

III. МАТЕМАТИКА В ОПИСАНИИ ХАОСА И СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА НЕПРОИЗВОЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ КОНЕЧНОСТИ ЧЕЛОВЕКА В 4-МЕРНОМ ФАЗОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Гавриленко Т.В., Балтикова А.А., Дегтярев Д.А., Еськов В.В., Пашин А.С.

ГБОУ ВПО «Сургутский государственный университет ХМАО – Югры»

Постулируется: классические стохастические подходы не столь эффективны в исследовании человеческих движений. Мы представляем реальные экспериментальные данные и интерпретацию полученных результатов с помощью традиционного стохастического подхода и согласно принципу нового подхода связанного с самоорганизацией и хаотической интерпретацией поведения сложных биосистем. Рассматриваются результаты применения методов хаоса при физиологических исследованиях тремора.

Ключевые слова: самоорганизация, фазовое пространство, вектор состояния, хаос.

Введение

Общие экспериментальные положения авторов были представлены в предыдущих работах [10] в соответствии с двумя основными парадигмами: стохастической и хаотической-самоорганизационной (хаос - сложность). Авторам этой статьи представляется, что природа имеет огромный класс систем, обладающих свойствами хаоса и самоорганизации, такие системы не могут быть изучены и смоделированы детерминированными или стохастическими методами. Мы должны измерять микро-хаотические движения вектора состояния каждой биосистемы и представлять такие движения, как равномерное распределение в рамках некоторого фазового пространства состояний. Ниже представлены иллюстрации наших предположений на основе тремора [7,9]. Однако, сейчас для нас очевидно, что некоторые периодические движения (как иллюзия) вектора состояния биосистемы в фазовом пространстве состояний могут быть суперпозицией хаотических и периодических движений (последние также имеют хаотические вариации).

Хорошо известно, что многие исследователи представляют физиологический тремор как хаотические, произвольные движения. Это похоже на правду, потому что человек не может контролировать его и все характеристики такого движения, вообще говоря, не зависят от нашего сознания (но некоторыми параметрами тремора мы можем управлять).

Если мы рассмотрим специальные задачи, такие как удержание цели (например, спорт, специальная подготовка войск в армии), мы можем получить некоторые различные артефакты и своеобразные результаты. Если рассматривать физиологический тремор как процесс мышечного контроля, тогда можно исследовать его на произвольном уровне. Действительно, что представляет собой тремор: произвольные или произвольные движения. Ответ на этот вопрос связан с другим очень важным вопросом: является ли основой хаоса во всех человеческих движениях физиологический тремор? Обсуждение некоторых новых результатов в соответствии со стохастическим подходом и подходом, связанным с самоорганизацией (микро-хаос) сейчас нами представляется как новая, современная теория хаоса и самоорганизации (TCS) [2,9,11,12].

1. Результаты хаотического (в расчетах квазиаттракторов) анализа параметров микродвижений конечности человека под статической нагрузкой.

Продолжительное время существовала дискуссия о произвольности и произвольности в организации тремора человека (произвольные постральные микро-движения, в то время как человек в нормальном физиологическом состоянии пытается удерживать свои конечности в окрестности точки (или внутри заданного объема)). Теперь для нас это очевидно, мы разрешили эту проблему в рамках парадигмы самоорганизации. Для нас, очевидно, что вектор состояния человека, как биомеханической системы $x(t)$ (поведение биомеханической системы при обеспечении

строгого удержания человеческой руки в заданной точке пространства), выполняет хаотические движения внутри фазового пространства состояний. Координатами (задача решается, например, в спорте) такого фазового пространства являются значения координат перемещения точки пространства) выполняет хаотические движения внутри фазового пространства. Координатами (задача действует, например, в спорте) такого фазового пространства являются значения координат перемещения $x(t)=x_1(t)$ и скорости $v(t)=x_2(t)$ такого движения ($v(t)=dx/dt$). Координаты $x(t)=x_1$ и $v(t)=x_2$ вектора состояния человека x непрерывно и хаотично движутся в фазовом пространстве (постоянно изменяется объем квазиаттрактора V_G). Такое состояние хаоса присутствует непрерывно в объеме V_G и мы отрицаем стабильное состояние $x(t)$, т.е. $dx/dt \neq 0$. Таким образом, фундаментальным утверждением авторов (в соответствии с теорией хаоса и самоорганизации) является: для любого периода существования живой биосистемы, т.е. всегда $dx/dt \neq 0$ и $x(t) \neq const$. Более того, для любого начального состояния системы (при $t=0$) мы всегда должны определять параметры квазиаттрактора (V_G и его координаты его центра). Мы полагаем, что конкретное состояние системы $x(t_i)$ не несет никакой информационной нагрузки для исследователей (2-ой постулат ТХС, представленный В.М. Еськовым).

