

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

## Нелинейная динамика мозга: Эмоции и интеллектуальная деятельность

М.И. Рабинович, М.К. Миозинолу

*Исследования активности нервной системы и деятельности мозга обычно базируются на предположении, что восприятие, эмоции и когнитивные функции могут быть поняты на основании анализа установленных нейронных процессов и статических томографических "портретов". В этом обзоре обсуждаются новые идеи и подходы, опирающиеся на анализ нестационарных процессов и метастабильных состояний. Переходная динамика характеризуется двумя основными свойствами: структурной устойчивостью и чувствительностью к информационным сигналам. Обсуждаемые идеи и методы позволяют объяснить обнаруженные в экспериментах метастабильные состояния и последовательные переходы между ними и предлагают новые подходы к анализу поведения. Предложены модели эмоциональной и когнитивной активности мозга. Математический объект, отображающий наблюдаемые переходные процессы мозга в фазовом пространстве модели — это структурно устойчивый гетероклинический канал. Иллюстрируется возможность построения на базе предложенных моделей количественной теории некоторых эмоциональных и когнитивных функций.*

PACS numbers: 05.45.-a, 87.18.Sn, 87.19.L-, 87.19.Ij

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004b.0371

### Содержание

1. Введение. Что мы собираемся обсуждать и почему это своевременно? (371).
  - 1.1. Динамические модели интеллектуальных функций.
  - 1.2. Томография мозга.
  - 1.3. Динамика эмоций.
2. Моды мозга (373).
  - 2.1. Пространство состояний.
  - 2.2. Функциональные нейронные сети.
  - 2.3. Эмоционально-когнитивный тандем.
  - 2.4. Динамические модели сознания.
3. Конкуренция — надёжность и чувствительность (377).
  - 3.1. Устойчивые переходные движения вместо аттракторов.
  - 3.2. Когнитивные переменные.
  - 3.3. Переменные, описывающие эмоции.
  - 3.4. Метастабильность и динамические принципы.
  - 3.5. Конкуренция без победителя — структурная устойчивость переходных режимов.
  - 3.6. Примеры. Конкурентная динамика сенсорных систем.
  - 3.7. Устойчивость переходных процессов.
  - 3.8. Формальное описание.
  - 3.9. Иерархия информационных потоков. Гетероклиническое дерево.
4. Базовая экологическая модель (382).
  - 4.1. Системы Лотки–Вольтерра.
  - 4.2. Стресс и гистерезис.
  - 4.3. Взаимодействие настроения и мышления в покое.
5. Заключение (385).

Список литературы (386).

Это огромное удовольствие  
думать о том, как мы думаем.  
Неизвестный автор

### 1. Введение. Что мы собираемся обсуждать и почему это своевременно?

**1.1. Динамические модели интеллектуальных функций**  
Традиции моделирования процесса мышления на базе теории динамических систем берут своё начало с рождения кибернетики в конце 1940-х годов [1]. Однако в то время преобладало влияние символьического описания искусственного интеллекта и применение чисто информационного подхода к психологическим задачам. Кроме того, ещё в 1960-х–1970-х годах отсутствовали экспериментальные технологии исследования мозга с достаточно высоким пространственным и времененным разрешением. Поэтому попытки динамического описания "живого интеллекта" в то время особого успеха не имели. В конце XX века динамические идеи применительно к мозгу вновь стали популярны. К примеру, авторы [2] описали развитие определённого поведения новорождённого, такого как "лягание" и "потягивание" с помощью динамических понятий устойчивости, аттракторов в фазовом пространстве и их бифуркаций. Переход к новой стадии развития объясняется рождением новых аттракторов при изменении параметров ребёнка (вес, рост) со временем. Авторы этой работы считают, что высшие когнитивные функции имеют прямое отношение к этим видам "умений", которыми ребёнок овладел в младенчестве, и потому сами эти функции имеют динамическую природу и должны соответствующим образом

М.И. Рабинович, М.К. Миозинолу.

9500 Gilman Dr., University of California,

San Diego, La Jolla, CA 92093-0402, USA

Tel. +1 858 534 67 53. Fax +1 858 534 76 64

E-mail: mrabinovich@ucsd.edu, mrabinovich@gmail.com

Статья поступила 26 июня 2009 г., после доработки 4 августа 2009 г.

описываться. Они противопоставляют свой подход "информационной теории развития", в которой новые этапы развития связываются с "взрослением мозга" и появлением у него логических способностей.

В работе [3] сформулирована "идея непрерывности": когнитивная деятельность мозга должна характеризоваться непрерывно трансформирующейся во времени связью между мозгом, телом человека и окружающей средой, что противопоставляется дискретным по времени "шагам" искусственного интеллекта и статической (не функциональной) организацией его информационной структуры. Динамический подход предполагает, что сама организация когнитивных паттернов мозга также динамическая и функциональная в дополнении к анатомической. Таким образом, динамическое описание когнитивной активности противопоставляется "закону качественных структур", который отстаивают ортодоксы классической науки о мышлении, опирающейся на заданные алгоритмы дискретных вычислений [4].

Динамика информационных потоков в мозгу зависит от многих факторов, но в первую очередь, от архитектуры нейронных цепей и характера нейронных связей между различными мозговыми центрами. Так, тормозящие связи, поддерживаемые интернейронами, ответственны за нестационарную пространственно-временную активность, в то время как возбуждающие связи направляют информационные потоки в нужное время и в нужное место [5]. Можно предположить, что крупномасштабные когнитивные паттерны (моды или представления, наблюдаемые в экспериментах) в рабочем режиме мозга должны подавлять друг друга [6], что, естественно, должно происходить последовательно во времени. Таким образом, работающий мозг демонстрирует когнитивную и эмоциональную активность в виде цепочки сменяющих друг друга во времени комбинаций функциональных мод, а сами эти комбинации определяются родом ментальной активности.

Динамическое моделирование эмоций, мыслительной деятельности и их взаимодействия требует выбора множества независимых переменных — функций времени, которые в соответствии с динамическими принципами связаны дифференциальными уравнениями. Эти переменные образуют пространство состояний (фазовое пространство) искомой модели. Подобный подход опирается на успешный опыт динамического моделирования разнообразных явлений природы. Он включает в себя набор элементарных моделей, доказательств и развитой техники анализа для понимания поведения системы "в целом". Большую роль в таком описании играет геометрическое представление эволюции исследуемой системы в малоразмерных проекциях фазового пространства. Поведение системы при этом описывается в терминах атTRACTоров, переходных состояний, устойчивости, бифуркаций, хаоса и т.д.

Классический информационный подход к описанию функций мозга абстрактно также предполагает, что обработка информации происходит во времени, однако динамическое описание включает время непосредственно в пространство кодирования. В качестве примера можно привести информационные процессы в сенсорных системах [7] (детали см. ниже). При этом временные характеристики нейронных процессов (протяжённость во времени, синхронизация, изменение средней активности и т.д.) принципиально важны [8].

## 1.2. Томография мозга

Недавние работы по визуализации (томографии) работающего мозга позволили выявить многие важные характеристики его активности, в частности, обнаружить функциональные связи, которые выявляют мозговые центры "одновременно" (с точностью до усреднения) активизирующиеся при выполнении тех или иных эмоциональных или когнитивных функций. Такое представление создаёт иллюзию, что мы получаем чёткие отпечатки или автопортреты определённых эмоций или когнитивной активности. Однако ни эмоции, ни когнитивная активность не могут быть представлены "замороженными" паттернами, хотя бы и функционально зависимыми. Лежащая в их основе нейродинамика может быть понята лишь на основе представления последовательно развивающихся во времени процессов, т.е. анализа последовательной эволюции "мгновенных снимков" [9]. Сейчас существуют методы томографии мозга с различным времененным разрешением. Например, позитронно-эмиссионная томография (PET) даёт невысокое разрешение (порядка 10 с [10]). Высоким времененным разрешением характеризуется метод электроэнцефалографии (EEG)  $\sim 2$  мкс [11]. Этот метод, к сожалению, имеет недостаточное пространственное разрешение. Один из наиболее распространённых сейчас методов — зависящая от уровня кислорода в крови магнитно-резонансная томография (MRI) — даёт весьма хорошее пространственное разрешение (1 мм) и неплохое для целей динамического анализа временное разрешение порядка 2 с [12]. Таким образом, функциональная магнитно-резонансная томография — достаточно хороший экспериментальный инструмент для проверки и поддержки нелинейного динамического моделирования интеллектуальной деятельности мозга.

## 1.3. Динамика эмоций

В 1872 г. Ч. Дарвин опубликовал книгу *Выражение эмоций у человека и животных* [13], где высказал идею, что эволюционный принцип применим не только к биофизическому, но и психолого-поведенческому развитию живого, т.е. между поведением животного и человека имеется эволюционная связь. Он, в частности, показал, что в выражении разных эмоциональных состояний с помощью экспрессивно-телесных движений имеется много общего у антропоидов и слепорождённых детей. Представления Дарвина имели далеко идущие последствия. В частности, сегодня популярна точка зрения, что эмоции — это архаическая форма сознания.

Принципиально, и физиологам это хорошо известно, что эмоции, как и сознание, — многоэтапный динамический процесс восприятия, переработки и создания новой информации. Каждому метастабильному состоянию такого процесса отвечают свои формы представления и причинно-следственных связей между внутренними и внешними информационными потоками [14].

У животных динамика эмоциональных процессов взаимосвязана с когнитивной активностью. Особенно ярко это проявляется у человека. Обычно положительное эмоциональное переживание возникает, когда реальные результаты нашей деятельности соответствуют ожидаемым. В обратном случае возникают отрицательные эмоции — когнитивный диссонанс. Всем нам знакомы пути выхода из такого дискомфорtnого состояния: либо уговорить себя, что наши планы как раз и соответ-

ствовали полученному результату, либо добиться все-таки результата, который им действительно отвечает. Существует даже "информационная теория эмоций" [15], согласно которой интенсивность и знак наших эмоций определяются силой желания и оценкой возможности его удовлетворения в сложившейся ситуации (см. также [16–18]).

Поиски динамических механизмов эмоционального поведения ведутся многие десятилетия. Например, в 1935 г. уже высказывались мнения, что эмоции — это последовательность переходных состояний [19]. В этой работе подчёркивается, что только баланс между принятием, исключением и удержанием нужного и формирует динамическую основу биологического процесса, называемого "жизнь". В недавней работе [20] развивается теория, в рамках которой и положительные, и отрицательные эмоции рассматриваются и измеряются как сосуществующие и конкурирующие динамические процессы.

Заметим, что если анализ поведенческих функций доминировал в физиологии и психиатрии в первой половине XX века, исследование когнитивных функций мозга стало преобладающим во второй его половине, что часто называют "когнитивной революцией". Развитие интересов в этом направлении обещает превращение науки о динамике мозга в интегральный и результативный подход не только для понимания мыслительных процессов [21], но и для их количественного описания. "Когнитивная революция" также поддерживает идеи о динамической природе эмоций.

Завершая введение, необходимо добавить, что помимо появления новой экспериментальной техники и, соответственно, более глубокого понимания "материальной базы" эмоций и когнитивных процессов, изменилась существенно и сама нелинейная динамика. Центр её интересов в значительной степени сместился в область исследования сложных систем (см., например, [22]). Здесь выделяются три подхода, которые, по существу, связаны друг с другом: а) структурный, предполагающий, что наиболее типичны лишь системы с определённым типом архитектуры связей (например, типа "малый мир" [23]); б) информационный, описывающий динамику "главных" информационных потоков в системе (см. также [24, 25]), и в) функциональных мод [26, 27]. В данной статье мы опираемся в основном на последний.

