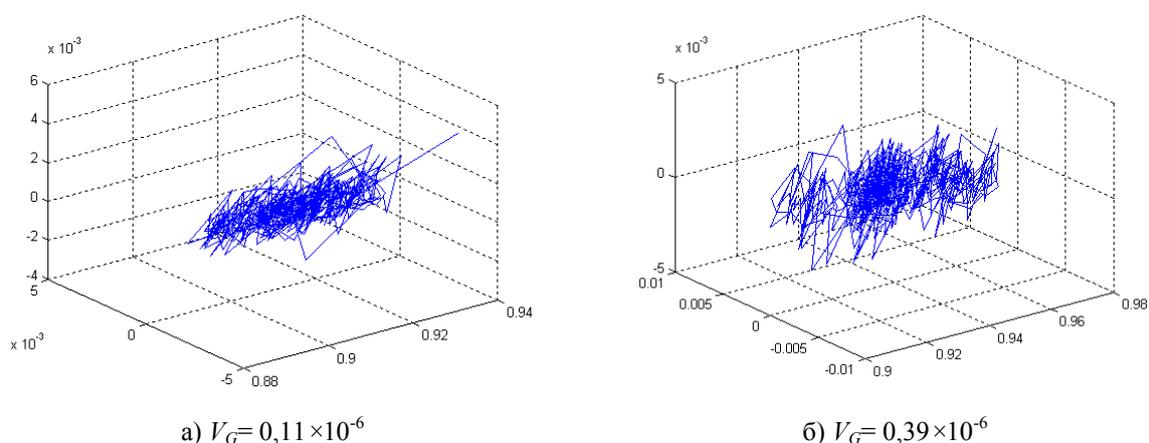


Рис. 2. Фазовые параметры движения пальцев руки для V_G КА испытуемого ААЕ: а) без нагрузки; б) в условиях нагрузки 300 г

Так же была проведена проверка статистических различий значения S КА треморограмм. В результате сравнения выборок площадей КА испытуемого по критерию Вилкоксона был получен уровень значимости $p=0,002$, который меньше критического уровня ($p<0,05$).

При использовании непараметрического парного сравнения с помощью критерия Вилкоксона были получены 15 таблиц, в которых представлены результаты матриц (15×15) парного сравнения треморограмм всех испытуемых. Динамика произвольных микродвижений конечностей (тремора пальцев рук), как реакция на статическую нагрузку, проявлялась в изменении числа совпадений произвольных пар выборок (k), которые (пары) можно отнести к одной генеральной совокупности. Их число увеличивается с $\langle k \rangle = 2,3 \pm 1,67$ совпадений без нагрузки до $\langle k \rangle = 3,4 \pm 1,45$ совпадений в условиях статической нагрузки. Новая методика расчета матрицы парных сравнений выборок позволяет оценить влияние статических нагрузок на ФСО.

Выводы:

1. Используя площади КА, в качестве количественной меры наблюдаемой динамики тремора, было выявлено, что в условиях статической нагрузки КА увеличивается в 3,4 раза и имеет область боль-

ших значений x и y . Так же, при статистическом сравнении S КА, было выявлено, что они в ряде случаев принадлежат к разным генеральным совокупностям.

2. Прослеживается динамика увеличения число пар совпадений выборок треморограмм в условиях статической нагрузки.

3. Расчет параметров КА в трехмерном фазовом пространстве дает более устойчивую статистическую картину КА.

