

DOI: 10.12737/5520

## КОМПАРТМЕНТНО-КЛАСТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЕЙ В РАМКАХ ДЕТЕРМИНИЗМА

Г.С. КОЗУПИЦА, Д.Д. ДАЯНОВА, Ю.Г. БУРЫКИН, Д.К. БЕРЕСТИН

*Сургутский государственный университет ХМАО-Югры, пр. Ленина, д.1, г. Сургут, Россия*

**Аннотация.** Переход от детерминизма к стохастике и далее к хаосу (самоорганизации) в изучении биомеханических систем приводит к проблеме возможности моделирования хаотической динамики постурального тремора. В общем случае возникает общая проблема идентификации произвольных движений человека. Иными словами биофизика сложных систем подошла к решению глобальных задач произвольности и непроизвольности в реализации любых двигательных функций. Обсуждается возможность моделирования таких процессов качественно и количественно. На конкретных моделях продемонстрирована эффективность компартментно-кластерного моделирования биосистем и возможности управления такими моделями со стороны нейросетей головного мозга. Сравнительный анализ модельных и реальных зарегистрированных сигналов показал высокую согласованность динамики моделируемых и реальных сигналов сложных биологических систем. В частности, динамика изменения параметров тремора может быть описана изменением квазиаттракторов, которые существенно зависят от психического состояния человека. В опытах это проявляется в виде эффектов прицеливания, которые и были рассмотрены в сообщении в качестве проверки модели на экспериментальном материале.

**Ключевые слова:** сложные биосистемы, компартментно-кластерное моделирование, произвольное и непроизвольное движение.

## COMPARTMENT-CLUSTER MODELING OF UNCERTAINTIES ACCORDING TO DETERMINISM

G.S. KOZUPITSA, D.D. DAYANOVA, YU.G. BURYKIN, D.K. BERESTIN

*Surgut State University, pr. Lenina, 1, Surgut, Russian, 628412*

**Abstract.** Transition from determinism to stochastic and further to chaos (self-organization) in the study of biomechanical systems leads to the problem of chaotic dynamics modeling of a post-

ural tremor. In general, there is a problem of identifying the voluntary human movements. In other words biophysics of complex systems has approached the global challenges of voluntary and involuntary performance of any motor functions. The possibility of modeling these processes qualitatively and quantitatively is discussed. Specific models demonstrate the effectiveness of the compartment-cluster modeling of biosystems and possibilities of control of such models from the neural networks of the brain. Comparative analysis of the simulated and real recorded signals has shown a high consistent dynamics of simulated and real signals of complex biological systems. In particular, changes in tremor parameters can be described by the change in quasi-attractors which essentially depend on the mental state of a person. In experiments it is shown in the form of sight effects, which are considered in the report as a test model on experimental data.

**Key words:** complex biosystems, compartment-cluster modeling, voluntary and involuntary movement.

**Введение.** Организация двигательных актов сопровождается обязательным наличием трех структур (компарментов) как на уровне исполнения, так и на уровне управления этим исполнителем (т.е. двигательным актом). На нижнем иерархическом уровне или нижнем кластере, или уровне реализации управлений, всегда имеется афферентная часть (первый, входной компармент) в виде механорецепторов – различных мышечных сенсорных структур, формирующих потоки информации о положении в пространстве тела человека или его частей (за счёт тонуса мышц). На спинальном уровне имеется компармент (нейронные сети), который обеспечивает переработку поступающей информации как из выше лежащих структур (иерархического кластера), так и из входного афферентного компармента, который является первым компарментом в общей трёхкомпарментной структуре второго (управляемого) кластера. В результате последовательного взаимодействия первого и второго компарментов вырабатываются управляющие сигналы для активизации третьего (выходного) эффекторного компармента. В качестве последнего выступают эфферентные сигналы и нервно-мышечный компармент (исполнитель). Такая трёхкомпарментная структура модели мышечного движения включает и организацию тремора (как якобы произвольного движения), и теппинга (якобы произвольного движения).

Последовательная волна возбуждений в этих трех компарментах внешне проявляется в определенном двигательном акте, простейший из которых – удержание конечности в данной точке пространства.

Возникает то, что называется постуральным тремором, который довольно часто классифицируется как непроизвольное движение. Однако, постуральный тремор выполняется по заранее определенной цели (удержания конечности в пространстве), т.е. сознательно, и такое движение по определению должно классифицироваться как произвольное движение. Где возникает граница между произвольным и непроизвольным движением и как можно моделировать эти два типа движений? Каковы критерии произвольности и непроизвольности движений с позиции физиологии и биомеханики любого двигательного акта? Что такое произвольность вообще, если сознание не может обеспечить детерминистский результат в виде функций и даже стохастические функции демонстрируют непрерывные изменения (мы покажем, что выборки треморограмм не принадлежат к одной генеральной совокупности)?

Ответы на эти вопросы – главная цель наших исследований. Один из ответов на эти вопросы мы предлагаем в рамках *компарментно-кластерного подхода* (ККП). При этом возникает возможность построения адекватных математических моделей, которые могут представлять сразу несколько типов якобы стационарных режимов биомеханических систем: в рамках традиционного *детерминистско-стохастического подхода* (ДСП), когда для вектора состояния биомеханической системы  $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$  мы имеем равенство  $dx/dt=0$  и  $x_i=const$  и в рамках новой *теории хаоса-самоорганизации* (ТХС), когда постоянно  $dx/dt \neq 0$ , но при этом движение *вектора состояния системы* (ВСС) может происходить в пределах огра-

ниченных объемов *фазового пространства состояний* (ФПС) –  $V_G$ . В настоящем сообщении представлены оба типа подходов и даётся экспериментальная иллюстрация, которая демонстрирует абсолютную условность термина произвольности движений. Любое произвольное движение человека всегда по принципу его общей биологической (хаотической) организации реализуется непроизвольно!

