

# ДЕТЕРМИНИЗМ, СТОХАСТИКА И ТЕОРИЯ ХАОСА-САМООРГАНИЗАЦИИ В ОПИСАНИИ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ СЛОЖНЫХ БИОСИСТЕМ

Ватамова С.Н., Вохмина Ю.В., Даянова Д.Д., Филатов М.А.

*ГБОУ ВПО «Сургутский государственный университет ХМАО – Югры»*

*В традиционной биологической науке (биофизике, системном анализе биосистем) стационарные режимы биосистем описываются уравнением  $dx/dt=0$  для вектора состояния системы  $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ . Однако реальные биосистемы демонстрируют непрерывный хаос и  $dx/dt\neq 0$  всегда. Поэтому предлагается два новых подхода в анализе устойчивости биосистем. Первый – в рамках компартментно-кластерного подхода (представлен довольно подробно), второй – в рамках анализа параметров квазитракторов поведения биосистем. Показывается, что второй подход предпочтителен, т.к. он универсален и используется для всех биомедицинских систем в прагматических целях при их описании (моделировании). Компартментно-кластерный подход может быть применён для реальных сложных биосистем и характерные примеры мы представляем сейчас в рамках этой теории. Стационарные режимы респираторных нейросетей и систем управления движением представлены в данном сообщении.*

**Ключевые слова:** детерминистско-стохастический подход, компартментно-кластерный подход, теплинг.

## Введение

В рамках традиционного детерминистско-стохастического подхода (ДСП) стационарные режимы (СР) биосистем обычно представлялись в виде точек покоя, когда производные от вектора состояния системы (ВСС)  $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$  принимали нулевые значения ( $dx/dt=0$ ). Однако, такое состояние ВСС для сложных биосистем невозможно в принципе, т.к. в теории хаоса – самоорганизации (ТХС) любые сложные системы третьего типа (СТТ) постоянно находятся в хаотическом движении (2-й постулат теории хаоса – самоорганизации [1-4]). В настоящей работе для СТТ, находящихся в нормальном, без патологий, состоянии, отрицается сама возможность  $dx/dt=0$  и представляются два подхода в описании нового типа СР. Более того можно показать, что стационарный режим (СР) в виде  $dx/dt=0$  характеризует глубокую патологию или даже смерть организма, а нормальное состояние – это хаос в пределах ограниченных объемов фазовых пространств состояний (ФПС), обозначаемых нами как квазитрактор (КА).

Первый новый подход даётся в рамках компартментно-кластерного описания биосистем (разработан В.М. Еськовым [4-6] на основе анализа собственных значений матриц линейных приближений изучаемых биологических динамических сис-

тем (БДС). Второй подход представлен анализом параметров квазитракторов – областей фазового пространства состояний, внутри которых непрерывно и хаотически движется ВСС. В последнем случае особая идентификация СР реально описывает изменения внутри БДС, т.е. переходы биосистемы из одного состояния, которое идентифицируется как первый СР, в другое состояние, соответствующее другому СР. Такие переходы не могут быть описаны в рамках традиционного ДСП, т.к. реально и непрерывно  $dx/dt\neq 0$  и модели биосистем на основе детерминизма или стохастики не могут их представлять. Компартментно-кластерный подход и ТХС – это новые реалии сложных биосистем, которые основаны на особом понимании стационарных режимов и которые в ДСП не являются СР, а соответствуют непрерывному хаотическому режиму поведения БДС. Поэтому, СТТ не являются объектами традиционной науки и требуют новых методов и подходов [5, 6]. Один из таких подходов мы представляем в рамках ТХС в настоящем сообщении.

### 1. Невозможность применения ДСП для изучения устойчивости СТТ.

Общеизвестно, что традиционные, детерминистско-стохастические модели могут быть идентифицированы только при повторении процессов (состояний), которые происходят с биосистемами. Однако, еще

Ernst Walter Mayr [8] отмечал, что биосистемы ежеминутно изменяются. Это непрерывное изменение параметров вектора состояния (таких) систем  $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$  накладывает существенные ограничения на возможность описывать какими-либо функциями такие хаотически изменяющиеся биологические динамические системы. Это означает, что точки и линии в фазовом пространстве состояний могут описывать поведение реальных БДС только ретроспективно (как уже произошедшие события), т.е. в медицине такие модели лишены перспектив для прогноза состояния организма больного.

Прогностического значения такие ДСП-модели не имеют (будущее для таких моделей БДС не определено). Об этом писал И.Р. Пригожин в своём обращении к потомкам (см. «The Die is not Cast»[7]) и это означает, что для таких систем мы не можем определять не только будущее этих систем, но и значения частоты события  $P^*(A)=m/n$  (где  $m$ - число испытаний, в которых событие  $A$  наступило,  $n$  – общее число испытаний). Для уникальных (хаотических) процессов (систем) всегда будет  $m=n=1$ , а их будущее прогнозировать невозможно (нет повторов испытаний). Единичные, уникальные процессы (системы) непрогнозируемы и для них нельзя определять функции распределения  $f(x)$ , т.к. нет повторов начальных условий (начальных значений  $x(t_0)$  для ВСС в ФПС) и нет какого-либо прогноза для их будущего состояния, т.е. значений ВСС  $x(t_k)$ . Всё непрогнозируемо и не может быть повторно воспроизведено. Мы живем в мире хаоса и наша смерть (как  $x(t_k)$ ) совершенно не прогнозируема, конечное состояние параметров организма нельзя рассчитать, т.к. жизнь каждого человека единична и случайна. Жизнь человека, состояние нормы или патологии организма в принципе не могут быть повторены и воспроизведены, каждый организм не воспроизведим и уникален [1, 2, 5].