Целью данной работы является исследование особенностей хаотической динамики показателей микро-движения конечностей человека при статической нагрузке в соответствии с современной теорией хаоса и самоорганизации. Метод многомерного фазового пространства мы представляем на примере биомеханической системы.

Для визуальной оценки интенсивности дрейфа в пространстве с помощью ЭВМ строилась временная развертка сигнала и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), позволяющая оценить амплитуду колебания по обоим каналам в низко-, средне- и высокочастотном диапазонах. Данные характеристики микроперемещений без нагрузки в горизонтальной плоскости (рис.1.а) и в вертикальной плоскости (рис.1.б) представлены ниже. Каждый из векторов

перемещения (x – для оси X и y – для оси Y) может образовывать фазовую плоскость, описывающую динамику поведения вектора состояния системы $x=(x_1, x_2)^T$. В качестве фазовых координат, помимо координат перемещения, использовалась координата скорости перемещения пальца $v_1=dx/dt$, $v_2=dy/dt$. Таким образом мы строили две фазовые плоскости (для x и y). Тогда фазовые плоскости динамики поведения пальца кисти руки испытуемого A в пространстве примут вид на Рис.2.а,б.

С целью идентификации процесса микроперемещения пальца в пространстве одновременно по двум координатам перемещения, было построено фазовое пространство $m=3$, где в качестве третьей фазовой координаты взят вектор скорости $v = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$ по вертикали. В этом случае измеряемый параметр площади прямоугольника (в примере фазовой плоскости) заменяется на параметр объема параллелепипеда, внутри которого ВСС совершает непрерывное вариационное движение в многомерном ФПС (табл.1). Корреляционная матрица (табл.2) показывает уровень взаимосвязи между сигналами x и y .

2. Хаотическая динамика параметров микродвижений конечности человека под двумя видами нагрузок.

Аналогичный анализ микроперемещений пальца кисти руки того же испытуемого A проведем для случая с нагрузкой в 1,5 кг (рис. 3).

Усиление дрейфа (если быть более корректным) наблюдается в области низких и средних частот, причем в вертикальной плоскости колебания пальца выражено значительное усиление амплитуды в районе 8 Гц (рис.3.б), что свидетельствует о значительном вовлечении ЦНС в процесс удержания конечности в заданных пространственных координатах. В области низких частот ситуация аналогична случаю без нагрузки – амплитудные значения перемещения руки в вертикальном направлении значительно ниже горизонтальных перемещений.

Рассмотрим результаты расчётов квазиаттракторов QA , соответствующих (см. рис.4)

По фазовым портретам отчетливо видна разница амплитудных значений в горизонтальном и вертикальном направлении колебаний пальца кисти руки. Последнее характеризуется меньшей хаотичностью, но большими величинами амплитуд.

Объемы представленных квазиаттракторов, соответствующих рис.4, отображены в таблице 3.

Заметим, что объем ФП в данном случае (с нагрузкой 1,5 кг) на порядок уменьшился по сравнению с КА для случая без нагрузки (табл.1).

При увеличении нагрузки до 4 кг на палец испытуемого увеличивается максимум перемещений (Рис. 5).

При увеличении нагрузки до 4 кг максимальная величина отклонения пальца от условного положения равновесия заметно уменьшилась (рис.5).

Важно, что по мере увеличения нагрузки на палец колебания увеличиваются значительно (Рис. 6.b).

Корреляционная матрица между сигналами
(с нагрузкой 4 кг)

| | | |
|---|------|------|
| | 1 | 2 |
| 1 | 1,00 | 0,38 |
| 2 | 0,38 | 1,00 |

Из табл. 6 видна и взаимосвязь сигналов в двух плоскостях (согласованность микродвижений) по отношению к предыдущим расчетам сократилась значительно.

С целью оценки степени хаотической динамики в микродвижениях пальца при различных нагрузках были построены гистограммы распределений значений исходного сигнала колебаний в горизонтальной (рис.7) и вертикальной осях (рис.8) с целью расчета значений энтропии Шеннона.

Энтропия Шенонна рассчитывалась по формуле (1), расчетные значения представлены в Таблицах 7 и 8.

$$H = - \sum_{i=0}^{N-1} p_i \log_2(p_i)$$

При сравнительном анализе полученных значений энтропии и объемов квазиаттракторов можно сделать вывод о том, что визуальная (качественная) и

количественная оценка квазиаттракторов более показательна, эффективна.