## 2. Моды мозга

### 2.1. Пространство состояний

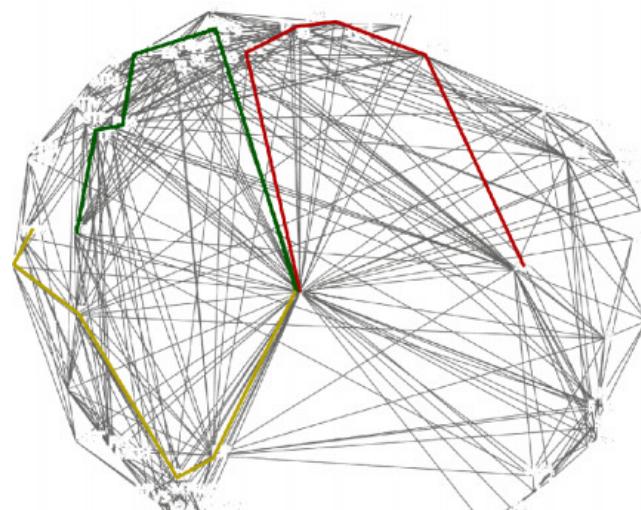
Два основных феномена деятельности человеческого мозга — эмоции и мышление — привлекают исключительное внимание исследователей не только индивидуально, но и в процессе их взаимовлияния. Имея в виду, что всякий анализ должен основываться на получении численных данных об исследуемом явлении, много усилий было потрачено на количественные оценки эмоций и когнитивной активности. Будучи напрямую вовлечёнными в анализ информации об окружающем мире, когнитивные функции мозга привлекли относительно больше внимания и усилий [28, 29], хотя попытки непосредственной числовой оценки эмоций также предпринимались [30]. Зачастую эмоции оцениваются по их когнитивной компоненте, например, по оценке эмоци-

онального стимула [31, 32] и принятии решения о правильном поведении в его присутствии, или активности эмоциональной памяти [33, 34].

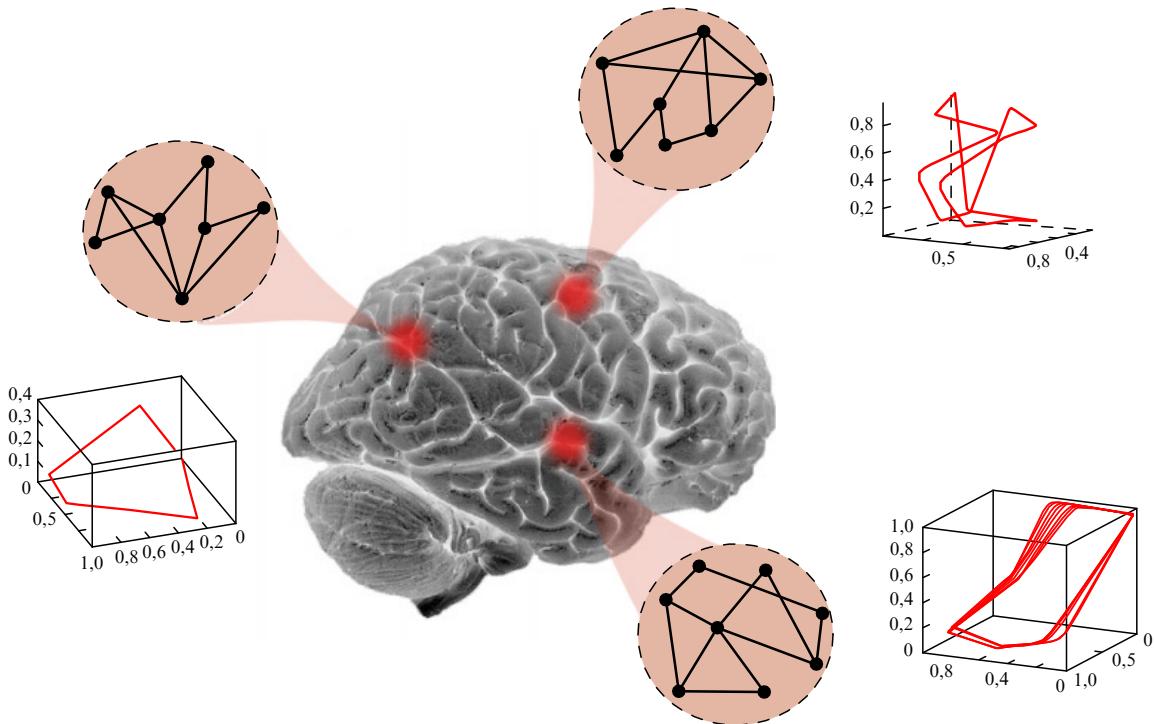
Какое пространство состояний лучше всего подходит для анализа эволюции коллективных мод, представляющих эмоции и когнитивную деятельность столь сложной системы, как мозг? Однозначного ответа нет, но можно воспользоваться опытом исследования не столь сложных природных систем, например, турбулентных гидродинамических течений [35]. Этот опыт подсказывает, что необходимо иметь уравнения лишь для достаточно крупных объектов (в данном случае жидких частиц), т.е. микродетали, описывающие кинетику и динамику молекул жидкости, не сказываются напрямую на макроскопическом описании. Однако такие детали влияют на параметры макроскопической модели. Хотя мозг — несравненно более сложная система, приведённая аналогия может подсказать направление движения. Фактически нечто похожее делается при описании активности коры головного мозга с помощью крупномасштабных сетей, где каждый узел — это нейронный кластер из множества нейронов. Такое описание называют "моделью нейронных масс" (neural masses modeling) [36, 37]. В дальнейшем мы также воспользуемся крупномасштабным структурным описанием, но в несколько иной форме (см. раздел 4).

### 2.2. Функциональные нейронные сети

Как отмечалось, перспективы применения динамического подхода для моделирования эмоций и интеллектуальной деятельности мозга опираются на предположение, что мозг представляет собой сложно организованную сеть нейронных центров, каждый из которых, в свою очередь, также сложно организованная структура. Эти мозговые центры работают скоординированно в некотором интервале времени, распадаясь затем и формируя новые образования за счёт появляющихся и исчезающих функциональных связей (рис. 1). Понимание динамики таких структур и построение на этой основе динамических моделей эмоций и когнитивных функций может



**Рис. 1.** Схематическое представление трёх разных функциональных мод в сложной нейронной сети (в электронной версии показаны разным цветом). Узлы на рисунке — это различные центры мозга, связи между которыми могут активироваться или подавляться, в зависимости от информационных входов (модифицировано из [40]).



**Рис. 2.** Каждый отдел (подотдел) мозга, или центр — это сложная нейронная сеть с широким спектром возможного поведения, представляемого в её индивидуальном фазовом пространстве. Дальние возбуждающие и подавляющие связи между центрами объединяют разные центры и формируют коллективные моды, динамика которых представляется в объединённом фазовом пространстве.

дать нам в руки новые методы диагностики и лечения заболеваний мозга. Современные методы томографии мозга, в особенности метод функционального магнитного резонанса, позволяют обнаружить некоторые важные особенности функциональной организации систем мозга, относящихся к эмоциям и мышлению [38, 39], которые чрезвычайно важны для продвижения в этом направлении.

Каждая подсистема мозга, например, *амигдала* (миндалевидное тело — *corpus amygdaloideum*), участвующая в формировании "эмоциональных мод", сама представляет собой сложную динамическую систему со своими временными масштабами (рис. 2). Такие системы подвержены воздействию огромного числа нейронных возбуждений со стороны самых разных областей мозга. Поэтому пространственно-временные паттерны активности мозга, представляющие изменение эмоционального состояния, чрезвычайно чувствительны по отношению к внешним и внутренним стимулам. Так, амигдала получает сигналы и со стороны коры головного мозга и со стороны подкорковых структур. Они включают в себя уже обработанную информацию от визуального, слухового, вкусового, обонятельного и осязательного отделов коры, т.е. амигдала напрямую получает информацию обо всех пяти наших чувствах. Амигдала получает также сигналы и от ассоциативной коры, от таламуса (передающего ещё не обработанную сенсорную информацию), гиппокампа (обработанная информация о взаимоотношениях объекта с окружающей средой), а также от всех структур, которые информируют о состоянии и физиологических потребностях организма.

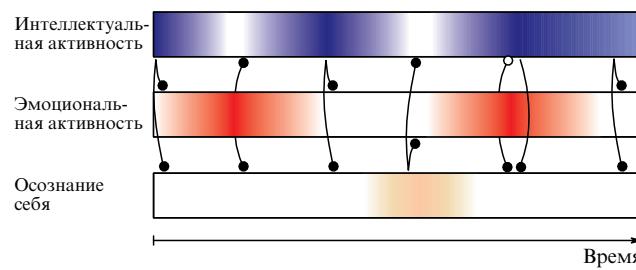
Ещё раз подчеркнём, что эмоции и мышление — это *активные процессы*, появляющиеся в результате изменений в организации и силе связей между различными центрами мозга непрерывно во времени, т.е. динами-

ческий отклик мозга на информацию об окружающем и внутреннем мире. Сами связи — не обязательно анатомические, но и функциональные. На разных стадиях эмоционального или мыслительного процессов формируемые комплексные структуры генерируют различные временные последовательности, каковые и представляют (исполняют) высшие функции мозга.

Динамические переменные, описывающие временную динамику эмоций и когнитивных функций и их взаимодействие образуют совместное "рабочее пространство" (или фазовое пространство на языке динамических систем). Чтобы удачно выбрать такие переменные, полезно использовать доступную информацию об организации коллективных возбуждений, т.е. мод мозга, представляющих эмоции и когнитивные функции. К примеру, эмоции, как уже отмечалось, есть результат координированной динамической активности многих областей мозга, в первую очередь, — это префронтовая кора и амигдала. Эти центры играют ключевые роли в формировании и развитии эмоций во времени и их взаимодействии с мышлением. Они участвуют в параллельном и последовательном процессах оценки сенсорной информации и вырабатывают оптимальное ответное поведение (рис. 3).

### 2.3. Эмоционально-когнитивный tandem

Большинство существующих теорий взаимодействия интеллекта и эмоций характеризуются той или иной специфической направленностью на определенное заболевание или находятся в плоскости определенных знаний — нейроанатомических, фармакологических и др. Проиллюстрируем это на примере такого заболевания, как переход в паническое состояние (потеря присутствия духа). Нейроанатомическая теория "паники", предложенная в работе [41], описывает соответствующие функци-



**Рис. 3.** Символическое представление эмоционально-когнитивного тандема, включающего "осознание себя". Все три показанных вида ментальной активности, развиваясь во времени, непрерывно обмениваются информацией.

циональные отношения между различными анатомическими центрами мозга. Однако теория панического состояния не может рассматриваться в отрыве от анализа когнитивного состояния тревоги и должна также включать процессы оценки стресса, понимания механизмов возникновения неординарных условий и, наконец, взятия под контроль кризисной ситуации. Таким образом, теория должна включать и работу центров мозга, ответственных за интеллектуальные функции. Добавим, что под действием стресса человек часто теряет возможность правильно оценивать ситуацию, поскольку с интеллектом конкурируют, т.е. его подавляют, отрицательные эмоции. Они используют информационные ресурсы мозга и уменьшают возможности сознательно управлять собой. Это и есть главная тема эмоционально-когнитивного взаимодействия.