Понимание полной неопределенности и отсутствие предсказуемости в значениях параметров вектора состояния организма человека (ВСОЧ) приводит нас к осозна-

нию особых свойств систем третьего типа, к которым относится и организм человека. Если мы не можем повторять любое состояние БДС произвольно, то возникает вопрос о принципиальной невозможности стационарных режимов (в рамках ДСП) для таких уникальных систем. Может ли идти речь о СР, когда такой режим тоже должен быть повторяем и воспроизводим? Но повторяемость отсутствует для сложных БДС, которые находятся в непрерывном хаотическом движении своих ВСС (любой режим СТТ не прогнозируемый и не моделируемый в рамках ДСП). Эти СТТ имеют 5 особых свойств (принципов их организации) и 13 отличий от традиционных ДСП – систем [3-5]. Для таких особых БДС нет никаких возможностей описывать их СР в виде  $dx/dt=0$  (они в непрерывном хаосе) и для их описания требуются другие подходы и теории. Первая такая теория базировалась на компартментно-кластерном подходе (ККП) в котором  $dx/dt=0$  возможна, если вариации ВСС можно отнести к величинам погрешностей. Иными словами, мы пренебрегаем размерами квазиаттракторов – областей, внутри которых мы наблюдаем непрерывное движение ВСС. В ККП свойствами отдельных элементов мы пренебрегаем, а работаем сразу с пулами, компартментами или кластерами. Это реализует 1-й принцип ТХС, который вводил еще Н.Накен.

В целом, компартментно-кластерная структура СТТ – это первый принцип их организации, второй – glimmering property (непрерывное движение ВСС в ФПС в пределах квазиаттракторов), третий и четвёртый принцип – эволюция и телевологическое движение ВСС к конечному квазиаттрактору. Наконец, пятый принцип организации СТТ – возможность гигантских отклонений от исходных значений ВСС в ФПС (выход за пределы не только 3-х сигм, но и 10-ти, 20-ти сигм). Эти гигантские выходы за 20 сигм описываются в синергетике как эффект бабочки. Однако, мы лукавили, когда говорили об обычности таких явлений. «Бабочкой» становятся элементы – параметры порядка, которые очень редкие. Например, гении в общест-

ве, которые существенно влияют на динамику развития всего человечества, они являются параметрами порядка. Таким образом, крайне редкие «эффекты бабочки» возникают только с параметрами порядка и необходимо иметь методы их идентификации. В персонифицированной медицине это наиболее важные диагностические признаки и их надо уметь выделять. Это составляет основу системного синтеза и всего синергетического подхода, но сегодня это многими не понимается или просто игнорируется. Но это базовое свойство complexity, значит мы ошибочно трактуем понятие complexity, блуждаем в тумане неопределённых понятий.

## **2. Первый постулат ТХС – граница аналитического описания биосистем.**

Напомним, что переход от детерминистско-стохастической парадигмы (или подхода) к теории хаоса-самоорганизации исходно происходил в рамках возникновения синергетики (H. Haken) и трансформации синергетики в ТХС. Сама синергетика базируется на 1-м постулате H. Haken: мы не работаем с отдельными элементами системы, а только со всей системой в виде пуллов, компартментов, кластеров [9]. Этот постулат применим только к однородным системам, в которых нет параметров порядка и нет иерархии. Об этом сейчас никто из сторонников синергетики не говорит и в этом – главная проблема и трудности синергетики. Вопрос об однородности, изотропности complexity даже не затрагивается – а это уже ошибка науки. Для иерархических систем постулат H. Haken не применим, т.к. главного иерарха невозможно исключить (система изменится). Более того, этот иерарх (в таких иерархических системах) задаёт динамику поведения всех лежащих ниже стратов (подсистем), они зависимы от него. В постулате H. Haken это отсутствует, а в ТХС мы это учитываем. Более того, в ТХС мы разработали три новых метода идентификации параметров порядка, что полностью отсутствует сейчас не только в синергетике, но и во всей современной науке. Вообще говоря, это главная задача всех когнитивных наук. Мы не знаем как человек

выбирает главные переменные и как он занимается эвристической деятельностью. Однако, сейчас мы готовы представить три алгоритма для решения задачи системного синтеза. Первый из них базируется на ККП.

В рамках 1-го постулата H. Haken 30 лет назад В.М. Еськовым была построена компартментно-кластерная теория биосистем (ККТБ), которая описывает однородные системы и иерархические [9-12]. При этом в пределах компартмента или кластера все элементы однородны и 1-й постулат H. Haken для таких систем будет применим. Для компартментно-кластерных систем нашей научной школой разработана специальная теория устойчивости биосистем, которая является промежуточной теорией между традиционной теорией устойчивости БДС в рамках ДСП (она аналитическая по сути и использует исследования точек покоя, когда  $dx/dt=0$ ) и новой ТХС, которая вообще отрицает существование СР в виде  $dx/dt=0$  (или точек покоя) для любых биосистем, относящихся к системам третьего типа – СТТ. Для СТТ всегда  $dx/dt \neq 0$  а  $x_i \neq const$  и нет СР в интерпретации ДСП, т.к. все complexity находятся в непрерывном хаотическом режиме, который для них может интерпретироваться как стационарный.