**1. Принципы построения моделей сложных биосистем третьего типа.** Перед формулированием основных принципов следует сделать ряд фундаментальных выводов и определений: в природе существуют особые *системы третьего типа* (СТТ), которые обладают особыми свойствами (их всего сейчас выделяются пять основных); они имеют существенные отличия от традиционных систем [6,8], изучаемых в физике, химии, технике; они требуют особых теорий для своего описания и прогнозирования [6,7]. Очевидно, что все отличия СТТ от ДСП-систем образуют и их особые внутренние свойства. Поскольку пяти особым свойствам СТТ и 13-ти их отличиям от ДСП-систем было посвящено огромное количество публикаций Сургутской научной школы В.М. Еськова в области биомеханики [2-8], то целесообразно акцентировать внимание на формализации этих отличий и внутренних сходствах, попытаться выделить главные факторы и признаки, обеспечивающие формализацию в описании СТТ [1, 5, 6]. На основании этих отличий были разработаны новые методы ТХС и новый подход в медицине в целом, который позволяет современной ДСП-медицине перейти к индивидуализации, к персонализированной медицине. Такая индивидуальная медицина – реальная медицина будущего. В настоящее время В.М. Еськовым с соавторами выделяются три главных фактора, или направления развития новой ТХС [2-8]. Во-первых – особое понимание стационарных режимов БДС – complexity, т.е. СТТ. Во-вторых – особое понимание *параметров порядка* (ПП) и методов их идентификации. Отметим, что в ДСП вообще пока такой формализации нет. В-третьих – особое понимание хаоса с позиций ТХС, на основе понимания особых СТТ, их особых

свойств. Как производное этих трех базовых проблем – особые модели и особые задачи прогнозирования динамики поведения СТТ [6,13].

В целом, разрабатываемые сейчас три новых раздела диагностики СТТ [2-8] посвящены детализации и развитию по сути этих трех основных проблем или направлений (стационарные режимы, параметры порядка, обоснование типов хаоса и их описание и моделирование) в рамках ДСП-науки и нового направления – ТХС. Эти три направления имеют крайне важное значение не только для понимания *третьей парадигмы*, но и для осознания того, что уже сделано нового в науке в рамках ТХС, и что еще необходимо сделать для детального развития всего естествознания и даже для развития человечества, если оно воспримет *третью парадигму* [6,12]. Однако, в первую очередь это касается медицины, т.к. ТХС соединяет восточную и европейскую медицину. Такое соединение или создание синергических взаимоотношений, будет происходить только в рамках ТХС, т.к. для ДСП это все невозможные процессы, понятия, объекты [1-6].

Эти три направления начали разрабатываться В.М. Еськовым еще 40 лет назад в связи с созданием теории нейросетей мозга, изучением работы дыхательного центра мозга млекопитающих и выходом на создание *компарментно-кластерной теории биосистем* (ККТБ). Уже в рамках ККТБ тридцать лет назад было начато изучение стационарных режимов нейросетей мозга (была создана новая теория устойчивости БДС, отличная от теории Ляпунова-Пуанкаре), особые свойства и методы идентификации степени синергизма в БДС и особые свойства хаоса в биосистемах, которые существенно отличаются от хаоса в ДСП. Оригинальность последнего в рамках ТХС заключается в том, что микрохаос БДС в пределах *квазиаттракторов* как раз и представляет реальные стационарные режимы БДС (хаос в пределах *квазиаттрактора* – это стационарный режим в динамике особых БДС, т.е. СТТ). Иными словами, если в ДСП стационарный режим реализуется при условии  $dx/dt=0$ , то в ТХС, наоборот, стационарный режим реализуется, если

$dx/dt \neq 0$  и  $x_i \neq const$ , но при этом параметры *квазиаттракторов* не изменяются. При стационарном режиме СТТ в ТХС вектор состояния системы  $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$  не может принимать постоянных значений, т.е.  $x_i \neq const$  и ДСП не может описывать СТТ в принципе! Особый хаос в пределах *квазиаттракторов* в ТХС представляет стационарные режимы СТТ. Наоборот, в ТХС если  $dx/dt=0$ , то это означает или тяжёлую патологию или смерть биосистемы (в наших моделях это представлено ниже регидной формой болезни Паркинсона).

Фактически, в сургутской научной школе В.М. Еськова замкнули хаос БДС с понятием стационарного режима биосистем в широком смысле и создали теорию изучения стационарных состояний реальных (природных) БДС, т.е. СТТ на основе изучения их хаотических режимов. Эти биосистемы обладают пятью особыми свойствами (они определены в ТХС), они имеют другие динамические режимы поведения их ВСС в ФПС, для их описания используются другие модели и понятия а их прогнозирование требует создания *внешних управляющих воздействий* (ВУВ), которые в ДСП в общем случае не используются. Необходимость задания ВУВ определяет сходство ТХС и *третьей парадигмы* с понятием *постнеклассики*, которое ввел В.С. Степин, и которая остановилась в своем развитии (как направление философии) из-за того, что у неё не было формального аппарата, моделей в реальном мире, т.к. она должна была описывать СТТ, но стохастические модели не могут описывать особенности СТТ. Попытки же определять СТТ как системы с постоянно меняющейся вероятностью, противоречат и самой ДСП, и ничего не дают для развития науки complexity, да и всей науки в целом [1-6].

Все накопленные противоречия и ограничения останутся в прошлом, если перейти к ТХС в описании СТТ. При этом ККТБ остается посредником между ДСП и ТХС, третьей парадигмой. Это посредничество проявляется стационарности, параметров порядка и типов хаоса в природе. Если кратко изложить суть методов ТХС для понимания существенных отличий ДСП-медицины (т.е. медицины Европы) от ме-

дицины Китая и других традиционных медицин, то в восточной (традиционной) медицине имеются два постулата: каждый человек уникален (и к нему нужен особый подход а не среднестатистические измерения) и, второе – в динамике поведения его ВСС в ФПС не бывает случайностей, любое (даже очень редкое, якобы случайное) отклонение имеет причину и следствие, оно может в будущем привести к серьезной патологии и даже к смерти. Возможно, что имеются предвестники синдрома внезапной смерти, но они столь редки, случайны, что мы их не можем зарегистрировать при нашей дискретной европейской медицине. Они (эти редкие и сильные отклонения) могут попасть случайно в поле наших измерений (и тогда резко изменится *квазиаттрактор*) или не попасть (и тогда мы демонстрируем якобы стационарное состояние биосистемы). Однако, в рамках ТХС стационарность заключается не в  $dx/dt=0$ , а в приблизительно одинаковых параметрах *квазиаттракторов*. Но именно эти параметры европейской медициной и не измеряются. Она остается в рамках ДСП и базируется на стохастическом подходе.