Возвращаясь к проблеме конкуренции, подчеркнём, что конкуренция за конечные ресурсы — одна из главных действующих сил, управляющих процессами мозга. Эти ресурсы — энергия (кислород и глюкоза) и информация (внимание и память). Важно, что информационные ресурсы — продукт деятельности самого мозга, т.е. они могут по-разному влиять на эмоции и когнитивные функции (например, за счёт управления вниманием) и должны быть включены в общую динамическую модель, определяющую "рабочее пространство".

Оценка эмоций и их непрерывное во времени динамическое взаимодействие с когнитивными функциями представляются исключительно важными для правильной диагностики заболеваний и их "динамического" лечения. Временной компоненте этого взаимодействия уделялось, к сожалению, недостаточно внимания [42–44]. В этом ключе весьма интересна работа [45], где подчёркивается: а) взаимное влияние интеллектуальной оценки на эмоции и эмоций на оценку; б) подкорковый уровень процесса оценки и в) крупномасштабные функциональные связи за счёт осцилляторных нейрофизиологических механизмов. В своей основе тесная связь эмоций с когнитивными функциями имеет динамическую и анатомическую координацию многих центров мозга, которые одновременно участвуют и в том, и в другом виде деятельности мозга [34, 45, 46]. Благодаря такому перекрытию эмоции и когнитивную активность часто даже трудно разделить [47, 48].

Как уже говорилось, моды, представляющие в рабочем пространстве эмоции и когнитивные функции, взаимно обмениваются информацией и конкурируют в борьбе за энергетические и информационные ресурсы [47, 49–51]. На нейробиологическом уровне когнитивный

контроль над эмоциями может выражаться в прямом торможении центрами, ответственными за выработку правильного поведения тех мод, которые ответственные за проявление отрицательных эмоций [51].

Таким образом уже много известно о взаимодействии эмоций и когнитивных функций мозга. Однако, насколько мы знаем, ещё отсутствуют динамические модели, которые на основании базовых принципов могли бы описывать и предсказывать временное поведение этих процессов и их трансформации при изменении контрольных параметров (физиологических характеристик организма, лекарств и т.д.).

#### 2.4. Динамические модели сознания

Сознание — главная особенность интеллектуальной активности человека. Исследование этой, одной из наиболее мистических тайн природы, требует объединения усилий физиологов, психиатров и специалистов по моделированию сложных самообучающихся систем. В последние годы здесь наметился некоторый прогресс, вызванный появлением новых экспериментальных и теоретических технологий.

Любой вид интеллектуальной деятельности может быть осознанным. Например, осознанное поведение в обществе — это процесс, в котором внешние и внутренние стимулы воспринимаются, распознаются и могут быть использованы для вполне определенной цели. Эксперименты с простыми сенсорными стимулами позволяют утверждать, что в процесс осознанного поведения включены даже первичные сенсорные области мозга [52]. Установление осознанного поведения предполагает обратную связь во времени с процессами первичного восприятия [53].

Ещё в конце XIX века выдающийся психиатр Вильям Джэймс высказал идею, что сознание — это непрерывный во времени переходный процесс [54]. Спустя полвека психиатр Гурвич ввел понятия "ментальные состояния" и "временное упорядочение" [55]. В нашем контексте — это соответственно когнитивные метастабильные состояния и последовательность таких метастабильных состояний.

Поскольку обсуждение проблемы моделирования сознания на страницах физического журнала представляется в некоторой степени провокационным, остановимся на этой теме подробнее.

В чём принципиальное различие осознанных и неосознанных когнитивных функций? В возможности человеческого мозга предсказывать будущее, основываясь на опыте прошлого, и использовать такое предсказание для планирования будущего. Динамическая модель сознания в любом его проявлении должна содержать две подсистемы: одна представляет когнитивный процесс в настоящем (это может быть базовая модель (6)–(9), которую мы предлагаем ниже), вторая же подсистема конструирует возможные варианты будущего на основании анализа временных наблюдаемых в прошлом и использует нынешнее метастабильное когнитивное состояние в качестве начальных условий для предвычисления будущего. В противоположность первой подсистеме, вторая живёт в вымыщенном мире, где время многократно спрессовано. Быстрое предсказание вместе с выбором наиболее приемлемого и вероятного будущего используется для коррекции поведения в настоящем. Поскольку сознание в состоянии удерживать лишь

конечное число информационных единиц одновременно, предсказание будущего оказывается лишь фрагментарным. Возможно поэтому мы часто строим планы, которые не сбываются.

С точки зрения нейрофизиологии сознание — это нестационарная активность мозга, характеризуемая малоамплитудными нерегулярными пульсациями с характерной частотой 20–70 Гц. Это контрастирует с безсознательными состояниями (глубокий сон, кома, общая анестезия, эпилептическое состояние), для которых характерны более или менее упорядоченные высокочастотные пульсации на частотах ниже 4 Гц [56]. Как показывает магнитно-резонансная томография, в процессе сознания задействовано очень большое число центров в различных частях мозга. Принципиально, что время — главный атрибут сознания. Это наглядно иллюстрируется недавними экспериментами [57], которые показывают, что осознанный человеческий опыт включает в себя и опыт путешествия во времени, как в прошлое, так и в будущее ("mental time travel").

Для построения динамической модели сознания необходимо формализовать основные его свойства (см. также [58]). Они таковы:

I. Сознание — это имитатор (или генератор игры), который позволяет мозгу использовать в процессе обработки приходящей информации опыт, которого никогда не было. В процессе использования такого "опыта" мозг может включать или отбрасывать различные эмоции и восприятия (к примеру, боль). Рождающийся в результате игры новый опыт может в дальнейшем послужить причиной галлюцинаций и мнимой памяти.

II. При сновидениях, воспоминаниях и в процессе воображения имитация определённых событий возбуждает те же группы кортикальных нейронов, которые активируются и тогда, когда такие события происходят в реальности.

III. Имитация позволяет воспроизводить сложную ситуацию многократно, добиваясь детального её понимания (наглядный пример — игра в шахматы).

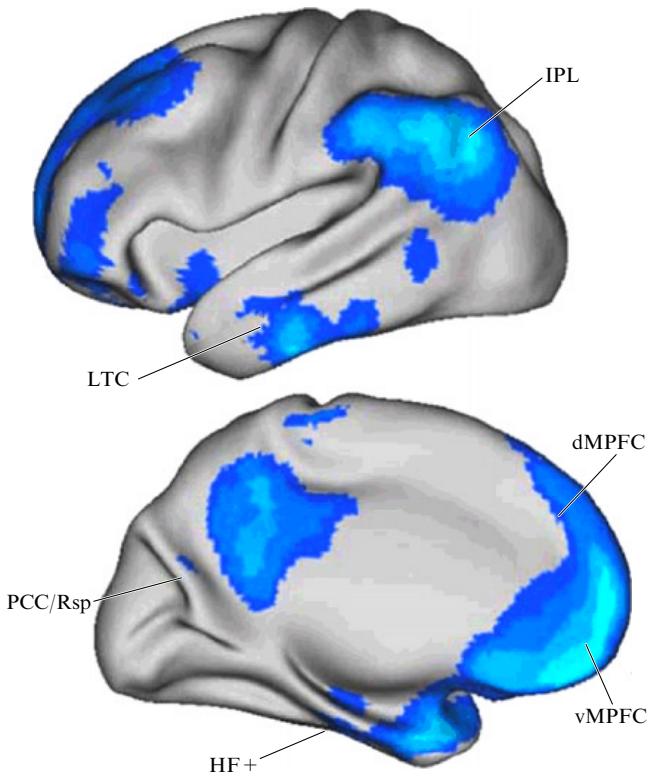
IV. Сознание — динамический процесс: постоянно эволюционирующая последовательность событий имитирует причинно-следственную связь, наблюданную в реальном мире.

Качество имитации зависит от устойчивости по отношению к разнообразным возмущениям, воспроизводимости процесса, необходимой для многократного анализа, и длительности метастабильных состояний — слишком краткая их протяжённость не даёт возможности записать их в память.

Один из наиболее популярных подходов к моделированию сознания базируется на идеи глобального рабочего пространства [6, 59]. Суть её такова. Информационный стимул (внутренний или внешний) активизирует возбуждающие нейроны с протяжёнными аксонами, что, в свою очередь, порождает глобальные паттерны в нейронном рабочем пространстве. Согласно "теории глобального рабочего пространства", временные связи между различными "процессорами" мозга образуют динамическую сеть, которая и должна генерировать новую, зависящую от входных сигналов, информацию [60]. Как это происходит, данная теория не отвечает. Мы считаем, что ответ на этот вопрос можно получить, дополнив теорию глобального рабочего пространства теорией структурно-устойчивых переходных состояний

[27, 61, 62], базирующуюся на принципе "конкуренции без победителя" [63] (см. ниже). Проблема, которая при таком подходе требует наиболее внимательного отношения — это выбор удобных для измерений и достаточных для динамического описания переменных. Мы предлагаем использовать в качестве таких переменных интенсивность возбуждения когнитивных мод, которые подробно обсуждаются ниже. Нелинейные дифференциальные уравнения, связывающие эти переменные, и составляют искомую модель.

Упомянем здесь ещё одну проблему, напрямую связанную с сознанием, — это "ощущение себя". Хотя проблема "ощущения себя" определялась как фундаментальная ещё во времена зарождения психиатрии [54], в современной науке эта проблема активно разрабатывается сравнительно недавно. Выяснилось, в частности, что процесс осознания себя представляет некую особую проблему для человеческого мозга, т.е. стоит особняком от других [64–67]. Появились экспериментальные результаты, показывающие, что проблема "себя" обслуживается теми когнитивными модами мозга, которые не задействованы в других когнитивных процессах. Они работают с ними в противофазе во времени. Такие моды генерируются молчащими нейронными сетями (default networks) и мы, для краткости, будем называть их "молчащими". Они в значительной степени перекрываются с так называемыми "модами покоя" (rest state). Моды покоя соответствуют активному состоянию мозга, когда пути общения с внешним миром перекрыты [68–70] (рис. 4). В то же время из собственного опыта мы



**Рис. 4.** "Молчащая" сеть головного мозга (default network) включает в себя шесть областей коры: Ventral medial prefrontal cortex (vMPFC), posterior cingulate/retrosplenial cortex (PCC/Rsp), inferior parietal lobule (IPL), lateral temporal cortex (LTC), dorsal medial prefrontal cortex (dMPFC), hippocampal formation (HF+). На рисунке показано примерное расположение этих областей коры (модифицировано из [71]).

можем добавить, что проблема "себя" осмысливается непрерывно, зачастую параллельно с другой когнитивной деятельностью мозга.

Сейчас, в связи с заметными успехами в создании квантовых вычислительных устройств, наблюдается всплеск интереса к уже давно обсуждаемой и очень противоречивой проблеме связи сознания и квантовой физики [72–76]. Здесь не место для подробного обсуждения этой проблемы. Заметим только, что большинство работ на данную тему опирается на идею Эверетта "многомировой интерпретации" квантовых измерений, высказанную полвека назад (см. подробнее в [77]). При этом автоматически предполагается, что сознание лишь "выбирает" (select) определённое решение в рамках возможной многовариантности информационного мира. В действительности же, как мы говорили, одна из важнейших функций сознания — генерация новой информации, что входит в противоречие с чисто "селекционным" подходом.