Литература

1. Анохин П.К. Кибернетика функциональных систем. М.: Медицина, 1998. 285 с.
2. Брагинский М.Я., Балтикова А.А., Козлова В.В., Майстренко Е.В. Исследование функциональных систем организма студентов Югры в условиях мышечной нагрузки методом фазового пространства // Современные наукоемкие технологии. 2010. № 12. С. 23–24.
3. Гавриленко Т.В., Балтикова А.А., Дегтярев Д.А., Еськов В.В., Пашнин А.С. Хаотическая динамика произвольных движений конечности человека в 4-мерном фазовом пространстве // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2012. №1. С. 85–93.
4. Добрынина И.Ю., Горбунов Д.В., Козлова В.В., Синенко Д.В., Филатова Д.Ю. Особенности кардиоинтервалов: хаос и стохастика в описании сложных биосистем // Вестник новых медицинских технологий. 2015. Т. 22, №2. С. 19–26.
5. Еськов В.М., Филатова О.Е., Фудин Н.А., Хадарцев А.А. Новые методы изучения интервалов устойчивости биологических динамических систем в рамках компартментно-кластерного подхода // Вестник новых медицинских технологий. 2004. Т. 11, №3. С. 5–6.
6. Еськов В.М., Еськов В.В., Хадарцев А.А., Филатов М.А., Филатова Д.Ю. Метод системного синтеза на основе расчета межаттракторных расстояний в гипотезе равномерного и неравномерного распределения при изучении эффективности кинезитерапии // Вестник новых медицинских технологий. 2010. Т. 17, №3. С. 106–110.
7. Еськов В.М., Буров И.В., Филатова О.Е., Хадарцев А.А. Основы биоинформационного анализа динамики микрохаотического поведения биосистем // Вестник новых медицинских технологий. 2012. Т. 19, №1. С. 15–18.
8. Еськов В.М., Хадарцев А.А., Филатова О.Е., Хадарцева К.А. Околосуточные ритмы показателей кардиореспираторной системы и биологического возраста человека // Терапевт. 2012. №8. С. 36–43.
9. Системный анализ, управление и обработка информации в биологии и медицине. Том 11. Системный синтез параметров функций организма жителей Югры на базе нейрокомпьютинга и теории хаоса-самоорганизации в биофизике сложных систем / Еськов В.М., Хадарцев А.А., Козлова В.В., Филатов М.А. [и др.]. Самара: Офорт, 2014. 192 с.
10. Еськов В.М., Еськов В.В., Филатова Д.Ю., Нехайчик С.В. Новый метод использования нейромодуляторов в психофизиологии // Вестник новых медицинских технологий. 2014. Т. 21, №3. С. 7–12.
11. Еськов В.М., Еськов В.В., Филатова О.Е., Филатова Д.Ю. Сравнительная характеристика возрастных изменений сердечно-сосудистой системы населения Севера РФ // Вестник новых медицинских технологий. 2015. Т. 22, №3. С. 15–20.
12. Еськов В.М., Еськов В.В., Вохмина Ю.В., Гавриленко Т.В. Эволюция хаотической динамики коллективных мод как способ описания поведения живых систем // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2016. №2.
13. Еськов В.М., Газя Г.В., Майстренко Е.В., Болтаев А.В. Влияние промышленных электромагнитных полей на параметры сердечно-сосудистой системы работников нефтегазовой отрасли // Экология и промышленность России. 2016. №1. С. 59–63.
14. Живогляд Р.Н., Хадарцева К.А., Живаева Н.В., Сорокина Л.С. Хаотическая динамика параметров нейровегетативной системы жителей Югры в норме и при патологии // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2014. №3. С. 17–24.
15. Карпин В.А., Башкатова Ю.В., Коваленко Л.В., Филатова Д.Ю. Состояние сердечно-сосудистой системы тренированных и нетренированных студентов с позиции стохастики и теории хаоса // Теория и практика физической культуры. 2015. №3. С. 83–85.
16. Козлова В.В., Голушков В.Н., Ведясова О.А., Майстренко Е.В. Измерение расстояний между центрами квазиаттракторов вектора состояния организма тренированных и нетренированных г.Самары и г.Сургута // Ученые заметки ТОГУ. 2010. Т. 1, №1. С. 27–30.
17. Козулица Г.С., Ватамова С.Н., Гараева Г.Р., Филатов М.А., Шумилов С.П. Теория хаоса-самоорганизации в описании функциональных систем организма человека // Вестник новых медицинских технологий. 2014. Т. 21, №2. С. 15–20.

18. Khadartsev A.A., Nesmeyanov A.A., Eskov V.M., Fudin N.A., Kozhemov A.A. The foundations of athletes' training based on chaos theory and self-organization // Theory and Practice of Physical Culture. 2013. № 9. С. 23.

19. Кидалов В.Н., Хадарцев А.А., Якушина Г.Н. Саногенез и саногенные реакции эритрона. Проблемы медицины и общее представление о саногенезе // Вестник новых медицинских технологий. 2005. Т.12, №3-4. С. 5-9.