3. Возможно ли использовать искусственные нейронные сети как хаотический генератор?

Легко видеть такие свойства искусственных нейронных сетей (которые продемонстрировали хаотической принцип его контроля), если мы будем решать задачу бинарной классификации. Мы брали две группы пациентов с некоторым количеством их векторов состояния в фазовом пространстве состояний (PSS). Вектор состояния $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ для каждого человека от каждой группы пациентов представляет особое свойство человеческого организма и нейронные сети должны определить различие между этими двумя группами. Эта задача была решена - нейронная сеть представляла различия между такими двумя группами. Но когда мы повторяем процедуру классификации результат был одинаков, но значения весовых коэффициентов для каждого цикла были различными. Каждый раз нейронная сеть выполняет идентификацию различного типа внутренней конфигурации. Выход (результат бинарной классификации) был одинаков, но внутренняя конфигурация нейронной сети была различной. То же самое мы наблюдали в наших экспериментах на после одного миллиона повторений. Нейронная сеть, тремор, сердечно-сосудистая система, биохимические показатели организма человека не имеют никаких повторений все эти предметы являются уникальными. Это основное свойство жизни, и это второй постулат ТХС (представленный В. М. Еськовым 30 лет назад). Иллюстрацию такого постулата мы можем представить в виде простого примера бинарной классификации (Рис.9 Определение значения весовых коэффициентов для искусственной нейронной сети, при решении задачи бинарной классификации с многократным повторением (число N таких повторений N=50)). На Рис.9 показаны N=50 повторений для всех x_i (координаты вектора состояния человека). Ординаты x_i для каждого ряда (общий набор всех рядов представляет m-мерную размерность (m=11) всего фазового пространства состояний) представляют

величины w весовых коэффициентов для каждого цикла (из общего числа циклов $N=50$), причем веса w укладываются в интервале $w \in [0,1]$. Каждая колонка представляет величину x_i (для x_i мы имеем ряд, а для повторов можно брать j -ю колонку) для каждого j -ого значения весового коэффициента на j -том ($j=1, \dots, 50$) измерении (настройки искусственной нейронной сети). Таким образом, повторяя решение каждой задачи бинарной классификации $N=50$ раз ($i=1, 2, \dots, 50$), мы каждый раз получаем отличные друг от друга значения x_i ($i=1, \dots, 11$) для соответствующей задачи. Удивительно, что при повторении настройки нейронной сети мы получаем различные значения каждого x_i на каждой j -й настройке. Фактически мы имеем матрицу величин W_i для каждого i -го признака на j -ом повторе. Эта матрица бесконечна и она не имеет одинаковых элементов для каждого ряда x_i , т.е. всегда весовые коэффициенты для каждого ряда будут свои, непохожие.

Осуществив многократное повторение ($N \rightarrow \infty$) данной процедуры, для каждого x_i на j -ом шаге повторения процедуры мы получаем хаотическую генерацию значений весовых коэффициентов. Из таких повторений мы получаем хаотическую динамику и для каждой серии, т.е. имеем равномерное распределение. Такая ситуация является обычной для хаотического процесса и все complexity, системы третьего типа (объекты ТХС) хаотичны по своей природе, это было показано В.М. Еськовым 30 лет назад.

Таким образом, мы утверждаем: для каждой такой процедуры, т.е. на выходе, каждый раз мы получаем один и тот же результат (искусственные нейронные сети, как и биологические, реализующие задачу бинарной классификации), но в каждый момент времени величина значений весовых коэффициентов w внутренней структуры нейронной сети, будет различной. И так существуют все известные в медицине объекты и результаты исследований, связанные с численными расчетами. На одной операции они могут иметь значимый вклад в постановку диагноза пациенту, а на другой могут быть незначительными. Эти меры значимости определяются также нейронной

сетью путем подсчета весовых коэффициентов.

Заключение

Каждый раз нейросеть (реальная и искусственная) будет давать другой результат своей работы по внутреннему состоянию, но внешний выход будет сходным (а его выполнение – хаос). Мы можем много раз брать в руки стакан со стола, но организация движений (внутренняя) будет хаотической (ученые Стэнфордского университета на это обратили внимание в 2012 году [1], мы 30 лет назад [9]). Хаос внутри нас – это свойство всего живого.