В рамках ККТБ вводится понятие погрешности измерения (как погрешности в динамике поведения БДС) и в пределах этих погрешностей считается приблизительно постоянными значения всех компонент  $x_i(t)$  вектора состояния системы (ВСС). Иными словами, СР в ККТБ имеет условный характер, но сама процедура исследования устойчивости для реальных БДС отлична от обычных ДСП-методов. Рассмотрим отличие методов идентификации устойчивости СР для БДС в ККТБ от обычной ДСП-процедуры на примере теории устойчивости по А.М. Ляпунову. Предварительно отметим, что в ККТБ для изучения устойчивости БДС мы требуем непрерывного мониторинга СР для реальных БДС, т.к. в любой момент имеется возможность начала эволюции биосисте-

мы (в любой момент времени) параметры системы могут резко изменяться.

Параметры ВСС непрерывно изменяются, ВСС перемещается, мерцает и может выходить и за 10 сигм, и даже за 20 сигм, что в плане повторяемости в миллиарды раз превышает возраст нашей Вселенной, т.е. такое событие происходит один раз за  $10^{18}$  лет. Все такие крайне редкие явления невозможны в физических, химических или технических системах, где работают законы ДСП. Однако, они свободно происходят с БДС-complexity, т.е. с СТТ. Все течет – все изменяется и ДСП-модели имеют только ретроспективный характер. Они описывают прошлое БДС, то, что уже произошло и никогда больше с данной системой не произойдет из-за того, что сама система эволюционирует (и не вернётся в исходный квазиатрактор). Ретроспективный характер ДСП-науки совершенно не подходит для описания реальных СТТ. Поэтому, на первом этапе развития ТХС мы использовали только один (первый постулат Н.Накен) принцип организации БДС – компартментно-кластерный принцип. Однако, в рамках непрерывного мониторинга и хаотического поведения СТТ мы строим и анализируем реальные модели. Это можно делать только в рамках коротких интервалов изменения ВСС, т.е. с учетом реалий стационарности параметров квазиатракторов БДС и времени наблюдения реакции биосистем на внешние возмущения в виде  $y=y(t)$ .

Такой мониторинг модели и реакции самой СТТ является первым шагом на пути признания реальных свойств БДС, которые находятся в непрерывном хаотическом движении и непрерывной эволюции ВСС в ФПС в виде движения квазиатракторов к некоторой телеологической цели. Стационарный режим в виде  $dx/dt=0$  и его идентификация на устойчивость в рамках ДСП отходит в прошлое. В рамках компартментно-кластерного подхода (ККП) мы должны непрерывно мониторировать реакции БДС на внешние возмущения (ВУВы) и непрерывно наблюдать динамику матриц  $A$ , их собственных значений  $\lambda_i$  во

времени. Если  $\lambda_i$  не изменяются в рамках определенных математических условий (см. ниже конкретные примеры), то можно считать, что БДС находится в стационарных режимах. В противном случае стационарные режимы и интервалы устойчивости изменяются и мы имеем дело с отсутствием стационарного режима уже не в рамках ДСП, а в рамках ТХС с состоянием БДС, когда имеется переход БДС из одного состояния в другое, т.е. при переходе из одного квазиатрактора в другой КА. При этом постоянно  $dx/dt \neq 0$  и функции распределения непрерывно изменяются.

Такой подход, на основе ККП, требует непрерывного мониторинга отклика СТТ на ВУВы, что не очень удобно и требует непрерывного возбуждения БДС и их проверки на квазилинейность и стационарность по значениям  $\lambda_i$ . При этом постоянно необходимо использовать метод минимальной реализации (ММР) для определения  $\lambda_i$ . Все это создает определенные неудобства в определении СР. Однако, главное неудобство в том, что в рамках этого 2-го подхода все-таки не учитываются реальные свойства СТТ в виде glimmering property (они в рамках ККП просто уходят в область погрешности), что в корне неверно.

Для учёта особых 5-ти свойств СТТ и 13-ти их отличий от ДСП – системами нами был разработан новый подход в рамках теории хаоса-самоорганизации, который не требует непрерывного задания ВУВов и идентификации матриц линейных приближений (с их инвариантами  $\lambda_i$ ) реальных СТТ. Этот третий подход, отличный от ДСП и ККП требует только мониторинга параметров компонент ВСС  $x_i=x_i(t)$  и построения (расчета) квазиатракторов в ФПС (координат центров КА и их размеров (граней) для расчета объемов КА в ФПС). Такая процедура значительно проще ДСП и ККП и более точно отображает реальное состояние БДС – complexity. Практические результаты такого подхода будут представлены в другом сообщении, а сейчас в параграфе 3 представим результаты 2-го подхода в идентификации СР

для СТТ и устойчивости этих режимов в рамках анализа ответов БДС на внешние воздействия и анализа инвариант матриц А линейных приближений.

### 3. Инварианты матриц в оценке стационарных режимов БДС с позиций компартментно-кластерного подхода.

При построении общих математических моделей необходимо учитывать ряд свойств, которыми обладают сложные БДС. В первую очередь следует отметить компартментно-кластерную организацию complexity. Таким образом, любая БДС или ее составная часть (кластер) состоит из компартментов (элементов, схожих по морфологическим, функциональным или др. признакам). Очевидно, что компартменты либо обеспечивают достижение некоторой единой цели, либо выполняют сходные функции. Если рассмотреть организацию непроизвольных микроколебаний (тремора) пальца кисти руки, то в этом процессе участвуют два кластера: верхний кластер нервной регуляции и второй кластер ДЕ с их спинальным управлением. В первом кластере, нервной регуляции (центральной нервной системы - ЦНС), можно выделить сильно коррелирующие группы нейронов, которые участвуют в определенных периодах управления двигательным актом (например, нейрогуморальная регуляция). Подобная ситуация имеется и в мышцах, когда для совершения акта движения активизируется целый пул мышечных клеток (миофибрилл), участвующих в этом акте [4,5,8]. Причем последние так же являются примером компартментно-кластерной организации. В процессе функционирования нервно-мышечной системы можно выделить отдельные компартменты (блоки) нейронов и представить структурную схему организации управления нервно-мышечной системы, осуществляющей тот или иной физиологический акт.