На сегодняшний день в традиционной ДСП-науке отсутствуют эффективные модели, которые бы описывали хаотическую динамику поведения биомеханической системы (постуральный тремор) в различных режимах якобы произвольного управления и многих других динамических систем с хаотической динамикой их поведения (уникальных СТТ). Иными словами, детерминистско-стохастические модели не могут представлять разнообразие регуляторных влияний мозга (нейросетей мозга) на динамику поведения, например, постурального тремора. Отсутствие таких возможностей легко объяснить тем, что при этом описании и моделировании необходимо моделировать сам хаос и не в рамках экспонент Ляпунова (с их расходящимися фазовыми траекториями), и не на основе анализа автокорреляционных функций, а с учетом того, что эти траектории могут сходиться, расходиться и даже пересекаться в ФПС в пределах *квазиаттракторов*. Хаос СТТ отличен от хаоса в физике, химии, технике! Его нельзя моделировать уравнениями, он

не описывается свертками и преобразованиями. Это другой хаос других систем.

Поскольку мы стоим на позициях биофизики, то можно представить физические аналоги таких систем. Хаос в динамике поведения фазовых траекторий реального тремора ограничивается только размерами *квазиаттрактора*, внутри которого движется ВСС. Эта ситуация подобна термодинамическому хаосу, когда молекулы могут сталкиваться, их траектории в пространстве могут пересекаться, но они не могут покинуть размеры сосуда, в котором они движутся. Хаос в термодинамике ограничен физическими границами (стенками сосуда). Хаос при треморе, хаос кардиоритмов, биопотенциалы мозга, хаос биохимических параметров крови и гомеостаза в целом ограничен параметрами их *квазиаттракторов*, которые образуются за счет механизмов внутренней самоорганизации и поэтому В.М. Еськов обозначил новый подход, как ТХС. Этот подход принципиально отличен от ДСП и даже от синергетики и теории complexity (эти науки остались в ДСП, где есть хаос и порядок, а не непрерывный хаос в нашей ТХС) [3-6,12-14].

Стенки сосуда в физике и внутренние механизмы самоорганизации биосистем, будут теми причинами, которые накладывают ограничения на динамику движения молекул (в сосуде) и ВСС  $x=x(t)$  внутри *квазиаттрактора*. Но между физикой и биосистемами лежит огромная пропасть. В физике многие процессы имеют неравномерное распределение. Например, распределение молекул газа по скоростям (распределение Максвелла – the distribution of Maxwell's). Для биосистем мы обычно имеем равномерное распределение, т.е. наблюдаем нестационарный процесс (однако, в пределах *квазиаттракторов*!), когда ВСС  $x=x(t)$  всегда имеет значения  $dx/dt \neq 0$ ,  $x_i \neq const$  и нет начального и конечного состояния. В живых системах финальное состояние, смерть организма, наблюдается только тогда, когда  $dx/dt=0$ ,  $x_i=const$ . Но неживые системы – это уже объект термодинамики, т.е. физики в целом, а живые системы – это объект ТХС.

Аналогии термодинамики и ТХС заканчиваются при переходе к живым систе-

мам, и возникает проблема возможности моделирования хаоса в биосистемах (например, тремора) с позиций ДСП. Это возможно или нет? Первоначально отметим, что необходимо моделировать не просто хаос (как это делает сейчас физика, химия, математика и техника), а необходимо моделировать системы управления хаосом. Например, моделировать нормальные или патологические режимы дыхания, работы сердца, произвольных и непроизвольных движений, вообще норму и патологию в организме человека и животных. Для ответа на вопрос о возможности такого моделирования продемонстрируем возможность ТХС на начальном этапе ее возникновения, т.е. при выполнении только одного типа управления – управления параметрами непроизвольного движения (т.е. тремора). Отметим, что подобные механизмы самоорганизации имеются и в системах регуляции любых других биосистем (дыхания, работы сердца, гуморальных и висцеральных систем, гомеостаза в целом) [2- 5,13].

Сразу отметим, что в ТХС мы демонстрируем инверсию понятий. Если в ДСП любое регулярное движение в динамике поведения биосистемы (периодическое, например) было обычно нормой: якобы нормальное (периодичное) дыхание, якобы нормальное биение сердца и т.д., то сейчас мы говорим, что такая динамика – это обычно патология. Нормальное состояние любой сложной биосистемы (СТТ в нашей классификации) – это хаос, но в пределах квазиаттракторов. Патология возникает при периодических (регулярных) процессах или полном покое (в финале – это смерть).

Для демонстрации этого утверждения представим модели в рамках ККТБ, которые используют первый постулат ТХС (из всех 5-ти, сформулированных В.М. Еськовым в ТХС), т.е. мы работаем только с *компартаментами* и кластерами (отдельный элемент – ничто в поведении БДС). С позиций ККТБ мы будем в норме иметь неповторимый и непредсказуемый (с позиций ДСП) хаос. Это означает, что для любого участка треморограммы мы никогда не получим одинаковую *амплитудно-частотную характеристику* (АЧХ) и другие ДСП-характеристики (но параметры *квазиат-*

трактора приблизительно сохраняются).

**2. Общие принципы компарментно – кластерного моделирования биосистем.** Результативность той или иной математической модели биологического объекта всегда зависит от числа и качества реальных факторов и процессов, которые лежат в основе работы той или иной системы. Более того, на этом основана вся физика, химия и техника, которые оперируют реальными переменными и реальными законами, которые эти переменные связывают. Со времён Ньютона человечество оперировало уравнениями и понятиями, которые определяются в реальной природе. Второй закон Ньютона, закон всемирного тяготения, закон Кулона и тысячи других законов и уравнений связывают реальные переменные реальными уравнениями. При возрастании неопределенности (в квантовой механике, например) мы переходим от точек и линий в ФПС к плотности вероятности  $f(x)$ , но какая-то определенность в виде функций распределения для вектора состояния системы  $x(t)$  всё-таки остается.

В биологии весьма затруднительно привести удачные примеры такой синергии переменных и уравнений именно на системном уровне, на уровне больших и сложных систем – complexity (мы сюда не относим молекулярные и внутриклеточные системы). Пожалуй, только популяционные процессы описываются почти правдоподобными уравнениями, но это уже уровень сообществ, в этой связи следует выделить ККТБ, которая может одновременно учитывать и реальные свойства сложных биосистем, и использует реальные кинематические уравнения для их описания. К числу реальных свойств биосистем следует отнести принцип компарментно-кластерного строения биосистем, который эквивалентен утверждению о клеточном строении многих живых организмов (любая клетка – это простейший компармент, их объединение – это тоже компармент). Компарменты объединяются в кластеры, и при этом динамика поведения отдельного элемента внутри компартамента не имеет значения. Это базовый принцип синергетики, который Н.Накен начал доказывать ещё в 1969 г. в Штутгарте.