### 3. Конкуренция — надёжность и чувствительность

#### 3.1. Устойчивые переходные движения вместо атTRACTоров

Традиционные приёмы моделирования динамических явлений природы опираются на кажущееся вполне естественным предположение, что все интересные динамические системы со временем стремятся перейти в такие состояния, которые описываются атTRACTорами. АтTRACTоры — устойчивые состояния равновесия (покой), предельные циклы (устойчивые периодические пульсации) или странные атTRACTоры (установившийся динамический хаос) — в фазовом пространстве модели описывают поведение диссипативных открытых систем, когда плотности всех потоков, пронизывающих систему, т.е. энергии, материи и информации, сбалансированы и стационарны. И это, действительно, так для сложной системы, состоящей из многих взаимодействующих агентов (нейронов, центров мозга, или различных экологических популяций), но только при условии, что

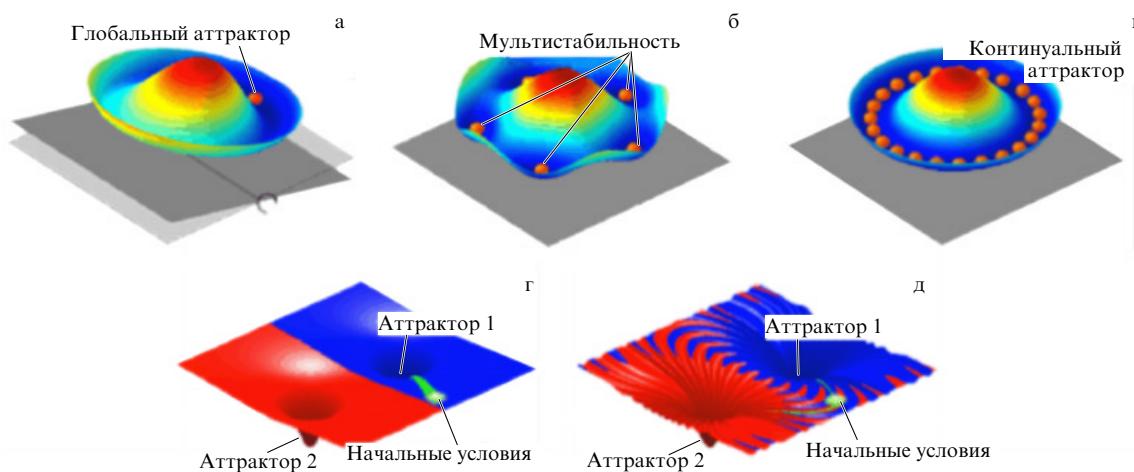
связи между агентами близки к симметричным [78, 79] (рис. 5). Фазовое пространство при этом разбивается на области притяжения разных атTRACTоров.

В случае полной симметрии уравнения динамической модели можно записать в дивергентной форме (ввести функционал Ляпунова) и полностью исследовать динамику системы при произвольном числе агентов, т.е. при произвольно большом числе степеней свободы. Можно упомянуть несколько нейropsychологических феноменов, один из них — ассоциативная память [80], моделирование которых с помощью таких мультистабильных систем естественно. В случае памяти — это просто установление соответствия между начальными условиями, т.е. образа, который нужно запомнить, и одним из атTRACTоров. Такое отображение даже не включает в себя время — непременный атрибут всяких эмоций и когнитивных функций.

Предположение о симметрии связей не только не реалистично, но и закрывает пути к моделированию сложных переходных состояний, каковыми и являются состояния активного мозга. Для описания таких динамических состояний мы нуждаемся в новых идеях.

Как уже упоминалось во введении, одна из функций высшей нервной системы — это внутреннее распределение энергетических и информационных ресурсов между эмоциями, мышлением и управлением поведением. В разные моменты времени разные центры мозга и даже разные моды (их функциональные, т.е. временные объединения) оказываются активными. Пространственно-временная конкуренция различных мод мозга (эмоциональных и когнитивных) — это динамический механизм, который обеспечивает такое нестационарное поведение. Конкурентное динамическое взаимодействие мод может обеспечить и устойчивость переходных состояний мозга, которые отвечают за продуктивную мыслительную деятельность и представляют континuum различных эмоциональных состояний.

Таким образом, новая парадигма заключается в утверждении: *эмоции и когнитивные функции — это переходные динамические процессы, связанные с функционально определяемым взаимодействием различных подсистем мозга, их конкуренцией и синхронизацией (коорди-*



**Рис. 5.** Простые атTRACTоры в диссипативной системе — ландшафтная метафора: (а) один минимум (глобальный атTRACTор), (б) несколько минимумов (мультистабильность), (в) континуальный атTRACTор (структурно неустойчив), (г) гладкая граница областей притяжения атTRACTоров, (д) изрезанная граница областей притяжения (типична для многомерных систем с мультистабильностью). (Рисунок подготовил Томас Новотны.)

научией) во времени. О процессах синхронизации в нейронных системах см. [5, 81, 82].

### 3.2. Когнитивные переменные

Естественно предположить, что каждая специфическая когнитивная активность может быть описана переходной динамикой конечного числа взаимодействующих мод. Таким образом, например, мы можем описать последовательность "мгновенных" снимков магнитно-резонансной томографии (видео) в процессе решения пациентом задачи принятия решений. Как показывают эксперименты, в решении такой проблемы принимают участие непрерывно трансформирующиеся во времени объединения когерентно работающих центров мозга. Соответствующее видео можно рассматривать как конкуренцию во времени даже небольшого числа мод. Есть несколько путей выделить эти моды из экспериментальных данных, в частности, это могут быть главные пространственные моды томографических снимков, описывающих активность мозга в разные моменты времени [83, 84]. Видеоряд активности мозга представляет собой комбинацию динамических переменных в виде:  $\sum_{i=1}^N A_i(t)U_i$ , где  $U_i$  — фиксированная пространственная форма  $i$ -й когнитивной моды, и  $A_i(t)$  — уровень её активности, т.е. средняя интенсивность всех вокселей\*, покрывающих пространственный паттерн  $U_i$  [85]. Число  $N$  таких мод зависит от уровня деталей, которые мы хотим описать и пространственно-временного разрешения томографических данных.

Возбуждение рассматриваемых мод может быть связано с процессами оценки стресса, выработкой оптимального поведения, осознанием себя и т.д. Несмотря на "крупнозернистое" описание "когнитивной вселенной", такие собственные функции могут быть экспериментально сопоставлены с соответствующими им сетями нейронных центров. Напомним, что изменяющиеся во времени переменные  $A_i$  характеризующие активность мод, всегда положительно знакоопределены.

В экологической модели активности мозга, которую мы предлагаем ниже, ресурсы, в которых нуждается когнитивная деятельность мозга, описываются реальной переменной ( $R_A$ ), которая определяет отношение потребляемых когнитивной компонентой ресурсов к их общему объёму.

### 3.3. Переменные, описывающие эмоции

Сейчас хорошо идентифицирована сеть мозговых центров, ответственных за представление и управление эмоциями, такими, как грусть или печаль [86]. Пользуясь теми же аргументами, как и при выборе когнитивных мод, будем представлять эволюцию "эмоций" в виде  $\sum_i^M B_i(t)V_i$ , где  $V_i$  характеризует пространственную структуру  $i$ -й моды, а  $B_i(t)$  — её активность во времени.

Упомянем ещё одно экспериментальное наблюдение, которое важно для моделирования — разные эмоциональные моды перекрываются во времени на сравнительно краткие промежутки, соответствующие переход-

дам от одной моды к другой. Это наблюдение соответствует экологическому принципу конкуренции и используется нами при построении модели. По аналогии с  $R_A$  мы также должны ввести переменную  $R_B$ , характеризующую часть информационных ресурсов мозга, приходящуюся на долю эмоциональной активности.

Способы, которые мозг использует для кодирования и распознавания получаемой извне информации — это ключ к пониманию динамики эмоций, исполнения когнитивных функций и организации поведения во времени [87, 88]. Для человека со здоровой психикой эти процессы последовательно организованы, устойчивы и информационно воспроизводимы. Представление о том, что мы можем думать о нескольких вещах сразу, иллюзорно — просто процесс переключения внимания с одного предмета на другой и обратно оказывается достаточно быстрым.

### 3.4. Метастабильность и динамические принципы

Сейчас, когда читатель уже ознакомился с некоторыми особенностями эмоций и когнитивных функций мозга, нам представляется уместным сформулировать динамические принципы, которые могут быть положены в основу моделирования интеллектуально-эмоциональной деятельности. Эти принципы таковы:

I. Существование метастабильных состояний в объединённом интеллектуально-эмоциональном рабочем пространстве.

II. Структурная устойчивость переходных режимов, представляющих собой последовательность переключений из одного метастабильного состояния в другое.

III. Экологический принцип конкуренции, обеспечивающий такие переключения.

Обсудим далее эти принципы, начав с мультистабильности.

Метастабильность — "деликатное" равновесие — известный феномен нелинейной динамики. В головном мозге метастабильность обнаруживается прямыми нейрофизиологическими экспериментами (многоэлектродная запись внеклеточной нейронной активности) [89]. Такие квазиравновесия, наблюдаемые в коре головного мозга, обнаруживаются и в поведении [90]. Метастабильность выражает способность мозга выделять значимое из кажущейся случайной сенсорной информации [91, 92]. Метастабильность также поддерживает гибкость функционального взаимодействия между различными нейронными группами и центрами мозга [83, 85, 93–95]. Временной порядок смены метастабильных состояний выражает причинно-следственные связи и зависит от функционально изменяющейся структуры нейронных сетей [96].

Геометрический образ метастабильного состояния в фазовом пространстве модели — седло, а переходу из одного метастабильного состояния в другое соответствует неустойчивая сепаратриса седла (рис. 6а).

### 3.5. Конкуренция без победителя — структурная устойчивость переходных режимов

Соревнования, в которых отсутствует победитель, или точнее, в которых многие участники оказываются победителями, но по очереди и на ограниченное время, довольно известное явление, наблюдающееся при взаимодействии более чем двух агентов, взаимоотношения между которыми несимметричны, как, например, в

\* Воксель (от англ. *voxel* — образовано из слов: объёмный (англ. *volumetric*) и пиксель (англ. *pixel*)) — это элемент объёмного изображения, содержащий значение элемента на регулярной сети в трёхмерном пространстве, аналогично пиксели на двумерном пространстве. Воксели часто используются для визуализации и анализа медицинской и научной информации.