Во-вторых, между компартментами существуют связи, посредством которых сами компартменты организовывают структуры. При этом связи могут быть положительными и отрицательными. В случае, когда коэффициенты связей меж-

ду компартментами  $a_{ij}$  не отрицательны, т.е.  $a_{ij} \geq 0$ , когда матрица  $A = \{a_{ij}\}_{i,j=1}^m$  межкомпартментальных связей не содержит отрицательных элементов, то говорят, что система синергична. Между компартментами существуют возбуждающие (энергетические) связи. Если  $a_{ij} < 0$ , то происходит явление торможения со стороны  $j$ -го компартмента на  $i$ -й компартмент. Если элементы матрицы положительны ( $a_{ij} > 0$ ), то имеется синергическая связь между этими компартментами, при  $a_{ij} = 0$  связи между компартментами отсутствуют. Если все  $a_{ij} \geq 0$ , то биосистема полностью синергична, т.к. нет угнетения между элементами.

Третья особенность компартментно-кластерного подхода (ККП) заключается в наличии интегративной величины  $y$ , выполняющей оценку и регуляцию функционирования любой сложной биологической динамической системы на любом уровне организации живой материи. В простейшем случае интегрированная активность всей сети может быть представлена формулой (2):

$$y = \sum_{i=1}^m c_i x_i, \quad (2)$$

где  $c_i$  – весовые коэффициенты вклада вектора  $X$  в некоторую выходную величину  $y$  ( $i=1,..,m$ );  $x_i$  – мгновенно усредненная во времени активность  $i$ -того компартмента.

Следует отметить, что выше упомянутые потоки могут осуществлять движение как вовнутрь системы, так и наружу. То есть любая БДС является открытой системой. В компартментно-кластерной теории биосистем эти потоки описываются вектором  $d = \{d_i\}_{i=1}^n$  и скалярной величиной  $u$ , влияющей одинаково на все компартменты БДС. Таким образом, внешние управляющие драйвы  $Ud$  обеспечивают влияние на систему извне и приводят при определенных значениях к возникновению бифуркаций рождения циклов и создания элементов нелинейности, усложняя тем самым динамику поведения БДС. Вместе с этим любая БДС характеризуется лимитирующим фактором, который определяется значением вектора состояния этой

системы  $x=(x_1, \dots, x_n)^T$ . Зачастую такой лимитирующий фактор имеет смысл диссипации энергии (информации, массы). В простейшем случае зависимость скорости изменения вектора состояния  $dx/dt$  от величины  $x$  может носить линейный характер, т.е.  $dx/dt \approx -bx$ , где коэффициент диссипации  $b=const$ . В теории маятника именно такое слагаемое описывает силы трения. При внешних управляющих воздействиях диссипация  $b$  становится функцией  $x, u$  или других переменных. Тогда возникает возможность прямого или непрямого управления в БДС, из-за чего система становится нелинейной [4-6].

Функция регуляции потоков в системе осуществляется с помощью отрицательных обратных связей  $p(y)$  вентильного типа. Причем функции обратных связей  $p_{ij}(y)$  организуют тормозной процесс и образуют матричную функцию тормозных воздействий  $P(y) = \{p_{ij}(y)\}_{i,j=1}^m$ . При этом функциональный элемент  $p_i$  такой матрицы имеет специальные свойства. Во-первых, функция  $p_i(y)$  является не возрастающей (убывающей) функцией от  $y$ . Во-вторых, для всех элементов выполняется условие  $p_i(y) > 0$  (вариант, когда  $P(y) < 0$  может быть справедлив для некоторого короткого интервала времени, тогда связность между пулами может быть отрицательной). Таким образом, увеличение интегративного показателя системы приводит к усилению отрицательной обратной связи и соответственно ослаблению потоков (возбуждения энергии, массы, информации), обеспечивающих функционирование БДС. Тормозные процессы зависят от интегративной величины кластера нервно-мышечной системы. Однако, прямых экспериментальных доказательств существования тормозных взаимодействий между мышечными пулами многих классов нет. С другой стороны в работе любой нервно-мышечной роль тормозных процессов огромна. Поэтому будем учитывать тормозные процессы не как результат прямого взаимодействия между пулами, а через посредство некоторой

функции, зависящей от активности текущего пула  $x_j$ . При этом ограничимся только некоторыми свойствами этой функции, которые имеют экспериментально доказанное существенное биологическое значение. Например, торможение в компартментных сетях будет ослаблять интенсивность возбуждения от  $j$ -го пула на  $i$ -й в  $p_j(y)$  раз. Таким образом, передача возбуждения будет определяться величиной  $a_{ij}p_j(y)$ .