В соответствии с детерминистско-стохастическим подходом, тремор имеет некоторый порядок в своей организации (см. выше, частотная характеристика). Но это не так. Каждый период треморограммы (во время нашей 5-секундной регистрации тремора), мы получаем другую картину треморограммы и другой вид амплитудно-частотной характеристики. ДСП-методы идентификации треморограмм представляют внезапную, уникальную картину реальных событий. Событие (треморограмма) неповторимо и непредсказуемо. Более того, каждая БДС-complexity, каждая сложная биосистем как систем третьего типа имеет уникальные свойства (в соответствии со статьей И.Р. Пригожина "The Die Is Not Cast", такая система не является объектом исследования современной науки [13]). Третий тип систем не является объектом DSP и сегодня мы строим третью парадигму и ТХС для описания таких ТТС. Треморограмма каждого человека не повторима (каждый человек уникален). В течение своей жизни каждый человек не может повторить его 5-ти секундный период треморограммы. Каждый 5-ти секундный период уникален! Это базовый принцип организации (контроля) всех живых систем и теперь человечество создает искусственные нейронные сети, которые демонстрируют общее свойство (как, управление тремором). Хаос является фундаментальным принципом управления тремором! Многочисленные публикации В. М. Еськов и др. представителей сургутской научной школы в области теории хаоса-самоорганизации, как и вся третья парадигма в целом не добились результатов признания

правильности первого постулата теории хаоса и синергетики (40 лет назад, представленный Г. Хакеном) и четырех других постулатов (представленных 30-40 лет назад В. М. Есков). Введение в компартментно-кластерную теорию биосистем и теории идентификации интервалов устойчивости сложных биологических динамических систем, вытекающую из нее и степень синергии (асинергия), которую аналитически понимают, как первый постулат теории хаоса и синергетики. Кроме того, после разработки основных аспектов теории хаоса-самоорганизации и третьей парадигмы вся проблема минимизации размерности фазового пространства состояний и идентификации параметров порядка, т. е. задачи системного синтеза в теории хаоса-самоорганизации была решена. Все эти достижения были реализованы в практической медицине и экспериментальной биологии и экологии, но они не получили должного признания ученых, которые занимаются изучением живых систем.

Литература

1. Churchland M.M., Cunningham J.P., Kaufman M.T. and others. Neural population dynamics during reaching // *Nature*. 2012. – v.487, P.51-56.
2. Ebeling W., Erdmann U., Dunkel J., Janssen M. Nonlinear dynamics and fluctuations of dissipative Toda chains // *J. Stat. Phys.* 2000. 101(1/2), p. 443-457.
3. Eskov V.M. Direct control by dissipation factor in respiratory neuron networks // *Neural network world*. 1994. № 6, p. 663-670
4. Eskov V.M. Indirect control by dissipation factor in respiratory neuron networks // *Neural network world*. 1994. № 6, p. 655-662
5. Eskov V.M. The dependence of activity of cyclic respiratory neuron network with subcycles on damping coefficient // *Neural Network World*. 1996. № 1, p. 57-67
6. Eskov V.M. Models of hierarchical respiratory neuron networks // *Neurocomputing*. 1996. – v. 11 (2-4), p. 203-226
7. 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
8. 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. Medical and Biological Measurements*. 2011. – v. 54 (7), p. 832-837
9. Eskov V.M. Third paradigm. Samara. Ofort. 2011. 240 P.
10. Eskov V.M., Gavrilenco T.V., Kozlova V.V., Filatov M.A. Measurement of the dynamic parameters of microchaos in the behavior of living biosystems // *Measurement Techniques*. 2012. – v. 55 (9), p. 1096-1100.
11. Haken H. Principles of brain functioning: a synergetic approach to brain activity, behavior and cognition (springer series in synergetics). Springer. 1995. 349 P.
12. Mainzer K. Thinking in complexity : the computational dynamics of matter, mind and mankind. New York, Berlin. Springer. 2007. 482 P.
13. Prigogine I.R. The Die Is Not Cast // *Futures. Bulletin of the World Futures Studies Federation*. Vol. 25, No.4. January 2000. P. 17-19.