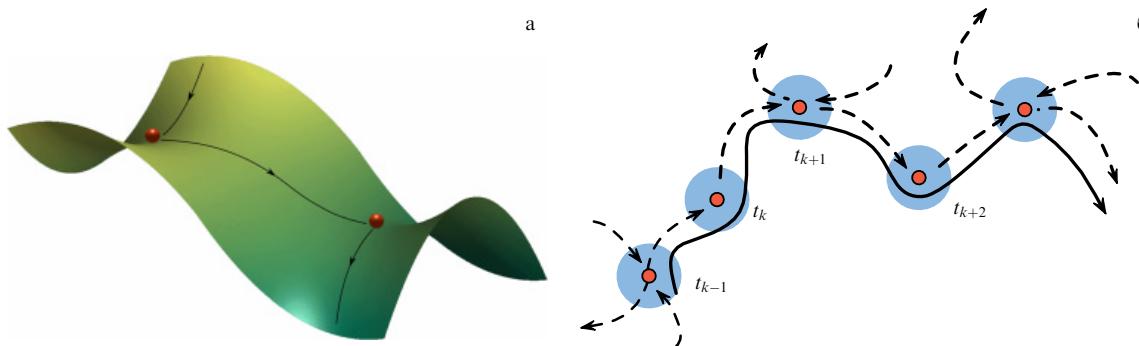


Рис. 6. (а) Гетероклиническая структура из двух седел, (б) структурно-устойчивый гетероклинический канал.

известной игре "камень–ножницы–бумага", или при знаменитом "парадоксе голосования" [97, 98]. Участники при таком процессе могут периодически становиться "победителями" или, в особенности, когда их число больше трёх, процесс может быть не повторяющимся, а закончиться победой одного из них в результате устойчивой последовательности переходов. Математическим объектом, отвечающим нециклическим переходным последовательностям, является гетероклиническая цепочка (рис. 6б), а ритмическим переключениям отвечает гетероклинический цикл. Впервые гетероклинический цикл обсуждался в работе [99], где моделировалась термоконвенция в горизонтальном слое жидкости, вращающемся вокруг вертикальной оси. Разные конвективные паттерны (с ориентацией роликов  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  и  $240^\circ$ ) периодически сменяли друг друга (см. также [100]).

Как вид движения, который редко реализуется в простых диссипативных системах и достаточно типичен для сложных систем, воспроизводимые цепочки переходов от одного седла к другому позволяют дать понятное и конструктивное описание разнообразных явлений природы [101]. Достаточно общие динамические модели, принятые в нейрофизиологии (модель Вильсона–Кована) [102], и в экологии (модель Лотки–Вольтерра) [103–106] демонстрируют такие устойчивые переходные движения в широкой области пространства параметров [101, 107, 108].

Поскольку время, проводимое системой в окрестности седлового равновесия обратно пропорционально логарифму уровня шума [109, 110], характерное время рассматриваемого переходного процесса может меняться в широких пределах. В устойчивых гетероклинических последовательностях порядок сменяющихся "победителей" фиксирован, шум же может лишь ускорить процесс. Таким образом, некоторый уровень шума нейронной системе необходим, чтобы она не "засыпалась", но он не должен быть слишком большим, иначе переходный процесс становится невоспроизводимым.

Наличие в фазовом пространстве диссипативной системы устойчивой гетероклинической цепочки (рис. 6б) означает существование в её окрестности "гетероклинического канала", который не могут покинуть попавшие в него траектории. Само существование данных метастабильных состояний определяется входной информацией (возбуждением от других нейронных групп), порядок последовательных переключений в цепочке также зависит от величины и топологии связей между конкурирующими объектами, которые функционально зависимы

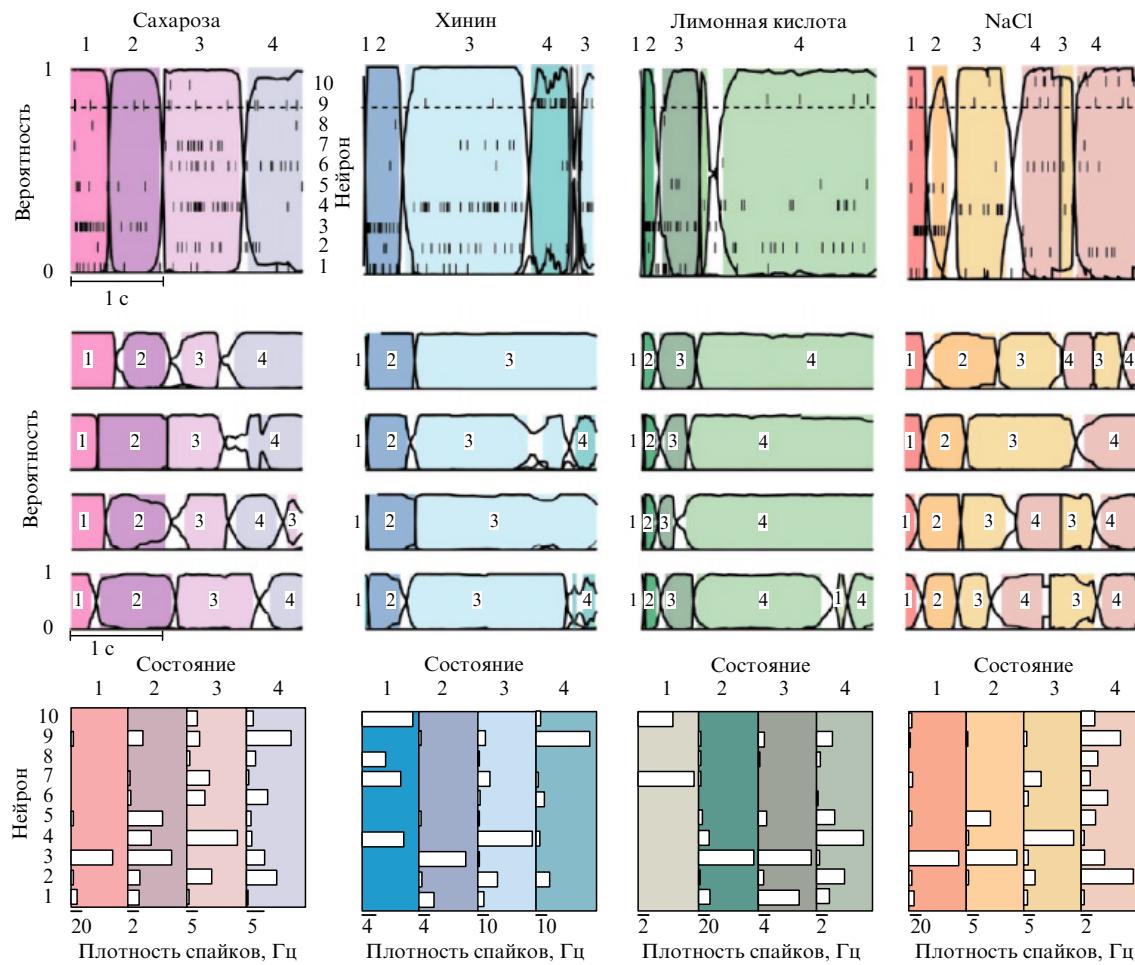
от входной информации. Благодаря этим обстоятельствам гетероклинический канал оказывается одновременно устойчивым по отношению к шумам и чувствительным по отношению к слабым информационным сигналам. На сегодняшний день гетероклинический канал — это единственная известная динамическая конструкция, с помощью которой разрешается фундаментальное противоречие между чувствительностью и надёжностью. Основной нейрофизиологический механизм, обеспечивающий в нейронных системах мозга существование гетероклинического канала — это взаимное торможение нейронных групп [111–114].

Имеющиеся сейчас экспериментальные данные [62, 89, 115] говорят о том, что метастабильность и устойчивые переходы — это ключевые динамические объекты, которые способны перевести моделирование нейронных процессов мозга на новый уровень понимания и предсказания.

Разрешение фундаментального противоречия между устойчивостью переходной динамики мозга и её чувствительностью к информационным сигналам за счёт информационного выбора метастабильных состояний (т.е. информационной реорганизации гетероклинического канала) — это конкретный пример взаимодействия динамических и информационных процессов в неравновесных диссипативных системах. Общим проблемам такого взаимодействия посвящена очень интересная книга Б.Б. Кадомцева [116], а также обзоры [117–119].

### 3.6. Примеры. Конкурентная динамика сенсорных систем

Качественный и количественный анализ входной информации сенсорными системами животных начинается с активирования стимулами специфических нейронов или групп нейронов. Паттерны активности, порождаемые внутренней динамикой соответствующих нейронных сетей, кодируют пришедшую информацию и ретранслируют её высшим отделам для дальнейшей обработки. Обычно такое кодирование непосредственно включает в себя время, т.е. информацию, даже при статических входных сигналах, представляется временными последовательностями пространственных паттернов возбуждения. Математическим образом такого нестационарного кодирования может служить гетероклинический канал, в основе которого лежит принцип "конкуренции без победителя". Зачастую в экспериментах с биологическими сенсорными системами сложный характер временных наблюдаемых (например, записей экстраклеточной электрической активности) выглядит как шум. Статисти-



**Рис. 7.** Активность 10 нейронов вкусовой коры головного мозга крысы: специфические пространственно-временные паттерны, генерируемые в ответ на присутствие разных стимулов — сахара, хинина, лимонной кислоты и поваренной соли. Наблюдаются переключения между четырьмя метастабильными состояниями (верхняя панель); последовательность переходов между различными метастабильными состояниями воспроизводится при повторении эксперимента, хотя временные характеристики варьируются (средняя панель); интенсивность активности каждого из десяти нейронов в ответ на разные стимулы (нижняя панель). (Масштабный отрезок и цифра под ним означают число спайков в секунду.) (Адаптировано из [115].)

ческая обработка, однако, показывает, что это фрагменты последовательных переключений метастабильных состояний. Такие переключения наблюдались недавно в экспериментах с обонятельной и вкусовой сенсорными системами [115, 120]. В частности, анализ отклика вкусового отдела коры головного мозга крысы *in vivo* показал, что специфические для каждого вкусового источника паттерны переключения появляются почти сразу после прихода стимула [115] (рис. 7).

Эксперименты с обонятельной системой саранчи [121] и "зебровой" рыбы (*demo-verteo*) [122] показали, что переходная динамика переключений оказывается специфичной не только для разных типов запахов, но и для различных их концентраций. В пространстве состояний нейронной системы разным концентрациям одного и того же запаха отвечают разные траектории на одном многообразии. Разным же запахам отвечают разные многообразия [121] (рис. 8).

Конкуренция без победителя типична также для экологических процессов. Именно этот принцип, возможно, является одним из механизмов исключительного биологического разнообразия (см. также [101]). Соответствующая аналогия оказывается полезной для понимания динамики мозга. Именно ограниченность ресурсов, в которых одновременно нуждаются различ-

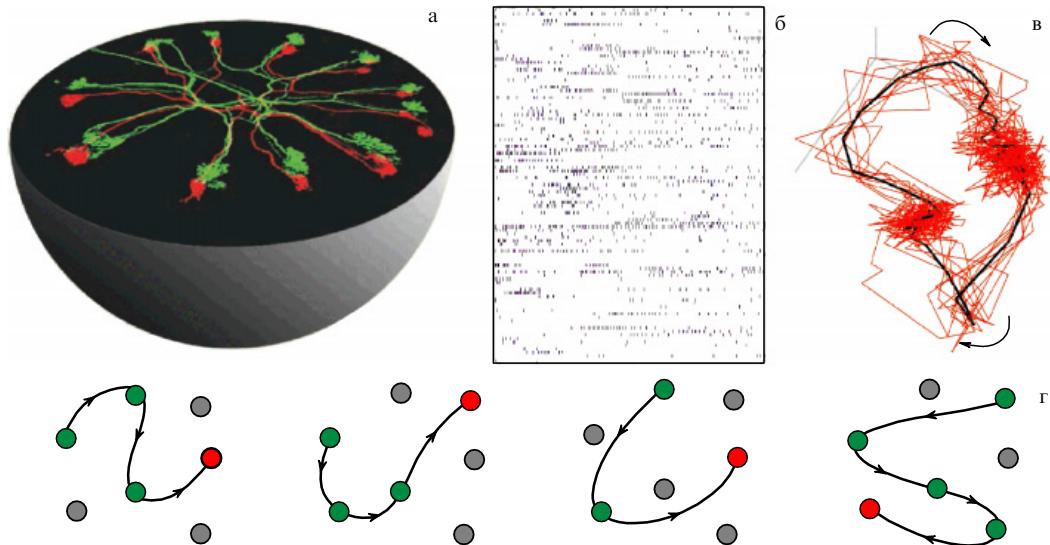
ные отделы мозга, во многих случаях и определяет особенности его кооперативной динамики. К примеру, конкурентная активность многих областей мозга характерна для процессов мышления [123, 124] и, в частности, для понимания смысла предложений при чтении [125]. Приведённые результаты экспериментов показывают, что конкуренция без победителя, действительно, один из основных динамических принципов, обеспечивающих функционирование сложных нейронных систем.