Кроме фундаментального принципа

компарментной (пуловой) структуры многих сложных биосистем (органы и ткани организма человека, например) в рамках ККП и ККТБ существует еще 7 базовых принципов организации биосистем, которые являются весьма общими и универсальными именно в организации сложных биосистем – complexity. Перечислим их кратко, при условии, что **первый принцип** уже обозначен (компарментная организация биосистем).

**Второй принцип** ККТБ – наличие последовательных связей между компартаментами. Эти последовательные связи в общем случае могут описываться матрицами  $A$  межкомпарментных или межкластерных связей (кластеры образуются из структуры связей компарментов и это тоже принцип ККТБ). Матрицы  $A$  описывают все типы связей между компартаментами (или кластерами): положительные (приняты в синергетике), отрицательные (используются в кибернетике), нулевые связи (компарменты не влияют друг на друга, нейтральность). Элементы  $a_{ij}$  матриц  $A = \{a_{ij}\}$ ,  $i, j = 1, \dots, m$  описывают структуру любой биосистемы, с любым набором связей. В ККТБ особая роль отводится положительным связям, они необходимы в биосистемах и для их идентификации сейчас разработана новая теория (идентификация синергизма). Наличие положительных (главных) связей в ККП (и их идентификация) составляет **третий принцип** ККП. И он составляет основу всей синергетики. Вообще синергетика возникла как наука о положительных связях в системах (в отличие от кибернетики, где на первое место выходят отрицательные связи). ККТБ исходно разрабатывалась В.М. Еськовым как теория для описания синергетических систем (с положительными связями) и в этом смысле ККТБ – основа синергетики. Но в действительности ККП обеспечил переход от детерминизма к ТХС.

**Четвертое свойство** (принцип организации биосистем) базируется на наличии диссипативных структур (процессов) в биосистемах, которые в моделях ККТБ описываются отдельными элементами – слагаемыми  $-bx$ , где  $b$  – это коэффициент диссипации

(возбуждения за счёт нейротрансмиттера, диссипации энергии и т.д.). **Пятый принцип** ККТБ постулирует наличие ВУВ в виде вектора  $Ud$ , где  $U$  скаляр  $a$   $d=(d_1, d_2, \dots, d_m)^T$  – вектор внешних управляющих воздействий – ВУВов. Довольно часто у биосистемы существуют некоторые регуляторные подсистемы, которые могут по принципу вентильного перекрытия потоков (возбуждения, энергии, информации) в биосистеме регулировать уровни этих потоков возбуждения  $x=x(t)$  (или других потоков). В наших моделях этот **шестой принцип** описывается специальными матрицами  $P(y)$  или матричными функциями  $A(y)$ . При этом **седьмой принцип** гласит: существует интегральный выход в любом кластере (в биосистеме в целом), который в наших моделях будет описываться функцией  $y=y(t)$ . В простейшем случае  $y(t)$  будет линейно зависеть от компонент  $x_i$ , т.е.  $y=C^T X=c_1x_1+c_2x_2+\dots+c_mx_m$ , где  $c_i$  – весовые коэффициенты.

Наконец, существует **восьмой принцип** организации биосистем, который декларирует иерархическую организацию многих сложных биосистем. В частности, для организации биомеханических движений верхним уровнем иерархии всегда будут нейронные сети головного мозга, которые формируют цели в организации движений. В частности, удержание пальца в данной точке пространства невозможно без сознания, без работы нейросетей головного мозга. Именно по этой причине постуральный тремор все-таки может рассматриваться как произвольное движение, т.к. человек произвольно (по своему желанию) удерживает палец в данной точке пространства. Существенно, что качество движений (кроме тонкой, целевой моторики) зависит от общего уровня возбуждения в нижнем кластере, которое определяется общим уровнем возбуждения, поступающим от высших кластеров – нейросетей мозга человека.

Организация управления таким движением (постуральным тремором) в наших исследованиях проявляется в некоторых возможностях управлять сознательно параметрами постурального тремора. Об этом будет сказано специально, ниже. Однако уровень участия сознания в таком управлении остается дискуссионным. Например, мы можем сознательно выполнить физиче-

скую нагрузку или охлаждение организма и параметры тремора изменяться – это сознательное управление или нет?

В целом, на основе всех выше указанных принципов организации компартментно-кластерных биосистем (т.е. тех, которые удовлетворяют этим восьми принципам), мы можем сформулировать **девятый принцип**, который связан с утверждением: биосистемы, удовлетворяющие восьми принципам ККТБ, могут описываться уравнениями вида:  $dx/dt=AP(y)x-bx+Ud$ ,  $y=C^T X$ , (1) где  $x(t)$  – вектор состояния системы,  $A$  – матрица межкомпарментных связей,  $P(y)$  – матрица обратных связей,  $Ud$  – вектор внешнего управляющего воздействия (у нас такое воздействие может идти от анализаторов или от нейросетей мозга).

Важно еще раз подчеркнуть, что эти **девять принципов** ККТБ базируются на реальных свойствах биосистем (как в физике второй закон Ньютона основывается на реальности силы, массы, ускорения), а организация моделей таких систем в рамках ККТБ должна основываться на их (биосистем) реальных свойствах и динамиках их поведения. Для иллюстрации этого высказывания представим характерный пример, позволяющий описывать постуральный тремор в рамках ККТБ, т.е. в рамках уравнений вида (1) или (2). Отметим, что вторая система (2) представлена ниже в виде двухкластерной системы, где  $x_i$  – вектор состояния нейросетей головного мозга:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= A_{11}(y_1)x_1 - bx_1 + u_1d_1, \\ \dot{x}_2 &= A_{21}x_1 + A_{22}(y_2)x_2 - bx_2 + u_2d_2. \quad (2) \\ y_1 &= c_{11}^T x_1 \\ y_2 &= c_{21}^T x_1 + c_{22}^T x_2 \end{aligned}$$

**3. Математические модели постурального тремора в рамках ККТБ.** Сразу отметим, что традиционные детерминистские или даже стохастические уравнения не могут описывать эволюцию систем регуляции движений, так как обычно для каждого типа движений записывается своё отдельное уравнение в биомеханике. Например, пусть система регуляции движений переходит от нормы к патологии. При этом в рамках ККТБ и ГХС мы будем утверждать, что хаос биосистем – это нормальное (без патологий) состояние покоя. Обычно же хаоти-

ческой динамикой представляют патологические режимы в биомеханических системах. Впрочем, и в других системах регуляции биопроцессов хаос тоже играет решающую роль. В любом биомеханическом акте добиться состояния покоя или идентичного, точного повторения того или иного движения – невозможно. На это уже указали в 2012 году ученые университета в Стэнфорде [9], но этот факт был доказан еще 30 лет назад В.М. Еськовым при разработке ККТБ [3-6] и в различных экспериментах с нейронными сетями дыхательного центра, с организацией различных движений и других динамических процессов в сложных биосистемах. К последним в первую очередь относится организм человека, параметры его гомеостаза. В целом, не только треморограммы, но и кардиограммы, миограммы, нейрограммы демонстрируют непрерывное хаотическое движение их векторов состояний, поэтому ККТБ имеет универсальный характер.