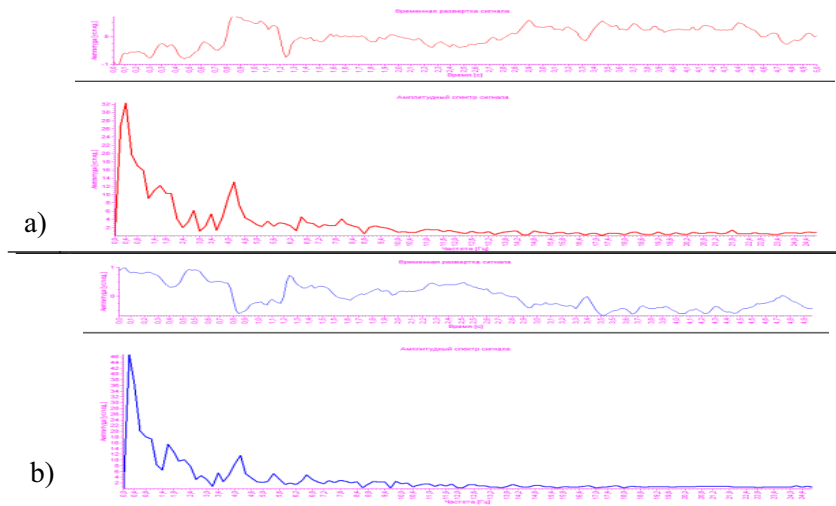


Рис. 1. Треморограммы и их АЧХ, снятые с пальца испытуемого А без нагрузки: а) колебания по оси X; б) колебания по оси Y

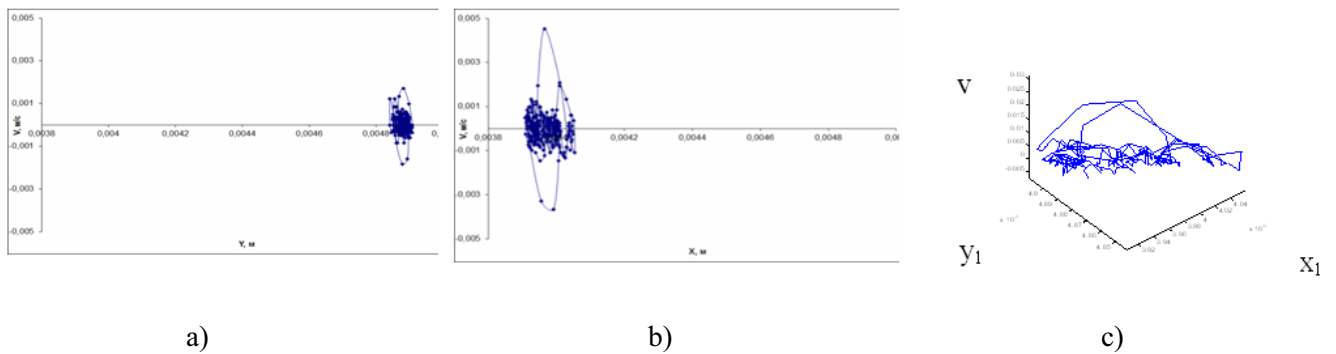


Рис.2. Фазовые плоскости движения пальцев руки испытуемого А без нагрузки: а) по оси X для фазовой плоскости вектора $x=(x_1,x_2)^T$; б) по оси Y для вектора $y=(y_1,y_2)^T$; в) в трёхмерном пространстве (x_1,y_1,v)

Таблица 1

Величины площади и объемы квазиаттракторов, представляющие тремор у испытуемого А без нагрузки

| | по оси X $(x=(x_1,x_2)^T)$ | по оси Y $(y=(y_1,y_2)^T)$ | в трёхмерном пространстве (x_1,y_1,v) |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|
| Объемы квазиаттрактора | $S= 2,37E-07S$ | $S=1,19E-06$ | $V=2,39E-08$ |

Таблица 2

Корреляционная матрица между сигналами x и y (без нагрузки)

| | x_1 | y_1 |
|-------|-------|-------|
| x_1 | 1,00 | -0,92 |
| y_1 | -0,92 | 1,00 |

Из табл. 2 видно, что существует значительная взаимосвязь между сигналами x и y .