References

1. Anokhin PK. Kibernetika funktsional'nykh sistem. Moscow: Meditsina, 1998. Russian.
2. Braginskiy MY, Baltikova AA, Kozlova VV, Maystrenko EV. Issledovanie funktsional'nykh sistem organizma studentov Yugry v usloviyakh myshechnoy nagruzki metodom fazovogo prostranstva. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2010;12:23-4. Russian.
3. Gavrilenko TV, Baltikova AA, Degtyarev DA, Es'kov VV, Pashnin AS. Khaoticheskaya dinamika neproizvol'nykh dvizheniy konechnosti cheloveka v 4-mernom fazovom prostranstve. Slozhnost'. Razum. Postneklassika. 2012;1:85-93. Russian.
4. Dobrynina IY, Gorbunov DV, Kozlova VV, Sinenko DV, Filatova DY. Osobennosti kardiointervalov: khaos i stokhastika v opisani slozhnykh biosistem. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2015;22(2):19-26. Russian.
5. Es'kov VM, Filatova OE, Fudin NA, Khadartsev AA. Novye metody izucheniya intervalov ustoychivosti biologicheskikh dinamicheskikh sistem v ramkakh kompartmentno-klasternogo podkhoda. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2004;11(3):5-6. Russian.
6. Es'kov VM, Es'kov VV, Khadartsev AA, Filatov MA, Filatova DY. Metod sistemnogo sinteza na osnove rascheta mezhattraktornykh rasstoyaniy v gipoteze ravnomernogo i neravnomernogo raspredeleniya pri izuchenii effektivnosti kineziterapii. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2010;17(3):106-10. Russian.
7. Es'kov VM, Burov IV, Filatova OE, Khadartsev AA. Osnovy bioinformatsionnogo analiza dinamiki mikrokhaoiticheskogo povedeniya biosistem. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2012;19(1):15-8. Russian.
8. Es'kov VM, Khadartsev AA, Filatova OE, Khadartseva KA. Okolosutochnye ritmy pokazateley kardiopul'monnoy sistemy i biologicheskogo vozrasta cheloveka. Terapevt. 2012;8:36-43. Russian.
9. Es'kov VM, Khadartsev AA, Kozlova VV, Filatov MA, et al. Sistemnyy analiz, upravlenie i obrabotka informatsii v biologii i meditsine. Tom 11. Sistemnyy sintez parametrov funktsiy organizma zhiteley Yugry na baze neyrokomp'yutinga i teorii khaosa-samoorganizatsii v biofizike slozhnykh sistem. Samara: Ofort; 2014. Russian.
10. Es'kov VM, Es'kov VV, Filatova DY, Nekhaychik SV. Novyy metod ispol'zovaniya neyroemulyatorov v psikhofiziologii. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2014;21(3):7-12. Russian.
11. Es'kov VM, Es'kov VV, Filatova OE, Filatova DY. Sravnitel'naya kharakteristika vozrastnykh izmeneniy serdechno-sosudistoy sistemy naseleniya Severa RF. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2015;22(3):15-20. Russian.
12. Es'kov VM, Es'kov VV, Vokhmina YV, Gavrilenko TV. Evolyutsiya khaoticheskoy dinamiki kollektivnykh mod kak sposob opisaniya povedeniya zhivykh sistem. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya. 2016;2. Russian.
13. Es'kov VM, Gazya GV, Maystrenko EV, Boltaev AV. Vliyanie promyshlennykh elektromagnitnykh poley na parametry serdechnososudistoy sistemy rabotnikov neftegazovoy otrasli. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2016;1:59-63. Russian.
14. Zhivoglyad RN, Khadartseva KA, Zhivaeva NV, Sorokina LS. Khaoticheskaya dinamika parametrov neyrovegetativnoy sistemy zhiteley Yugry v norme i pri patologii. Slozhnost'. Razum. Postneklassika. 2014;3:17-24. Russian.
15. Karpin VA, Bashkatova YV, Kovalenko LV, Filatova DY. Sostoyanie serdechno-sosudistoy sistemy trenirovannykh i netrenirovannykh studentov s pozitsii stokhastiki i teorii khaosa. Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury. 2015;3:83-5. Russian.
16. Kozlova VV, Golushkov VN, Vedyasova OA, Maystrenko EV. Izmerenie rasstoyaniy mezhdru tsen-trami kvaziattraktorov vektora sostoyaniya organizma trenirovannykh i netrenirovannykh g.Samary i g.Surguta. Uchenye zametki TOGU. 2010;1(1):27-30. Russian.
17. Kozupitsa GS, Vatomova SN, Garaeva GR, Filatov MA, Shumilov SP. Teoriya khaosa-samoorganizatsii v opisani funktsional'nykh sistem organizma cheloveka. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2014;21(2):15-20. Russian.
18. Khadartsev AA, Nesmeyanov AA, Eskov VM, Fudin NA, Kozhemov AA. The foundations of athletes' training based on chaos theory and self-organization. Theory and Practice of Physical Culture. 2013;9:23.
19. Kidalov VN, Khadartsev AA, Yakushina GN. Sanogenez i sanogennye reaktsii eritrona. Problemy meditsiny i obshchee predstavlenie o sanogenezе. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2005;12(3-4):5-9. Russian.

Библиографическая ссылка:

Баженова А.Е., Шерстюк Е.С., Мирюгин А.А., Потетюрин Е.С. Метод многомерных фазовых пространств в оценке хаотической динамики тремора в условиях статических нагрузок // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2016. №1. Публикация 1-5. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2016-1/1-5.pdf> (дата обращения: 16.03.2016). DOI: 10.12737/18603.