Любая сложная биологическая динамическая система с компартментной организацией может находиться как в различных динамических режимах, так и в стационарном состоянии  $dx/dt = 0$ , описываемом в математике точкой покоя (ТП). Динамические и переходные режимы (в частности, устойчивые колебания) представляют для исследователей большой интерес, так как описывают микро- и макроэволюцию биосистем в фазовых пространствах состояний [6-8]. Таким образом, математическое описание любой БДС может быть следующее:

$$\begin{aligned} dx/dt &= AP(y)x - bx + ud \\ y &= C^T x \end{aligned}, \quad (3)$$

где  $A$  – матрица весовых коэффициентов  $a_{ij}$  ( $i \neq j$ ) влияния  $j$ -того компартмента на  $i$ -тый;  $P(y)$  – матрица связей, обеспечивающая перекрытие возбуждающих потоков между компартментами (отрицательная обратная связь);  $b$  – коэффициент диссипации (рассеяния) возбуждения;  $u$  – скалярная величина внешнего воздействия;  $d$  – вектор весовых коэффициентов  $d_i$  влияния управляющего драйва на  $i$ -тый компартмент.

В ККТБ система (3) является базовой для изучения любой БДС, а также биосистем, находящихся в стационарном (квазистационарном) состоянии.

Следующее утверждение основано на принципе иерархической организации любой компартментно-кластерной БДС, где существуют различные уровни организации живой системы. Иерархическая организация БДС с позиций ККП описывается блочно-треугольной матри-

цей  $A = \{A_{i,j}\}_{i,j=1}^m$ , состоящей из элементов  $A_{i,j}(i \neq j)$ , которые представляют собой межклластерные связи. В таком случае параметры  $y$ ,  $d$  и  $C$  будут иметь вид матриц, а система (3) будет описывать компартментно-клластерную структуру БДС.

Анализируя выше перечисленные базовые принципы компартментно-клластерной теории биосистем и учитывая возможность описания в рамках ККП различных динамических режимов системы, становится очевидным применение данной теории для построения адекватных математических моделей хаотической динамики поведения complexity, так как ККТБ позволяет наиболее точно отразить реальную биологическую структуру исследуемого объекта.

Для моделирования процесса непроизвольных микролебаний пальца кисти руки человека, необходимо учитывать наличие двух клластеров – управляющего и управляемого. Таковыми являются соответственно иерархическая структура ЦНС и эфферентный клластер, формирующий непроизвольные колебания (тремор). При этом управляемый клластер может состоять в простейшем случае из трех компартментов, где эти все компартменты - объединения трех типов нейромоторных групп (ДЕ), которые поочередно включаются в работу и обеспечивают последовательные (каждущиеся непрерывными) сокращения этих трех групп мышечных компартментов. Верхние уровни иерархии для систем организации непроизвольных микроперемещений представляют собой (кроме собственно сегментарного) бульбарные, надбульбарные структуры, моторную зону коры головного мозга [6]. С этих структур оказывается управляющее нисходящее воздействие на работу клластера двигательных единиц.

Количество компартментов выбрано равным трем неслучайно. Согласно известной теореме [8], организация периодических решений в компартментных системах управления невозможна в следующих случаях: 1) если отрицательная обратная связь в равной степени влияет на

взаимодействие отдельных компартментов; 2) если система состоит только из двух взаимодействующих пуллов; 3) если влияние отрицательной обратной связи на межкомпартментное взаимодействие мало. НМС с выше перечисленными условиями будет находиться в тоническом, статическом состоянии.

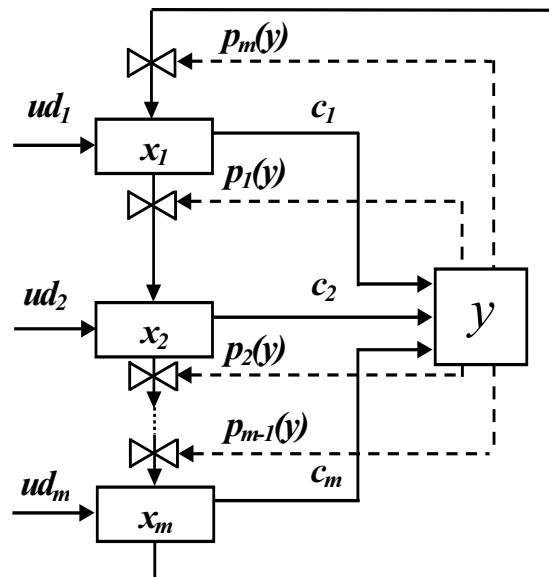


Рис.1. Граф неразложимой циклической респираторной нейронной сети (РНС)

Ранее В.М. Еськовым было показано, что в таких системах возникают периодические режимы, если  $m \geq 3$ . Биологически это имеет простейшую интерпретацию: всегда в нервной системе имеются афференты (1-й компартмент), центральное звено (2-й компартмент) и эфферентный блок в виде мотонейронов. Такие трёхкомпартментные системы составляют основу рецепции и любого двигательного акта. Однако, в реальной ситуации у человека всегда мы выделяем спинальный уровень (нижний клластер) и уровень головного мозга (верхний, иерархический уровень). Высший клластер получает информацию о состоянии всего организма (в том числе и о состоянии нижнего, моторного клластера) и он тоже имеет компартментную структуру. В общем случае такие системы имеют двухклластерную структуру, которая содержит в минималь-

ной конфигурации шесть компартментов, по три в каждом кластере.

Графовая структура шестикомпартментной, двухкластерной биосистемы представлена на рис. 2.