### 3.7. Устойчивость переходных процессов.

#### Формальное описание

Неразрушающийся под действием умеренного шума гетероклинический канал определяется двумя чертами: 1) достаточно сильным сжатием фазового объёма в окрестности сёдел по отношению к растяжению такого объёма вдоль неустойчивых сепаратрис, 2) относительно долгим временем прохождения окрестности сёдел в присутствии малого шума.

Рассмотрим канал, который состоит из сёдел, каждое из которых имеет одномерное неустойчивое многообразие — сепаратрису, ведущую к следующему седлу в цепочке (см. рис. 6). Чтобы получить условия устойчивости канала, мы должны рассмотреть элементарный fazовый объём в окрестности каждого из сёдел. Такой



**Рис. 8.** Пространственно-временное представление сенсорной информации обонятельной системой саранчи: (а) экваториальный разрез центра первичной обработки — "antennal lobe (AL)"; (б) отклик 110 нейронов AL на представленный запах (длительность стимула 1,5 с); (в) проекция активности нейронов в трёхмерное пространство (чёрная траектория — результат усреднения по десяти разным наблюдаемым); (г) многообразие гетероклинических цепочек в ансамбле из семи нейронных групп.

объём сжимается вдоль устойчивых сепаратрис и растягивается вдоль неустойчивых. Если упорядочить собственные значения седла  $i$  по модулю, будем иметь

$$\lambda_1^i > 0 > \operatorname{Re}\{\lambda_2^i\} \geq \operatorname{Re}\{\lambda_3^i\} \geq \dots \geq \operatorname{Re}\{\lambda_n^i\}. \quad (1)$$

Теперь определим седловую величину числом

$$v_i = \frac{-\operatorname{Re}\{\lambda_2^i\}}{\lambda_1^i}. \quad (2)$$

Если

$$v_i > 1, \quad (3)$$

тогда сжатие преобладает над растяжением и седло называется диссипативным. При условии, что все сёдла, образующие гетероклиническую цепочку диссипативны, траектории не могут покинуть её окрестность, и гетероклинический канал устойчив.

В отсутствии шума система может двигаться вдоль неустойчивой сепаратрисы к очередному седлу бесконечно долго. В присутствии же шума время прохода окрестности седла, т.е. время жизни метастабильного состояния, конечно. Это время определяется выражением [110]

$$\tau^i = \frac{1}{\lambda_1^i} \ln \frac{1}{|\eta|}, \quad (4)$$

где  $\tau^i$  — среднее время, которое система проводит в окрестности седла (предполагается, что начальные условия принадлежат устойчивому многообразию),  $|\eta|$  — уровень шума. Для каждой конкретной модели, в фазовом пространстве которой существует гетероклинический канал, на базе соотношений (2), (3) можно получить ограничения на параметры модели, удовлетворение которых гарантирует структурную устойчивость канала.

### 3.8. Иерархия информационных потоков.

#### Гетероклиническое дерево

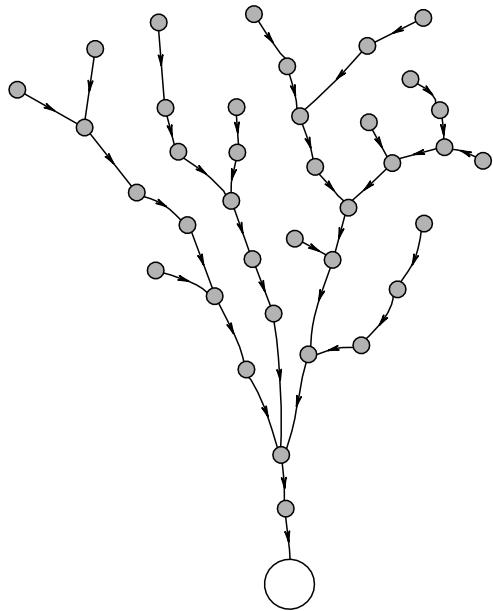
Иерархическая организация мозга [126] от сравнительно "простых" (сенсорных) уровней к более сложным под-

корковым структурам и до коры больших полушарий — наводит на мысль, что информационные потоки в центральной нервной системе также иерархически организованы. Действительно, односторонний поток визуальной, звуковой и другой информации об окружающей среде через центры промежуточной обработки к коре, где принимаются решения и вырабатывается поведение, выглядит очень естественным. Реальность, однако, гораздо сложнее и увлекательнее. В мозге имеется огромное количество информационных обратных связей. Благодаря таким "встречным" информационным потокам центры коры контролируют работу сенсорных систем. В частности, за счёт фокусирования внимания возможно отбирать лишь ту сенсорную информацию, которая в данный момент нужна для выполнения интеллектуальной работы, или поддержания нормального функционирования организма в экстремальных условиях.

В то же время сама идея об иерархической организации информационных потоков мозга (см., например, [127]) представляется плодотворной. Только говорить нужно о потоках не в физическом пространстве, а в фазовом пространстве соответствующей динамической модели.

На рисунке 9 показана иерархическая структура таких сходящихся информационных потоков. Как видно, информация распространяется вдоль гетероклинических каналов, которые, как притоки рек, вливаются в общее информационное русло и заканчиваются в состоянии, представляющем достигнутое решение. Предлагаемое представление информационных процессов мозга естественным образом удовлетворяет требованиям причинно-следственных связей и, кроме того, создаёт предпосылки для правильной постановки и решения новых проблем. Например, таких, как ёмкость рабочей памяти [128] или зависимость устойчивости процессов обработки информации от эмоционального состояния.

Добавим, что "Теория информации живых систем" ещё в начальном состоянии своего развития. Однако здесь уже есть обещающие результаты [127, 129–132].



**Рис. 9.** "Гетероклиническое дерево" в многомерном фазовом пространстве динамической системы, описывающей параллельную и последовательную активность большого числа взаимодействующих мод, задействованных в выполнении определённой когнитивной функции (состояние, представляющее окончательное решение или выработанную стратегию поведения, отмечено светлым диском).

## 4. Базовая экологическая модель

### 4.1. Системы Лотки–Вольтерра

Динамику процесса конкуренции когнитивных или эмоциональных мод между собой и эмоциональных и когнитивных мод друг с другом будем описывать системами уравнений типа Лотки–Вольтерра. В обобщённой форме модель Лотки–Вольтерра имеет вид

$$\tau \frac{d}{dt} x_i(t) = x_i \left[ \mu_i(E) - \sum_{j=1}^n \varphi_{ij}(E) x_j(t) \right] + x_i(t) \eta(t), \quad (5)$$

$$i = 1, \dots, n,$$

где  $x_i \geq 0$  характеризует активность  $i$ -й моды (численность  $i$ -й популяции в экологии),  $n$  — число взаимодействующих мод (популяций),  $\mu_i(E)$  — инкремент моды,  $E$  — поступающая в систему информация или доступные ресурсы,  $\varphi_{ij}(E)$  — элементы матрицы взаимодействия,  $\eta(t)$  — мультипликативный шум, присутствующий в системе,  $\tau$  — характеристическое время, определяющее процесс.

В зависимости от соотношения параметров, эта модель демонстрирует исключительное разнообразие поведения. При более или менее симметричных связях, т.е. когда  $\varphi_{ij} \approx \varphi_{ji}$  обнаруживается феномен мультистабильности, т.е. в системе одновременно возможны два или более устойчивых состояний. Реализация одного из них определяется начальными условиями. При существенно несимметричных связях наблюдаются гетероклинические и близкие к ним предельные циклы, устойчивые гетероклинические каналы, и динамический хаос [133]. Интересно упомянуть исследованный в [134] своеобразный вид динамического хаоса, когда случайно лишь время переходов между метастабильными состояниями, порядок же переключений — структурно устой-

чив. Подобная воспроизводимая, с точки зрения сохранения последовательности когнитивных мод в цепочке, переходная динамика может быть исключительно интересна для отображения и понимания многих процессов мышления. Такая динамика также открывает новые перспективы для анализа наблюдаемых данных.

Значения параметров модели, при которых существуют и устойчивы переходные движения в виде гетероклинических каналов, определяются из неравенств, которые в каждом конкретном случае можно получить, основываясь на соотношениях (2) и (3), гарантирующих структурную устойчивость гетероклинических каналов. В работе [135] такие условия обобщены и на случай слабовзаимодействующих подсистем вида (5).

Как уже говорилось, когнитивные и эмоциональные моды тесно связаны. Тем не менее естественно полагать, что моды одного семейства связаны друг с другом сильнее, чем с модами из другого семейства. При этом можно считать, что одно семейство лишь модулирует динамику другого, не разрушая его. В частности, когнитивные моды поддерживают эмоциональное равновесие, а эмоции индуцируют или (если они отрицательные) подавляют интеллектуальную деятельность. Имея это в виду, естественно описывать взаимодействие эмоций и когнитивной активности с помощью связанных подсистем уравнений типа (5). Учитывая динамику ресурсов, за которые борются когнитивные и эмоциональные моды, таких подсистем должно быть три: моды эмоций, когнитивные моды и ресурсы (внимание, память, энергия). Подчеркнём здесь специально роль внимания.