Теоретически, компартментно-кластерные системы могут иметь точки покоя, когда  $dx/dt=0$ . Но таких точек будет немного и они скорее соответствуют патологическим состояниям *биологических и динамических систем* (БДС). Например, для системы дыхания, респираторных нейросетей дыхательного центра млекопитающих, такая ситуация возникает при гипервентиляции (искусственное, аппаратное состояние), при обездвиживании (яд кураре) или других особых экспериментальных случаях, а также при тяжелой патологии (внезапная остановка дыхания).

В норме нейросети дыхательного центра будут продуцировать какую-то активность и эта активность может иметь даже не обязательно периодический характер. Более того, сами колебательные движения при дыхании имеют выраженный хаотический характер, т.е. мы имеем некоторые колебания, которые одинаково повторить нельзя. Дыхание не является строго периодическим движениям ВСС. Однако, это утверждение более наглядно можно продемонстрировать на биомеханическом примере, когда мы регистрируем параметры постурального тремора, так как это очень быстрый процесс, но он эквивалентен в аспекте хаоса регуляции дыхания.

Действительно, удержания пальца в точке пространства – это сознательный акт и он должен происходить при определенном уровне возбуждения со стороны вышележащих структур головного мозга (сознание должно работать и задавать ВУВы для нижнего кластера: афферентное звено, спинальная нейросеть, эфференты (нейроны) вместе с миофибриллами). Постулируем наличие трехкомпартментной нейросети на уровне головного мозга в виде первого компартмента, который воспринимает афферентацию второго компартмента (центрального звена) перерабатывающего эту афферентацию, и третьего компартмента, который задает выходные драйвы на спинальные нейроны (нижний, управляемый кластер).

В общем виде верхний кластер нейросетей мозга может задавать просто уровень возбуждения в нижнем кластере (эфферентном кластере) и от этого уровня будет зависеть работа всей биомеханической системы (параметры постурального тремора). Простейшая система регуляции тремора будет иметь вид двухкластерной, трехкомпартментной (по три компартмента в каждом кластере) иерархической биосистемы. Структура такой системы в виде графа изображена на рис. 1.

Для таких сложных систем в ККТБ была доказана теорема о том, что динамический режим системы (различается в том числе и периодический) возникает, если число компартментов  $m \geq 3$ . Поэтому мы и взяли 2 кластера по 3 компартмента в каждом. Отметим, что афферентное звено, центральное звено и эфферентная часть имеются в любой биомеханической системе, в анализаторах и в разных нейровегетативных контурах регуляции.

Любая хаотичная работа таких систем обусловлена именно их компартментно-кластерной структурой (согласно **восьмого принципа** организации подобных систем ККТБ). Именно это свойство и структура таких систем, базирующихся на реальных связях природных систем, дает все разнообразие динамики БДС. Модели в ККТБ максимально приближены к реальностям (как это было уже сделано в физике, химии, технике). Компартментно-кластерная структура организации реальных биосистем и их мо-

делей приводит к удивительным результатам. В частности, при определенных уровнях возбуждения первого (иерархического) кластера в нижнем, управляющем кластере (спинальный уровень) всегда будет наблюдаться хаотическая динамика поведения выходной функции  $y(t)$ . Именно такая динамика  $y(t)$  соответствует обычному постуральному тремору. Иными словами в биомеханической системе при нормальных (без патологий) уровнях возбуждения любая попытка стационарироваться (удержать конечность в данной точки пространства) порождает бесконечный хаос в динамике поведения интегральной функции возбуждения (выхода)  $y=y(t)$ .

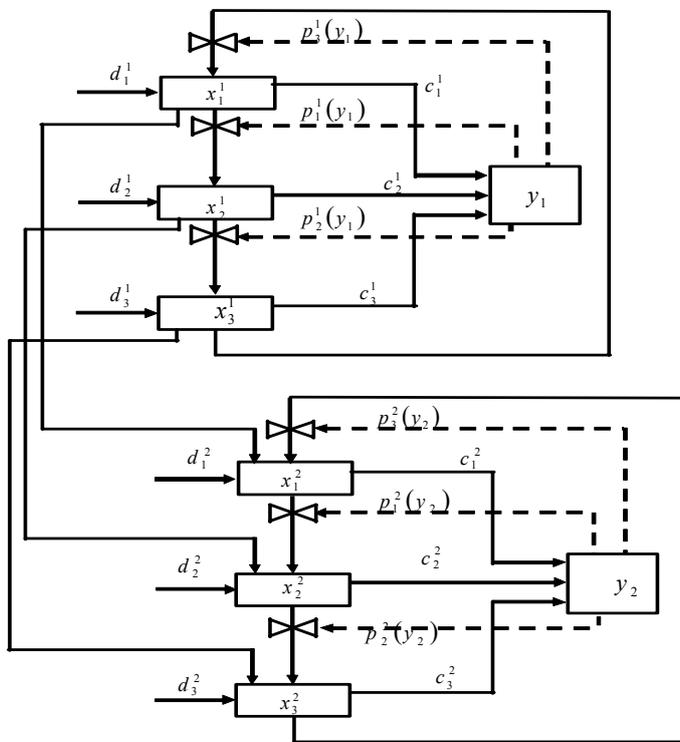


Рис. 1. Модель двухкластерной трехкомпарментной системы

Биомеханически это означает, что конечность (палец) не может демонстрировать точку покоя, которая общепринята в рамках ДСП. Мы не будем иметь  $dx/dt=0$  и  $x_i=const$ . С позиции физической механики это означает что вертикальная координата пальца в виде  $x_i=x_i(t)$  никогда не будет удовлетворять уравнению  $dx_i/dt=0$ . В ФПС, где  $x_i=x_i(t)$   $x_2=x_2(t)=dx_1/dt$ ,  $x_3=x_3(t)=dx_2/dt$ , мы получим некоторый квазиаттрактор (КА). Это означает что вектор  $x=x(t)=(x_1, x_2, x_3)$ , будет не-

прерывно двигаться в пределах ограниченного объема ФПС (это и есть КА). А параметры этого КА будут удовлетворять некоторому аналогу принципу неопределенности Гейзенберга.