#### 4. Стационарные режимы биосистем с позиций ККТБ.

Для двухкластерных моделей режимы  $dx/dt \neq 0$  весьма специфичны. Однако, если стационарный режим трактовать как сохранение квазиаттрактора, то ситуация резко изменяется.

Для моделирования использовались пакеты прикладных программ, реализующих имитационное моделирование поведения системы 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 на ее выходе формируются сигналы, которые по своим параметрам и характеру, согласуются с результатами обработки и оценки реальных сигналов. На рис. 3 приведён пример моделируемого сигнала и его обработки совместно с сигналом произвольных движений человека (регистрация теппинга на трепомографе) и его обработки.

Результаты поведения вектора состояния в имитационной модели после увеличения коэффициента диссипации  $b$  представлены на рис. 4, где наблюдается моделируемый сигнал (I) и сигнал произвольных движений человека (II) после принятия 500 мл. слабоалкогольного напитка.

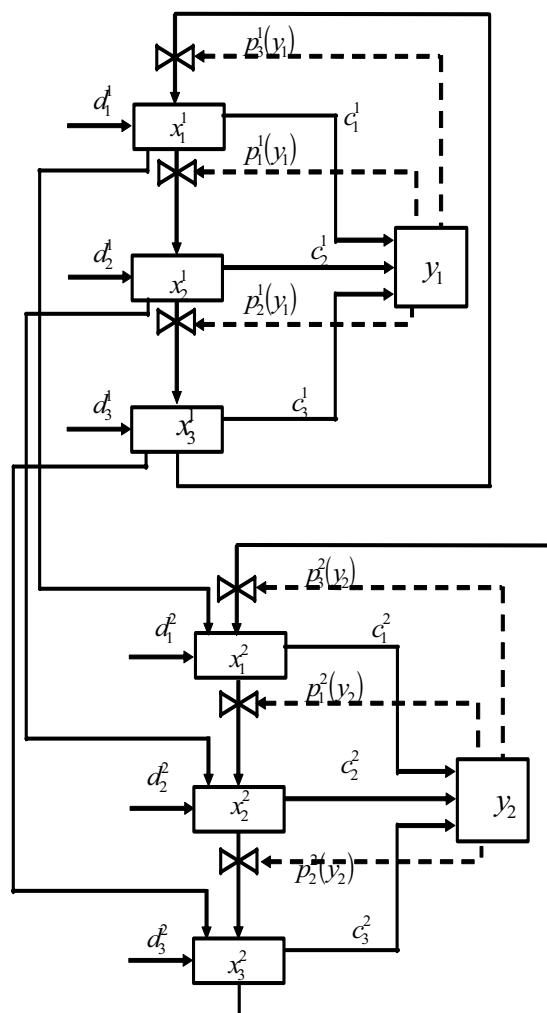


Рис. 2. Модель двухкластерной трехкомпартментной системы

Из сравнения рис. 3 и 4 видно, что при увеличении коэффициента диссипации ( $b$ ) происходит уменьшение объема КА как на моделируемом сигнале ( $V_G = 1,7$  у.е. при коэффициенте диссипации  $b = 1,1$ ;  $V_G = 0,5$  у.е. после увеличения коэффициента диссипации  $b = 1,6$ ), которое наблюдается и в реальном сигнале при регистрации произвольных движений человека – теппинга в условиях принятия слабоалкогольного напитка ( $V_G = 5,2 \cdot 10^{-5}$  до принятия слабоалкогольного напитка;  $V_G = 1,5 \cdot 10^{-5}$  после принятия 500 мл. слабоалкогольного напитка). В данном случае небольшая доля алкоголя оказывает успокаивающие действие на систему регуляции движением. Однако, большие дозы дают обратную картину (квазиаттракторы увеличиваются).

Значения объемов квазиаттракторов  $V_G$  модельных данных и при регистрации произвольных движений человека – теппинга изменяются скоррелированно в сторону уменьшения.

В целом, при увеличении коэффициента диссипации происходит уменьшение площади КА, подобное наблюдается при регистрации произвольных движений человека – теппинга после принятия дозы алкогольного напитка или в условиях раздражения слухового (зрительного) анализатора.

Компартментно – кластерное моделирование выходного сигнала в зависимости от изменений коэффициента диссипации соответствует изменению уровня возбуждения в нейросетях мозга. Однако, при увеличении дозы алкоголя, нарастании физической нагрузки и т.д. картина резко изменяется: напряжение в организме резко падает и коэффициент диссипации  $b$  в модели тоже уменьшается, при этом объемы КА нарастают. Тремор при повышении дозы алкоголя резко изменяет параметры квазиаттракторов.

### Выводы

Двухкластерная трехкомпартментная иерархическая модель НМС позволяет описывать динамику поведения реальных биомеханических систем человека при постуральном трепоре. В рамках этого подхода возможно дальнейшее развитие модели для описания различных видов функционирования ФСО человека в зависимости от изменения параметров бифуркации  $u$ (управляющего драйва),  $b$  (коэффициента диссипации) и активностей компартментов.

Впервые продемонстрировано влияние величины коэффициента диссипации на выходной моделируемый сигнал трехкомпартментной двухкластерной биосистемы. Такая же картина наблюдается и при анализе реальных данных, полученных в различных физиологических условиях. Фактически, увеличение значения коэффициента диссипации приводит к существенному изменению площади квазиаттрактора (при значении коэффициента диссипа-

ции  $b = 1,1$ , площадь квазиаттрактора  $V_G = 1,7$  (у.е.); при  $b = 1,6$ ,  $V_G = 0,5$  (у.е.)). В целом, трехкомпартментная двухкластерная модель позволяет описывать биосистемы, находящиеся в различных условиях и под воздействием разных факторов среды.