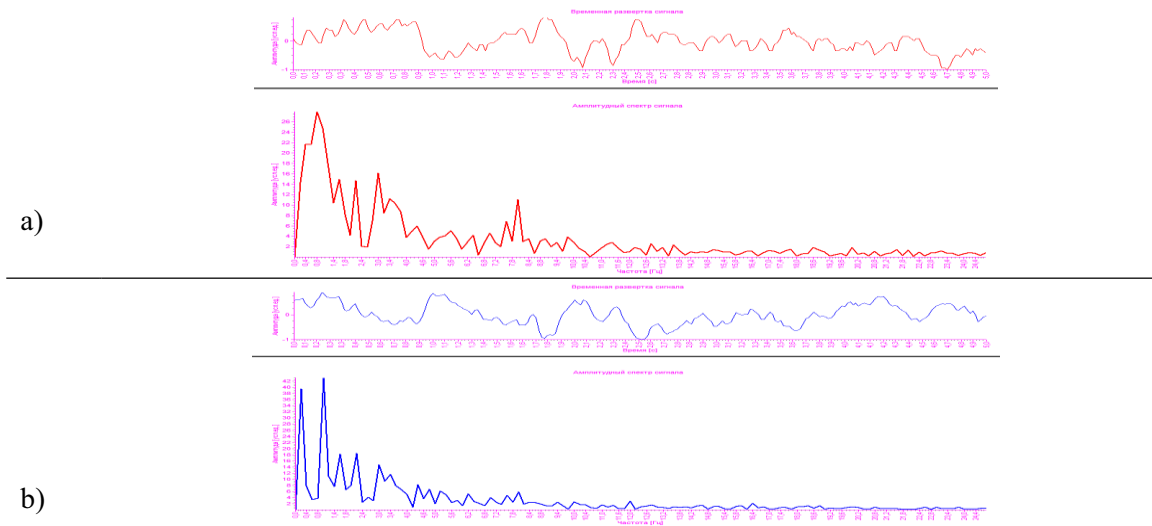


Рис. 3. Треморограммы и их АЧХ, снятые с пальца испытуемого А под нагрузкой в 1,5 кг: а) колебания по оси X; б) колебания по оси Y

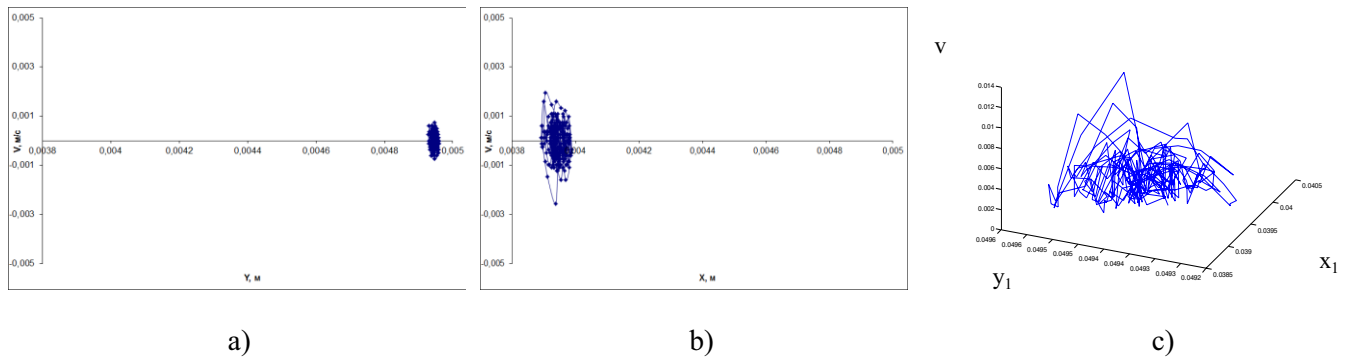


Рис.4. Фазовые плоскости движения пальцев руки испытуемого А под нагрузкой в 1,5 кг: а) по оси X для фазовой плоскости вектора $x=(x_1,x_2)^T$; б) по оси Y для вектора $y=(y_1,y_2)^T$; в) в трёхмерном пространстве (x_1,y_1,v)

Таблица 3

Площади и объемы квазиаттракторов , представляющие тремор у испытуемого А с нагрузкой 1,5 кг у испытуемого А

| | по оси X $(x=(x_1,x_2)^T)$ | по оси Y $(y=(y_1,y_2)^T)$ | в трёхмерном пространстве (x_1,y_1,v) |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|
| Объемы квазиаттрактора | S= 4,47E-08 | S= 4,35E-07 | V=3,87E-09 |

Таблица 4

Корреляционная матрица между сигналами (с нагрузкой 1,5 кг)

| | x_1 | y_1 |
|-------|-------|-------|
| x_1 | 1,00 | -0,59 |
| y_1 | -0,59 | 1,00 |