При характеристике конкретного объекта исследования (испытуемого) – для каждого испытуемого в ТХС мы будем иметь свою правую часть неравенства  $\Delta x_1 * \Delta x_2 \geq V_G$ , где  $V_G$  – минимальный объем параметра КА, который характеризует данного человека, находящего в данных условиях.

Характерно, что в ТХС мы будем иметь не одно неравенство (что общепринято в квантовой механике), а два:  $\Delta x_1 * \Delta x_2 \geq V_G^{min}$  и  $\Delta x_1 * \Delta x_2 \leq V_G^{max}$ . Эти две граничные характеристики (объемы КА) будут характеризовать физиологический, психический, физический статус испытуемого. Но аналогия с новой механикой весьма характерна: Мы не можем изучать движение ВСС внутри КА (точнее оно не имеет смысла). Движение вектора внутри КА хаотично, как и у квантовой частицы внутри квантового ящика. Однако, ограничительные параметры КА ( $V_G^{min}$  и  $V_G^{max}$ ) реально характеризуют особенности состояния биосистемы. В нашем случае – это поведение биомеханической системы в виде постурального тремора.

Динамика поведения ВСС, характеризующего биомеханическую систему, является хаотической внутри ограниченного объема КА. Однако эта динамика ограничена (как и в квантовой механике) некоторыми предельными значениями, например, имеется нижняя граница  $V_G^{min}$ . Любые попытки управления тремором сознательно, например, при прицеливании, могут несколько изменить размеры этого КА, но уменьшить его до нуля (как и в квантовой механике) нельзя никаким образом. Фактически, роль (или доля) произвольности проявляется в пределах изменения границ этих двух КА ( $V_G^{min}$  и  $V_G^{max}$ ). Иными словами мы можем управлять частично размерами КА, но хаос вектора состояния в фазовом пространстве всё-таки будет демонстрировать произвольность движения (тремора).

Уровень возбуждения (и возбудимости) вышележащих структур, верхнего ие-

рархического кластера (головного мозга) существенно влияет на качество выполнения этого биомеханического акта – на параметры постурального тремора. Задача моделирования такого сложного процесса регуляции (частичной) параметров постурального тремора, особенно при выполнении задания по прицеливанию, будет во многом зависеть от возможностей компартментно-кластерного, иерархического моделирования подобных сложно организованных структур. Именно для целей моделирования регуляции параметрами хаоса при постуральном треморе мы и использовали компартментно-кластерное моделирование любого биологического хаоса и тремора в частности.

Одним из свойств любой БДС является свойство постоянного колебания системы. Для исследования данного свойства проводятся эксперименты по снятию треморограммы с пальца или кисти испытуемых и далее со всего тела в различных состояниях организма. Эти треморограммы могут быть образованы в рамках стохастики, например, расчёт АЧХ или автокорреляционных функций.

Данные графики представляют собой АЧХ, которые, для более детального анализа, с помощью программы на ЭВМ разделяются на отдельные графики, соответствующие низко-, средне- и высокочастотному диапазонам. Библиотека АЧХ может пополняться до тех пор, пока не будут выявлены так называемые маркеры (эталонные графики), по которым возможным станет идентифицировать состояние больного по одной лишь треморограмме. Однако в реальности для тремора мы можем получать бесконечное число функций распределения  $f(x)$  и АЧХ и поэтому мы перешли к другим методам обработки данных.

Суть эксперимента заключается в статическом удержании пальца над пластиной, фиксирующей положение руки по двум координатам – микроперемещения пальцев руки ( $x, m$ ) и скорость перемещения ( $v, m/c$ ). Каждый испытуемый проходит эксперимент в разных состояниях организма по три раза: до прицеливания, во время прицеливания и после прицеливания. Оче-

видно, что второй этап эксперимента соответствует вовлечению в данный процесс мозговой деятельности. То есть необходимо удерживать кисть руки в одном положении, осознанно контролируя ее неподвижность. При наличии цели движение становится произвольным, но его выполнение происходит непроизвольно, так как все  $f(x)$  будут разными, стохастика не работает.

Помимо АЧХ, рассматривается двумерное фазовое пространство, описывающее динамику поведения вектора состояния организма человека по координатам  $x$  и  $v$ , то есть в двухмерном фазовом пространстве.

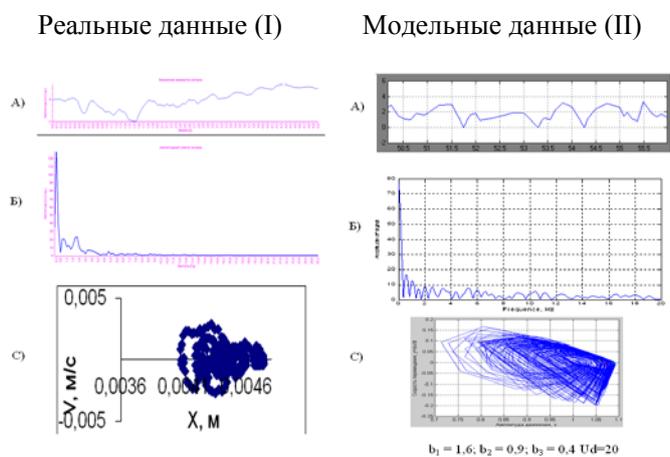


Рис. 2. Реальные (слева) и модельные (справа) данные на примере испытуемого D.Z.A. после прицеливания: а) реальный сигнал (А-I) и модельный сигнал (А-II) с выхода второго кластера; б) амплитудно-частотная характеристика реального (В-I) и модельного сигнала (В-II); в) фазовая плоскость реальная (С-I) и модельная (С-II) сигнала в координатах  $x$  и  $dx/dt$