Внимание выбирает среди предоставляемой сенсорными системами информации те объекты, которые в данный момент времени наиболее существенны для оценки ситуации и выработки правильного поведения. Эксперименты подсказывают, что эффективность поддержки вниманием разных ментальных процессов определяется конкуренцией между различными объектами внимания. Для простоты дальнейшего изложения будем считать, что описание конкуренции за внимание между эмоциями и когнитивными функциями не требует спецификации отдельных мод и поэтому ограничимся рассмотрением конкурентной борьбы за внимание "в целом" эмоций:  $\tilde{B} = \sum_{i=1}^M B_i$  и "в целом" когнитивных мод:  $\tilde{A} = \sum_{i=1}^N A_i$ . Тогда наши базовые уравнения можно записать в виде

$$\begin{aligned} \tau_A \frac{d}{dt} A_i(t) &= A_i(t) \left[ \sigma_i(I, \mathbf{B}, D) R_A - \sum_{j=1}^N \rho_{ij}(D) A_j(t) \right] + \\ &+ A_i(t) \eta(t), \quad i = 1, \dots, N, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tau_B \frac{d}{dt} B_i(t) &= B_i(t) \left[ \zeta_i(S, \mathbf{A}, D) R_B - \sum_{j=1}^M \xi_{ij}(D) B_j(t) \right] + \\ &+ B_i(t) \eta(t), \quad i = 1, \dots, M, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\tau_{R_A} \frac{d}{dt} R_A(t) = R_A(t) \left[ \tilde{A} - (R_A(t) + \phi_A(I, D) R_B(t)) \right], \quad (8)$$

$$\tau_{R_B} \frac{d}{dt} R_B(t) = R_B(t) \left[ \tilde{B} - (R_B(t) + \phi_B(S, D) R_A(t)) \right]. \quad (9)$$

Здесь  $A_i$  и  $B_i$  — неотрицательные переменные, соответствующие когнитивным и эмоциональным модам, общая интенсивность которых обозначается  $\tilde{A}$  и  $\tilde{B}$  соответственно,  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  — векторное представление

переменных. Те и другие виды активности получают сигналы от внешнего мира: информацию  $I$  и характеристики эмоционального влияния  $S$  (в случае отрицательных эмоций — это стресс),  $D$  — уровень принимаемых лекарств. Параметры  $\tau_A$  и  $\tau_B$  представляют характерные времена сознательной и эмоциональной активностей. Как и в (5),  $\eta(t)$  — мультиплексный шум. Пременные  $R_A$  и  $R_B$  характеризуют динамику ресурсов, прежде всего, внимания, коэффициенты  $\phi_A$  и  $\phi_B$  определяют интенсивность борьбы за внимание со стороны эмоций и мышления.

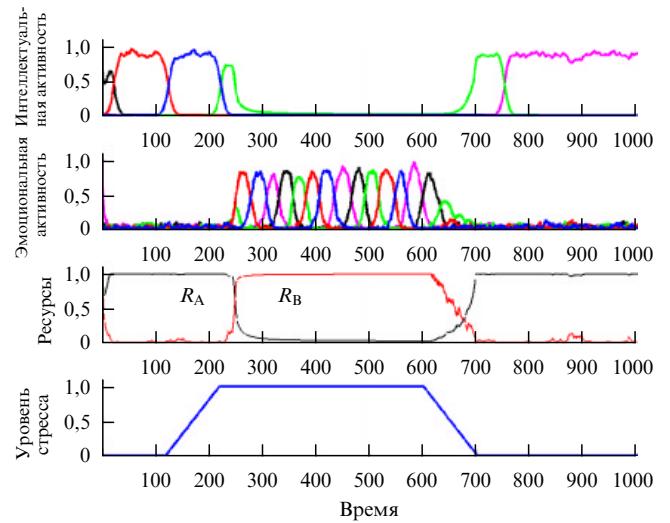
Эмоциональные и когнитивные процессы мозга могут существенно отличаться по своим динамическим свойствам. Это не только различие по временным параметрам  $\tau$  (эмоциональная реакция обычно заметно быстрее), но и по характеру поведения. Когнитивная деятельность в большинстве случаев может рассматриваться как зависящий от поставленной цели переходный процесс. Математическим образом такого процесса естественно считать устойчивый гетероклинический канал. Динамика эмоций может быть гораздо разнообразнее — это могут быть нерегулярные пульсации (странный аттрактор), подобные когнитивным переходным режимам, рекуррентная динамика, отвечающая циклическим перепадам настроения, и, наконец, долгоживущие равновесия — клинические случаи глубокой депрессии или постоянного перевозбуждения.

Зависимость инкрементов  $\sigma_i$  и  $\zeta_i$  от **A** и **B**, соответственно, описывает прямое влияние активности когнитивных процессов на эмоции и эмоций на мышление. Это может быть, например, возбуждающее или тормозящее действие эмоций на когнитивные процессы и, наоборот, сдерживание эмоций, благодаря выработке правильной стратегии поведения при наличии стресса или перевозбуждения.

#### 4.2. Стресс и гистерезис

Насколько адекватна предложенная модель описанию интеллектуального и эмоционального поведения индивидуума? Какие параметры модели ответственны за те или иные психические заболевания? На эти вопросы ещё предстоит ответить, однако уже имеющиеся результаты выглядят весьма обнадёживающими. Приведём здесь пример конкретного применения модели (6)–(9).

В психиатрической практике хорошо известен "феномен гистерезиса" [136], суть которого заключается в следующем. Здоровый человек в нормальной обстановке реагирует на стресс пропорционально его величине, т.е. при малом уровне стресса уровень отрицательных эмоций (тревога, страх и пр.) также невелик. По мере увеличения стресса степень напряжённости монотонно нарастает. При уменьшении стресса уровень отрицательных эмоций повторяет пройденный путь в обратном направлении. Люди же с нарушенной ментальной активностью, или люди, поставленные в экстремальные условия (например, спортсмены перед олимпийскими стартами) часто демонстрируют иное поведение. А именно, отрицательные эмоции при умеренном увеличении стресса вообще мало меняются, но зато, когда величина стресса достигает критического значения, уровень отрицательных эмоций возрастает скачком и даже может перейти в панику. При уменьшении стресса, однако, эмоции не повторяют пройденный путь — человек возвращается в спокойное состояние при сущест-

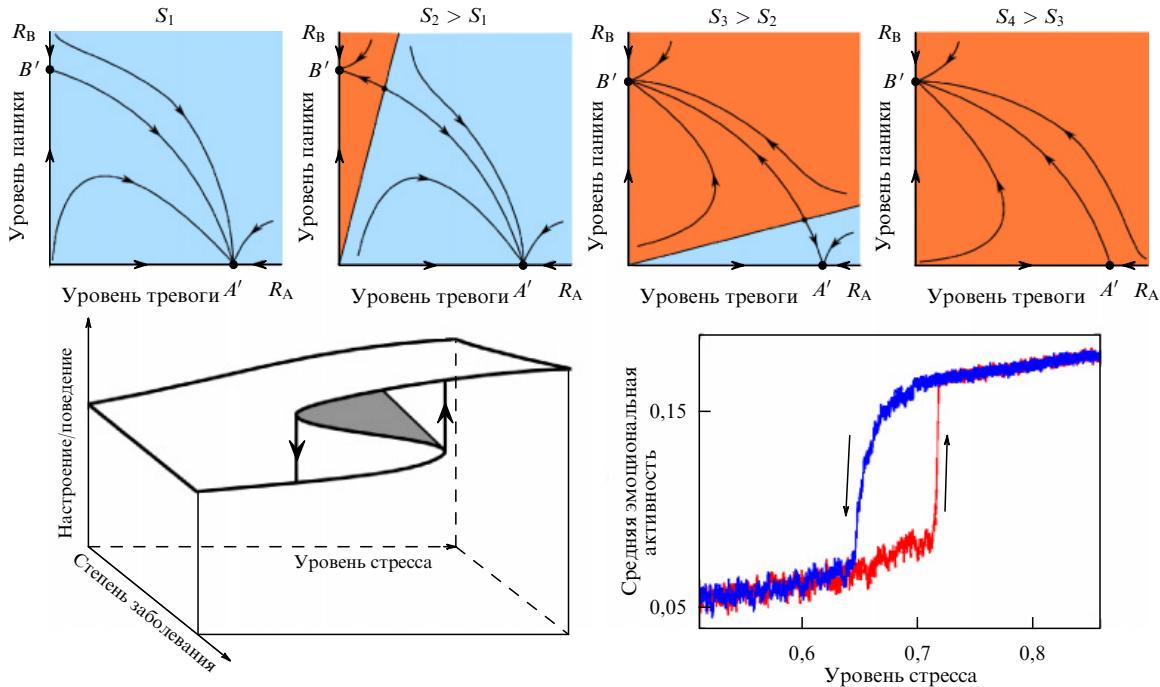


**Рис. 10.** Явление "эмоционального гистерезиса" при возникновении и исчезновении стресса, полученное в численном эксперименте (параметры модели (6)–(9) такие:  $N = 5$ ,  $M = 5$ ,  $|\eta| = 10^{-8}$  уровень шумов для интеллектуальной активности и  $|\eta| = 10^{-3}$  уровень шумов для эмоциональной компоненты. Начальные условия случайны. Значения элементов матриц связи удовлетворяют неравенствам, выписанным в работе [61].

венно более низком уровне стресса, чем это состояние покидает. Насколько нам известно, динамической модели психологического "гистерезиса" не существует.

На рисунке 10 представлены результаты компьютерного анализа модели (6)–(9) при наличии внешнего стимула  $S(t)$ , характеризующего уровень стресса. Значения параметров указаны в подписи к рисунку. Главной особенностью обнаруженному поведения является бистабильность в определённом диапазоне изменений уровня стресса и сопровождающий такую бистабильность гистерезис. Чтобы качественно пояснить этот феномен, необходимо оценить размер областей притяжения аттракторов  $R'_A$  и  $R'_B$ . Границы петли гистерезиса определяются значениями величины стресса, при которых одна область притяжения становится много больше другой и наоборот. Проведём анализ, основываясь на том факте, что динамика среднего уровня эмоциональной  $\bar{B}$  и когнитивной  $\bar{A}$  активностей совпадают, в основном, с поведением функций  $R_B$  и  $R_A$  соответственно (рис. 10).

Фазовые портреты системы на плоскости  $R_A$ ,  $R_B$  представлены на рис. 11. Как видно, при малой интенсивности стресса значительно преобладает область притяжения состояния  $A'$ . По мере увеличения интенсивности  $S$  области притяжения  $A'$  и  $B'$  становятся сравнимы (бистабильность). Дальнейшее же увеличение стресса приводит к моностабильному режиму "паники"  $A' = 0$ . Поскольку система "помнит" начальные условия при изменении параметра интенсивности стресса, при его уменьшении возвращение в спокойное состояние произойдёт, лишь когда область притяжения  $A'$  станет много больше области притяжения  $B'$ , т.е. при значении стресса меньшем, чем то, при котором наблюдается скачок в состояние паники. В случае "нормы" при разумных значениях стресса состояние  $A'$  глобально устойчиво и гистерезис, следовательно, отсутствует. В трёхмерном пространстве "степень возбуждения", "степень заболевания" и "уровень стресса" описанная картина изображается в виде складки на поверхности



квазистатических ментальных состояний (мы использовали здесь термин теории катастроф [137]).

#### 4.3. Взаимодействие настроения и мышления в покое

Такое взаимодействие может быть очень разнообразным и зависит от психологического профиля личности. В уравнениях этот профиль зафиксирован в значениях параметров, а точнее, в их соотношениях, т.е. отношении характерных времён поведения основных мод, степени несимметрии тормозящих связей и пр. Проанализируем на примере некоего усредненного профиля взаимодействие трёх компонент активности мозга: поведение, эмоциональной памяти и когнитивной деятельности при отсутствии внешних воздействий.