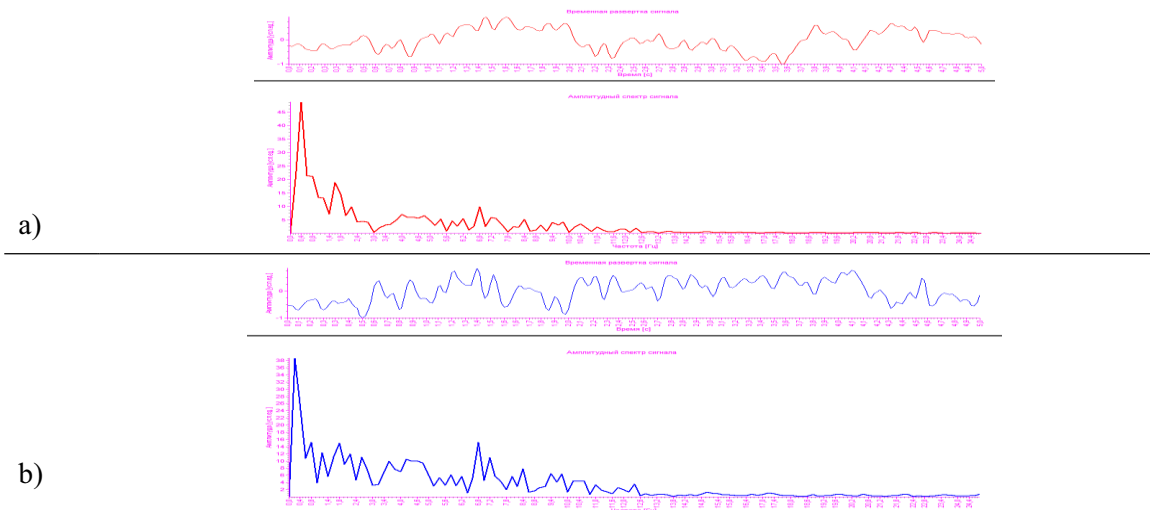


Рис. 5. Треморограммы и их АЧХ, снятые с пальца испытуемого А под нагрузкой в 4 кг: а) колебания по оси X; б) колебания по оси Y

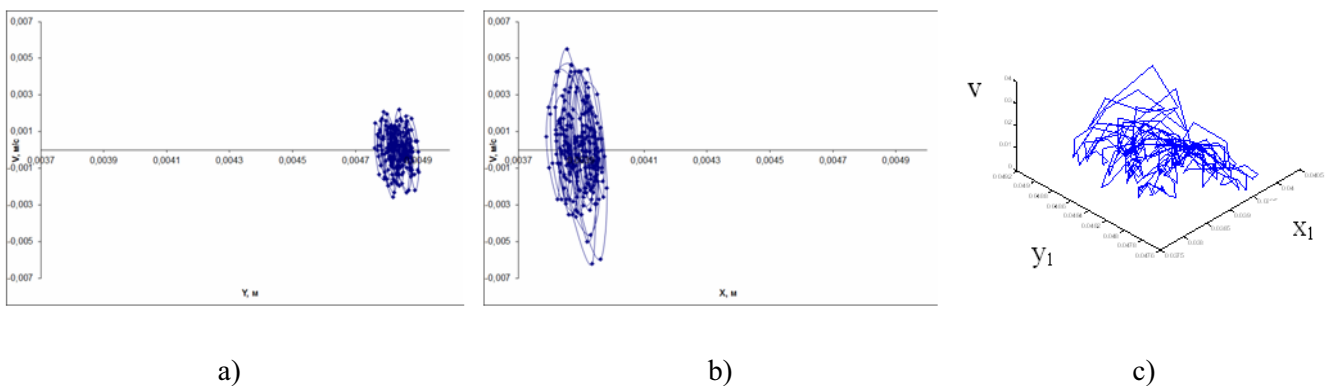


Рис.6. Фазовые плоскости движения пальцев руки испытуемого А под нагрузкой в 4 кг: а) по оси X для фазовой плоскости вектора $x=(x_1,x_2)^T$; б) по оси Y для вектора $y=(y_1,y_2)^T$; в) в трёхмерном пространстве (x_1,y_1,v)

Таблица 5

Площади квазиаттракторов у испытуемого А

| | по оси X $(x=(x_1,x_2)^T)$ | по оси Y $(y=(y_1,y_2)^T)$ | в трёхмерном пространстве (x_1,y_1,v) |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|
| Объемы квазиаттрактора | S=2,26E-06 | S= 6,62E-07 | V=8,85E-08 |