### Литература

1. Анохин П.К. Кибернетика функциональных систем. – М., Медицина, 1998. – 285 с.
2. Буданов В.Г. Методологические принципы синергетики // Новое в синергетике / Под ред. Г.Г. Малинецкого. – М.: Наука, 2006. С.312-322.
3. Еськов В.В., Вохмина Ю.В., Гавриленко Т.В., Зимин М.И. Модели хаоса в физике и теории хаоса-самоорганизации // Сложность. Разум. Постнеклассика. – 2013. – № 2 – С. 42-56.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Eskov V. M, Eskov V.V., Filatova O.E., Filatov M.A. Two types of systems and three types of paradigms in systems philosophy and system science // Journal of Biomedical Science and Engineering. – 2012. – Vol. 5, №. 10. – P. 602-607.

9. Haken H. Principles of brain functioning: a synergetic approach to brain activity, behavior and cognition (Springer series in synergetics). Springer. 1995. 349 P.
10. Prigogine I. The Die Is Not Cast // Futures. Bulletin of the Word Futures Studies Federation. Vol. 25. № 4, January 2000. P. 17-19.

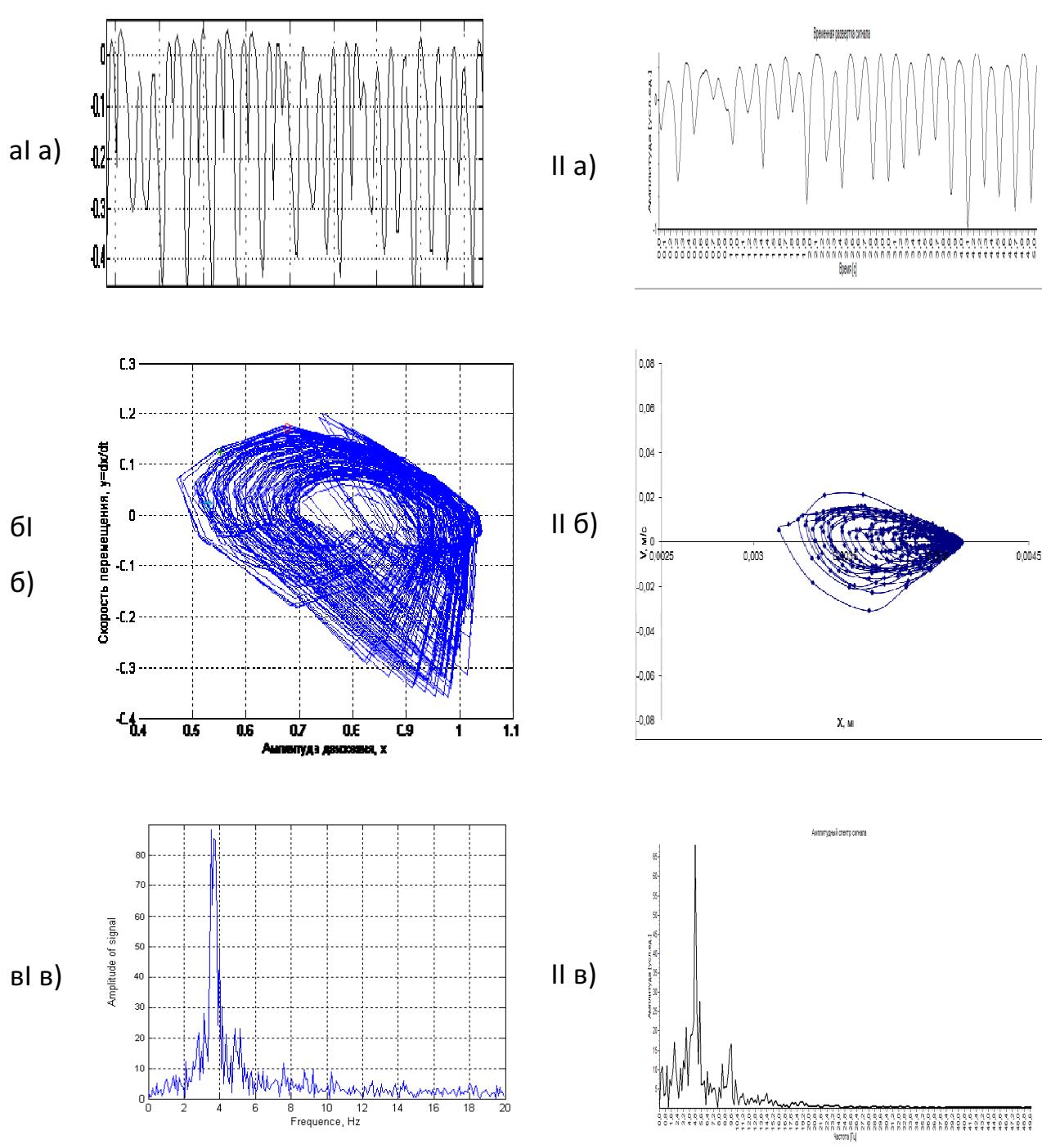
**DETERMINISM, STOCHASTICS AND  
THE CHAOS THEORY OF SELF-IN  
DESCRIPTION  
STATIONARY MODES OF COMPLEX  
BIOSYSTEMS**