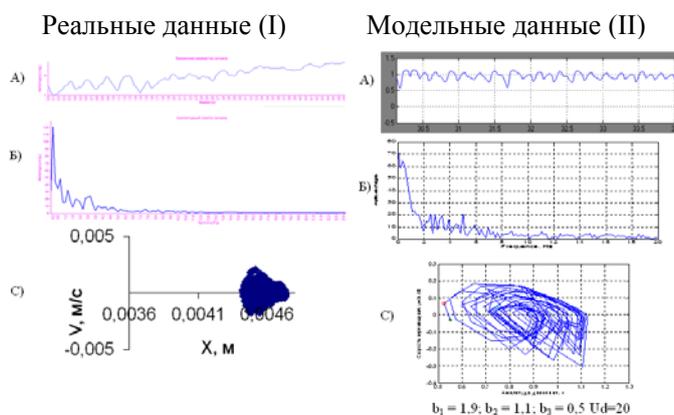


Рис. 3. Реальные (слева) и модельные (справа) данные на примере испытуемого D.Z.A. после прицеливания: а) реальный сигнал (А-I) и модельный сигнал (А-II) с выхода второго кластера; б) амплитудно-частотная характеристика реального (В-I) и модельного сигнала (В-II); в) фазовая плоскость реальная (С-I) и модельная (С-II) сигнала в координатах  $x$  и  $dx/dt$

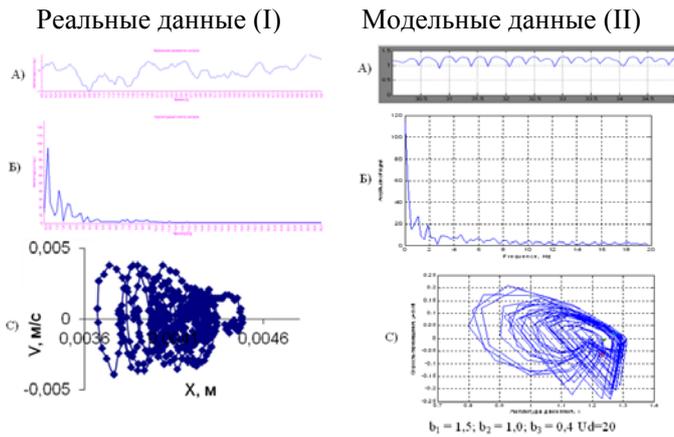


Рис. 4. Реальные (слева) и модельные (справа) данные на примере испытуемого D.Z.A. после прицеливания: а) реальный сигнал (А-I) и модельный сигнал (А-II) с выхода второго кластера; б) амплитудно-частотная характеристика реального (В-I) и модельного сигнала (В-II); в) фазовая плоскость реальная (С-I) и модельная (С-II) сигнала в координатах  $x$  и  $dx/dt$

Одновременно было проведено компартментно-кластерное моделирование данных процессов. Для моделирования использовались пакеты прикладных программ, реализующих имитационное моделирование поведения системы, состоящей из 2-х кластеров при различных начальных состояниях и различных значениях коэффициента диссипации ( $b$ ). Модель позволяет увидеть результат работы каждого кластера по отдельности и производить изменение коэффициента диссипации для реализации различных режимов работы. В результате работы имитационной модели при различных значениях коэффициента диссипации  $b$  на ее выходе формируются сигналы, которые по своим параметрам и характеру, согласуются с результатами обработки и оценки реальных сигналов.

На рис. 2, 3, 4 представлены реальные и модельные данные испытуемого D.Z.A. до, во время и после прицеливания соответственно. Это соответствует попыткам особого управления параметрами тремора. При этом традиционные стохастические параметры и без этого демонстрируют калейдоскоп изменений параметров вектора  $x=x(t)=(x_1, x_2)^T$  в ФПС, но в пределах ограниченных объёмов  $V_G^{max}$  этого фазового пространства. Такая ситуация аналогична движению элементарной частицы в потенциальной яме, то есть выполняется аналог принципа Гейзенберга.

По полученным данным можно отметить, что во время прицеливания площадь КА резко сжимается с  $10,6812 \cdot 10^{-7}$  у.е. до  $0,929832 \cdot 10^{-7}$  у.е., такую же динамику демонстрирует и модель, у которой площадь КА до прицеливания –  $0,52365$  у.е., а во время прицеливания –  $0,01478$  у.е., при этом частота реального и модельного сигнала уменьшается, а амплитуда – увеличивается. После прицеливания напряжение в системе заметно уменьшается, площади КА увеличиваются с  $0,929832 \cdot 10^{-7}$  у.е. до  $8,58307 \cdot 10^{-7}$  у.е. в реальной биологической системе и с  $0,01478$  у.е. до  $0,36120$  у.е. в модели, при этом частота реального и модельного сигнала увеличивается, а амплитуда – уменьшается (табл.).

Данный пример демонстрирует возможности модели в описании поведения нервно-мышечной системы человека (постуральный тремор пальца руки человека) при прицеливании. На протяжении всего эксперимента уровень управляющего воздействия был равен  $Ud=20$  у.е. Во время первого этапа (до прицеливания) значения коэффициентов диссипации составили:  $b_1=1,6$ ;  $b_2=0,9$ ;  $b_3=0,4$ . Во время второго этапа эксперимента, в данный процесс вовлекается активная мозговая деятельность и происходит увеличение коэффициента диссипации  $b$  ( $b_1=1,9$ ;  $b_2=1,1$ ;  $b_3=0,5$ ). За счёт усиления афферентации и появления обратной связи, так как есть необходимость удерживать кисть руки в одном положении, осознанно начинает контролироваться её неподвижность, что изменяет параметры тремора. После прицеливания происходит расслабление организма, и коэффициент диссипации  $b$  уменьшается ( $b_1=1,5$ ;  $b_2=1,0$ ;  $b_3=0,4$ ), то есть система почти возвращается в исходное состояние.

Результаты имитационного моделирования позволяют говорить о высокой согласованности полученных модельных данных с реальными сигналами, зарегистрированными у испытуемых в разных условиях. Для различных показателей ФСО человека необходимо подбирать коэффициенты  $b$  и  $Ud$  направлено, что в реальных биосистемах осуществляется мозгом человека или животного.

Таблица

**Площадь реальных и модельных квазиаттракторов испытуемого D.Z.A. до, во время и после прицеливания**

Испытуемый	D.Z.A.		
	До прицеливания	Во время прицеливания	После прицеливания
Площадь квазиаттрактора реальная	$10,6812 \cdot 10^{-7}$ у.е.	$0,929832 \cdot 10^{-7}$ у.е.	$8,58307 \cdot 10^{-7}$ у.е.
Площадь квазиаттрактора модельная	0,52365 у.е.	0,01478 у.е.	0,36120 у.е.