Таблица 6

Корреляционная матрица между сигналами (с нагрузкой 4 кг)

| | | |
|---|------|------|
| | 1 | 2 |
| 1 | 1,00 | 0,38 |
| 2 | 0,38 | 1,00 |

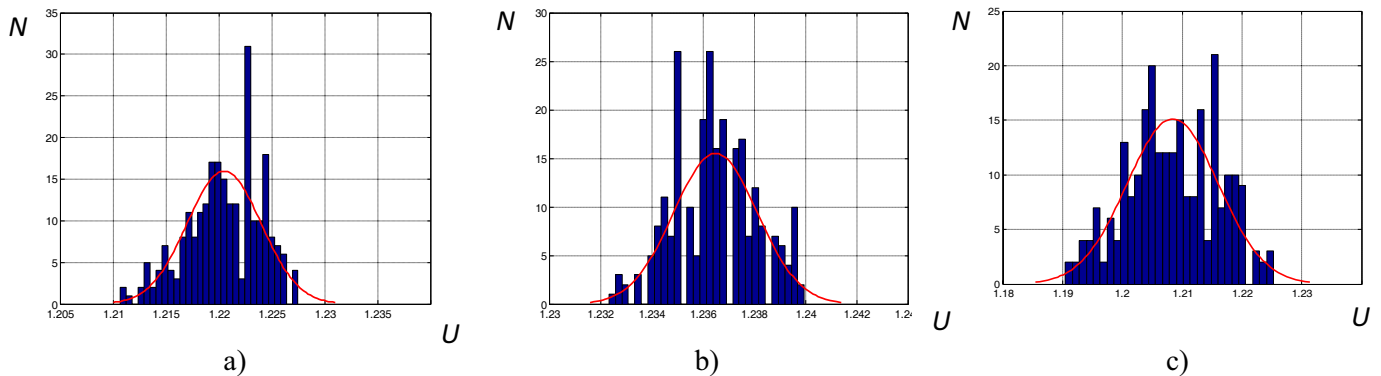


Рис. 7. Гистограммы распределения значений исходного сигнала при разбиении на тридцать интервалов. Испытуемого А в пределах оси X: а) без нагрузки; б) под нагрузкой 1.5кг; в) под нагрузкой 4 кг.

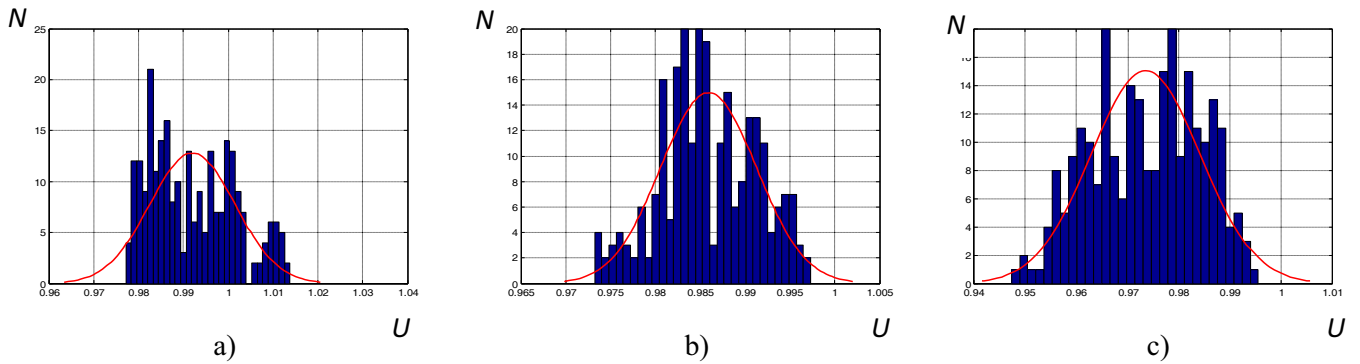


Рис. 8. Гистограммы распределения значений исходного сигнала при разбиении на тридцать интервалов испытуемого A в пределах оси Y : а) без нагрузки; б) под нагрузкой 1.5кг; с) под нагрузкой 4 кг.

Таблица 7

Энтропия Шеннона у испытуемого A для колебаний по оси X

| | без нагрузки | под нагрузкой 1.5кг. | под нагрузкой 4 кг. |
|------------------|--------------|----------------------|---------------------|
| Энтропия Шеннона | 3.8729 | 3.8281 | 3.6981 |

Таблица 8

Энтропия Шеннона у испытуемого A для колебаний по оси Y

| | без нагрузки | под нагрузкой 1.5 кг. | под нагрузкой 4 кг. |
|------------------|--------------|-----------------------|---------------------|
| Энтропия Шеннона | 3.8477 | 3.6062 | 3.7647 |



Рис.9. Диаграмма распределения весовых коэффициентов каждого из параметров (x_j) для каждого j -того обучения (метод сопряженных градиентов) искусственной нейронной сети ($j=1, \dots, 50$). x_1 - NN,мс, x_2 - SpO₂,%, x_3 -SIM, x_4 -PAR, x_5 -SDNN, x_6 -HRV, x_7 -IB, x_8 -VLF, x_9 -LF, x_{10} -HF, x_{11} -LF/HF.