*Vatamova S.N., Vohmina Y.V.,  
Dayanova D.D., Filatov M.A.*

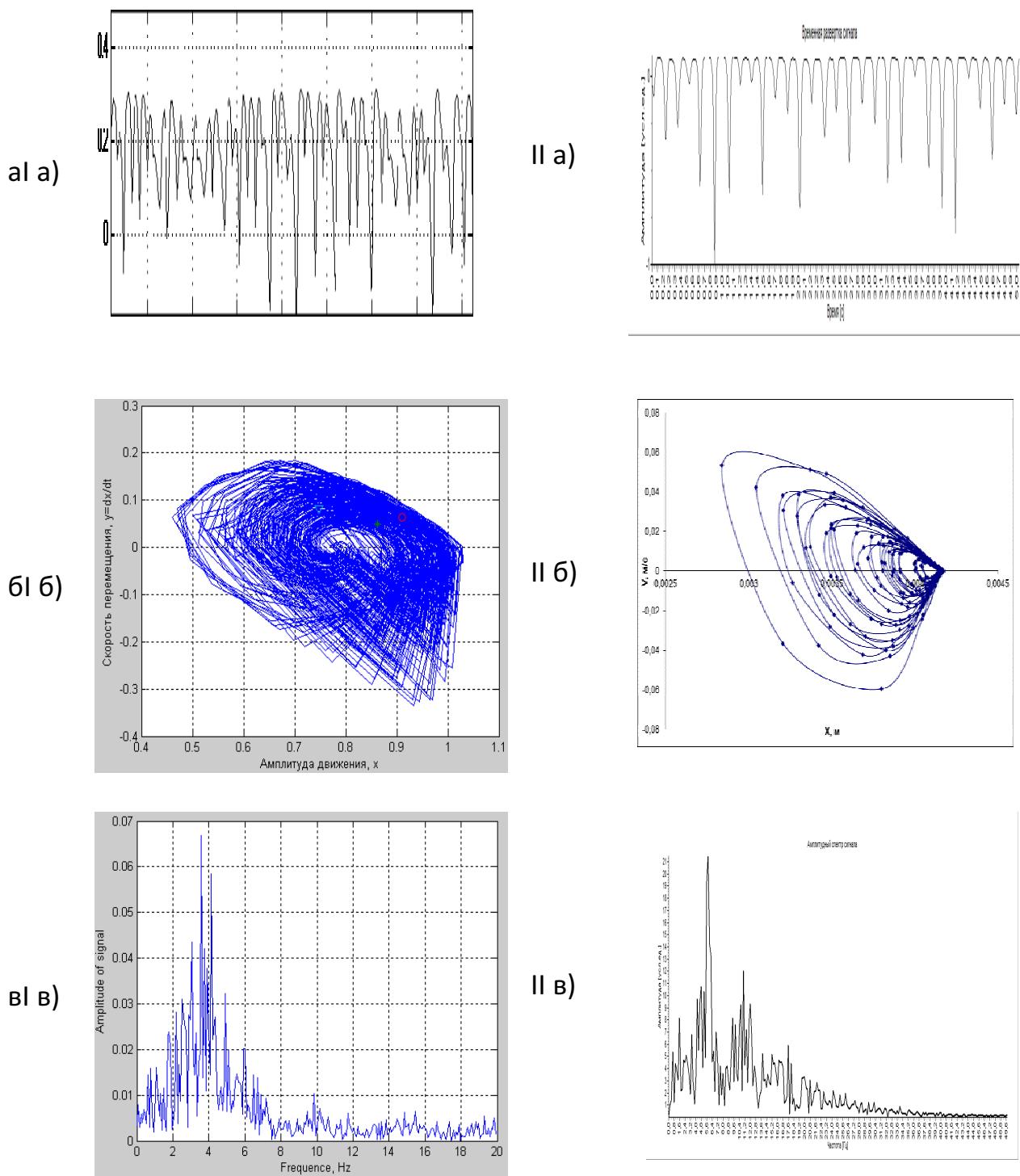
*Traditional biological science (biophysics, systems analyses of biosystems) stationary mode of biosystems describes according to equation  $dx/dt=0$  for the systems state vector  $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ . But real biosystems demonstrated uninterrupted chaotic dynamics when  $dx/dt\neq 0$  is always uninterrupted. We present two types of approaches for stationary mode investigation for biosystems. The first approach is based on the compartmental-cluster theory and the second approach is based on the theory of chaos-self-organization. The last is more convenient for real biosystems description because there are pragmatic results of its use. The compart-*

*mental-cluster approaches may be used for real complex biosystems and some typical examples of such theory we present now. The stationary mode of hierarchical respiratory neural networks and systems of moving control were illustrated.*

**Key words:** deterministic-stochastic approach, compartmental-cluster approach, tapping.



*Рис.3. Пример модельного сигнала и его обработки: а) модельный сигнал с выхода второго кластера и реальный сигнал; б) фазовая плоскость модельная (I) и реальная (II) сигнала в координатах  $x$  и  $dx/dt$ ; в) амплитудно-частотная характеристика модельного и реального сигнала. Здесь I – моделируемый сигнал, II – сигнал от реальных произвольных движений человека до действия алкогольного напитка*



*Рис. 4. Пример модельного сигнала и его обработки: а) модельный сигнал с выхода второго кластера; б) фазовая плоскость сигнала в координатах  $x$  и  $dx/dt$ ; в) амплитудно-частотная характеристика сигнала. Здесь I – моделируемый сигнал, II – сигнал от реальных произвольных движений человека под действием алкогольного напитка (после принятия 500 мл. слабоалкогольного напитка)*