**Заключение.** Физиология биомеханических процессов существенно зависит от характера влияния вышележащих нейросетей головного мозга на эффекторный, нижележащий кластер, обеспечивающий непосредственное управление фактически произвольного (целевого) движения – удержание конечности в данной точке пространства. Качество выполнения этого произвольного (по цели), но непроизвольного по факту (реализации задачи постурального тремора) биомеханического акта несомненно протекает с участием нейросетей головного мозга, в частности, нейросетей сенсомоторной коры, структур стриопаллидарного комплекса, структур гигантоклеточного ядра и всей ретикулярной формации продолговатого мозга в целом.

Уровень возбуждения (и возбудимости) вышележащих структур, то есть верхнего иерархического кластера (головного мозга) существенно влияет на качество выполнения этого биомеханического акта, то есть на параметры постурального тремора. Задача моделирования такого сложного процесса частичной регуляции параметров постурального тремора, особенно при выполнении задания по прицеливанию, будет во многом зависеть от возможностей компартментно-кластерного, иерархического моделирования подобных сложно организованных структур. Именно для целей моделирования регуляции параметрами хаоса при постуральном треморе мы и использовали компартментно-кластерное моделирование хаоса и тремора, которая довольно адекватно представляет параметры тремора.

## Литература

1. Гавриленко Т.В., Балтикова А.А., Дегтярев Д.А., Еськов В.В., Пашнин А.С. Хаотическая динамика непроизвольных движений конечности человека в 4-мерном фазовом пространстве // Сложность. Разум. Постнеклассика.– 2012.– №1.– С. 86–94.
2. Еськов В.М., Гавриленко Т.В., Козлова В.В., Филатов М.А. Измерение параметров динамики микрохаоса в поведении реальных биосистем // Метрология.– 2012.– №7.– С. 39–48.
3. Еськов В.М., Балтикова А.А., Буров И.В., Гавриленко Т.В., Пашнин А.С. Можно ли моделировать и измерять хаос в медицине // Вестник новых медицинских технологий.– 2012.– Т. 18, № 2.– С. 412–414.
4. Еськов В.М., Хадарцев А.А., Еськов В.В., Филатова О.Е. Особенности измерений и моделирования биосистем в фазовых пространствах состояний // Измерительная техника.– 2010.– №12.– С. 53–57.
5. Еськов В.М., Брагинский М.Я., Вишневский В.А., Пашнин А.С., Ефимова Ю.С. Стохастические и хаотические методы в оценке качества подготовки спортсменов при решении задачи прицеливания. // Теория и практика физ. культуры.– 2011.– №1.– С. 87–90.
6. Еськов В.М., Гавриленко Т.В., Дегтярев Д.А., Еськов В.В., Балтикова А.А. Динамика квазиаттракторов параметров непроизвольных микродвижений конечностей человека как реакция на локальные термические воздействия // Вестник новых медицинских технологий.– 2012.– Т.19, № 4.– С. 26–29.
7. Иваницкий Г.Р., Есипова Н.Г., Абагян Р.А., Шноль С.Э. Биофизика.– 1986.– №30(3).– С. 418–421.
8. Иваницкий Г.Р. Вирази закономерностей. Правило БИО – стержень науки (под ред. А Б Медвинского).– М.: Наука, 2011.– 327 с.
9. Churchland M.M., Cunnigham J.P., Kaufman M.T. and others. Neural population dynamic reaching // Nature.– 2012.– V.487.– P.51–56.
10. 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.

11. 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.

12. Smolyaninov V.V. On the Origins of Some Debatable Biophysical Conceptions (What Life Is from Different Points of View) // Biophysica.– 2010.– Vol. 55, №3.– P. 563–576.

13. Walter G.G. On complex eigenvalues of compartmental models // Mathematical Biosciences.– 1985.– V.75.– P. 143–157.

14. Weaver W. Science and Complexity // E:CO.– 2004.– Vol. 6, №3.– P. 65–74.

### References

1. 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;1:86-94. Russian.

2. Es'kov VM, Gavrilenko TV, Kozlova VV, Filatov MA. Izmerenie parametrov dinamiki mikrokhosa v povedenii real'nykh biosistem. Metrologiya. 2012;7:39-48. Russian.

3. Es'kov VM, Baltikova AA, Burov IV, Gavrilenko TV, Pashnin AS. Mozhno li modelirovat' i izmeryat' kaos v meditsine? [Is it possible to simulate and measure chaos in medicine?]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2012;18(2):412-4. Russian.

4. Es'kov VM, Khadartsev AA, Es'kov VV, Filatova OE. Osobennosti izmereniy i modelirovaniya biosistem v fazovykh prostranstvakh sostoyaniy. Izmeritel'naya tekhnika. 2010;12:53-7. Russian.

5. Es'kov VM, Braginskiy MYa, Vishnevskiy VA, Pashnin AS, Efimova YuS. Stokhasticheskie i khaoticheskie metody v otsenke kachestva podgotovki sportsmenov pri reshenii zadachi pritselivaniya. Teoriya i praktika fiz. kul'tury. 2011;1:87-90. Russian.

6. Es'kov VM, Gavrilenko TV, Degtyarev DA, Es'kov VV, Baltikova AA. Dinamika kvaziattraktorov parametrov neproizvol'nykh mikro dvizheniy konechnostey chelo-

veka kak reaktsiya na lokal'nye termicheskie vozdeystviya [Dynamics of quasiattractors parameters of involuntary micromotions as a response to local thermic influences on human limbs]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. 2012;19(4):26-9. Russian.

7. Ivanitskiy GR, Esipova NG, Abagyan RA, Shnol' SE. Biofizika. 1986;30(3):418-21. Russian.

8. Ivanitskiy GR. Virazhi zakonmernostey. Pravilo BIO – sterzhen' nauki (pod red. A B Medvinskogo). Moscow: Nau-ka; 2011. Russian. Churchland MM, Cunnigham JP, Kaufman MT. and others. Neural population dynamic reaching. Nature. 2012;487:51-6.

9. 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.

10. 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.

11. Smolyaninov VV. On the Origins of Some Debatable Biophysical Conceptions (What Life Is from Different Points of View). Biophysica. 2010;55(3):563-76.

12. Walter GG. On complex eigenvalues of compartmental models. Mathematical Biosciences. 1985;75:143-57.

13. Weaver W. Science and Complexity // E:CO. 2004;6(3):65-74.