Положим, что когнитивная составляющая — это переходный процесс, который после выполнения работы должен завершиться устойчивым равновесием. Представим когнитивный процесс пятью модами, поведение — тремя и эмоциональную память двумя модами, описываемыми положительные и отрицательные воспоминания соответственно. Параметры модели возьмём те же, что и в предыдущем эксперименте (см. подпись к рис. 10). Пусть в начале процесса отличны от нуля: одна когнитивная мода, одна из мод, описывающих плохое настроение, и обе моды эмоциональной памяти, причём мода, ответственная за представление положительных воспоминаний, несколько преобладает над той, что представляет отрицательные. Фазовый портрет системы представлен на рис. 12, а развитие процесса во времени на рис. 13. Можно видеть, что на первой стадии положительные воспоминания подавляют отрицательные эмоции (настроение) и поддерживают когнитивную деятельность. Затем отрицательные воспоминания вытесняют положительные, настроение ухудшается (см. также [138]) и когнитивная активность падает, однако сознание про-

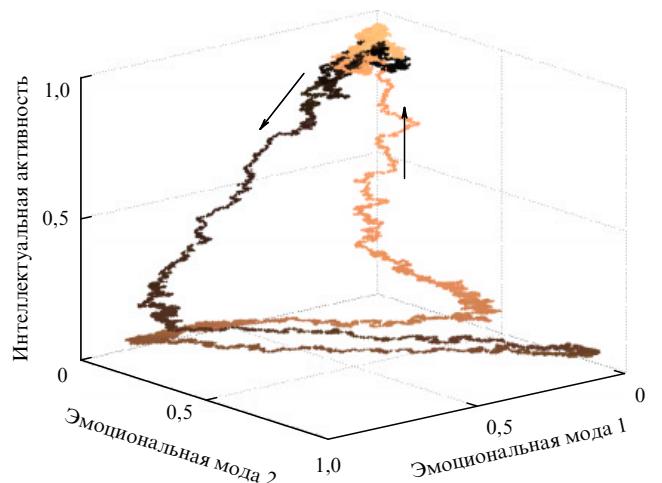


Рис. 12. Фазовый портрет, представляющий взаимодействие настроения и мышления при отсутствии внешних воздействий.

должает частично контролировать эмоции и память и, наконец, отрицательные воспоминания подавляются расширяющимися положительными. В результате когнитивные моды завершают заданную работу. Естественно, что для личности с другим психологическим профилем динамика взаимодействия настроения и мышления может оказаться иной: воспоминания будут хаотически сменять друг друга, соответственно будет скакать настроение, не давая довести до конца задуманную мыслительную работу. В некоторой области "психиатрических параметров" отрицательные воспоминания вызывают длительную фазу плохого настроения, которое из переходного режима может перейти в стационарное состояние (устойчивая депрессия).

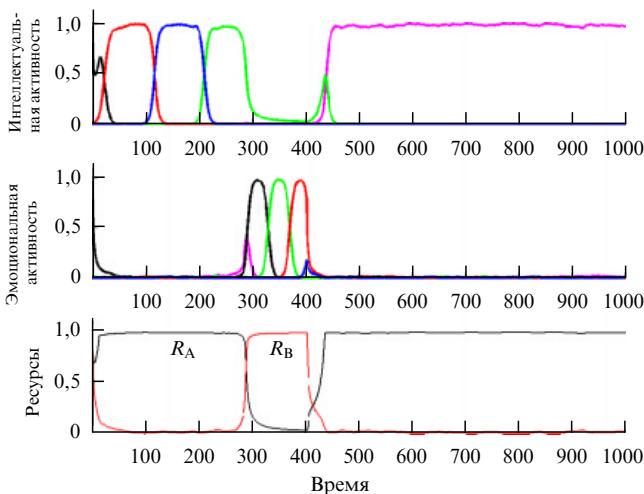


Рис. 13. Временная динамика эмоций, когнитивной активности и эмоциональной памяти, соответствующая фазовому портрету на рис. 12.

## 5. Заключение

Возвращаясь к эпиграфу нашей статьи, следует признать, что вопросы: "как мы думаем?" и "откуда берётся мысль?" остались без ответа. Мы, однако, надеемся, что нам удалось донести до читателя некоторые идеи о работе мозга, о его возможностях обрабатывать приходящую извне информацию и генерировать свою, которая может оказаться и рождённой мыслью.

Мы сфокусировали наше внимание лишь на определённом проявлении мозговой деятельности — эмоциях и их взаимодействии с когнитивными функциями, рассматривая возможности их описания и моделирования с помощью теории динамических систем. Однако и этот предмет, возможно, даже слишком широк для одного обзора. Сформулируем здесь основные результаты и видимые приложения.

**Принципы.** Ввиду исключительной сложности мозга, для успешного описания множества его когнитивных и поведенческих функций необходимо найти правильный уровень усреднения или абстрагирования от деталей. Мы думаем, что это должен быть уровень не отдельных нейронных групп и даже не мозговых центров, а уровень переходных когнитивных мод и метастабильных состояний. Принципы, которые управляют динамикой таких крупномасштабных состояний, таковы: а) качественная независимость когнитивного поведения от умеренного шума, б) воспроизводимость такого поведения при близких условиях внешней среды и состояниях организма и в) конкурентный принцип борьбы эмоциональных и когнитивных мод за энергетические и информационные ресурсы мозга. В рамках такого подхода нормальная интеллектуальная деятельность может рассматриваться как проявление типичных динамических свойств сложной нейронной сети. В то же время разного рода психические заболевания — это искажения естественной динамики таких сетей. Разделение ментальных процессов по типам динамических нарушений — это новое направление в диагностике, моделировании и лечении умственных заболеваний.

Динамический анализ метастабильных состояний и переходных паттернов умственного поведения факти-

чески означает рождение нового направления в психиатрии. Создание такого направления заслуживает названия "Проект динамической психиатрии", как парафраз книги Зигмунда Фрейда "Проект научной психологии" [139].

**Динамические образы.** В состоянии умственного отдыха, т.е. в ожидании интеллектуальной нагрузки, большинство отделов мозга демонстрируют сложную хаотическую динамику, которая отражает слабое взаимодействие многих существующих ментальных процессов, характеризуемых разнообразными временными масштабами. Такое состояние обеспечивает мозгу замечательную возможность быстрого реагирования на вновь поступившую извне информацию, или изменение физиологических параметров. Подобная реакция приводит к рождению устойчивого и воспроизводимого сознательного поведения.

Динамические принципы, которые мы здесь обсуждали, дают нам понимание природы подобной надёжности интеллектуального поведения. Это поведение есть результат устойчивой переходной активности мозга, который представляет собой открытую неравновесную систему с конечной во времени плотностью энергетических и информационных ресурсов. Как было показано, процесс конкуренции между различными модами, зависящими от входной информации, разрешает фундаментальное противоречие между надёжностью и чувствительностью к слабым информационным сигналам. Динамические объекты, с помощью которых описываются подобные процессы, — это устойчивый гетероклинический канал, метастабильные состояния, т.е. диссипативные сёдла и неустойчивые сепаратрисы.

Мы здесь рассмотрели гетероклинические каналы лишь с одномерными неустойчивыми сепаратрисами. Как показывают предварительные модельные эксперименты, в случае многомерных неустойчивых сепаратрис полученные результаты остаются справедливыми, если лишь одна из ляпуновских экспонент оказывается доминирующей. Если же несколько положительных экспонент оказываются одного порядка, функционально ориентированное умственное поведение разрушается. С этой точки зрения определённые психические заболевания могут описываться динамическими параметрами, в том или ином виде опирающимися на оценку таких экспонент и времён жизни метастабильных состояний.

**Использование динамических характеристик в клинике.** Недавние клинические исследования показали, что психические заболевания, как и психическое здоровье, не может характеризоваться состоянием лишь в данный момент времени. Следовательно, действительно, подобные заболевания являются динамическими и нуждаются в соответствующей — динамической диагностике.

Авторы недавней работы [140] задались вопросом о разнице в уровнях вариаций настроения между психически здоровыми и больными людьми. Они сравнили почасовые вариации настроения пациентов с признаками депрессии или впадающими в панику с вариациями поведения людей без подобных заболеваний. Было обнаружено, что у здоровых людей изменение настроения во времени напоминает временную наблюдаемую биений сердца. Как и при анализе биений здорового сердца, которые характеризуются определённым уровнем хаотичности, у здоровых участников поведенческого эксперимента обнаруживались признаки нерегулярности в суточных вариациях поведения. Депрессивные па-

циенты вообще не показывали колебаний настроения. У впадающих в панику больных настроение изменялось, но оно никак не было связано с суточными колебаниями, дополненными хаотическими вкраплениями. Эти результаты означают, что поведение здоровых людей более подвижно. В частности, наличие в их временной наблюдаемой хаотических фаз означает их быстрое реагирование на воздействие социальных или биологических стрессов. Такой пластичности не наблюдается в поведении людей с депрессией или склонных к панике.

Наши усилия, направленные на построение динамических моделей эмоционального и сознательного поведения, фактически предлагают клиническим исследованиям, подобным описанному выше, новые подходы к сбору и анализу данных и диагностике. Можно только добавить, что объединение функциональной томографии мозга и генетического анализа специфических ментальных заболеваний с анализом нестационарной динамики мозга усовершенствует лечение душевных заболеваний.

Авторы благодарят В. Афраймовича, А. Быстрицкого, Р. Хуерту, А. Симмонса и И. Стриго за многократные плодотворные дискуссии. М.И.Р. благодарен также А.В. Гапонову-Грехову, разговоры с которым подтолкнули к написанию настоящего обзора. Эта работа выполнена при поддержке Организации морских исследований США, грант ONR-N00014-0741.

## Список литературы

1. Ashby W R *Design for a Brain* (New York: J. Wiley, 1954)
2. Thelen E, Smith L B *A Dynamic Systems Approach to the Development of Cognition and Action* (Cambridge, MA: MIT Press, 1994)
3. Port R F, van Gelder T (Eds) *Mind as Motion: Explorations in the Dynamics of Cognition* (Cambridge, MA: MIT Press, 1995)
4. Newell A, Simon H A *Commun. ACM* **19** 113 (1976)
5. Buzsáki G *Rhythms of the Brain* (New York: Oxford Univ. Press, 2006)
6. Dehaene S, Sergent C, Changeux J-P *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **100** 8520 (2003)
7. Rabinovich M I et al. *Rev. Mod. Phys.* **78** 1213 (2006)
8. Buzsáki G, Draguhn A *Science* **304** 1926 (2004)
9. Keele S W et al. *Psychol. Rev.* **110** 316 (2003)
10. Bailey D L et al. (Eds) *Positron Emission Tomography* (New York: Springer, 2005)
11. Rowan A J, Tolunsky E *Primer of EEG: With A Mini-Atlas* (Philadelphia, PA: Butterworth-Heinemann, 2003)
12. Kim S G, Richter W, Uğurbil K *Magn. Reson. Med.* **37** 631 (1997)
13. Darwin C *The Expression of the Emotions in Man and Animals* (London: J. Murray, 1872)
14. Покровский В М, Коротко Г Ф (Ред.) *Физиология человека* (М.: Медицина, 1997)
15. Симонов П В *Эмоциональный мозг. Физиология. Нейроанатомия. Психология эмоций* (М.: Наука, 1981) [Simonov P V *The Emotional Brain: Physiology, Neuroanatomy, Psychology, and Emotion* (New York: Pergamon Press, 1986)]
16. Рубинштейн С Л *Основы общей психологии* Т. 1, 2 (М.: Педагогика, 1989)
17. Вильюнас В К *Психология эмоциональных явлений* (М.: Изд-во МГУ, 1976)
18. Izard C E *The Psychology of Emotion* (New York: Plenum Press, 1991) [Изард К Е *Психология эмоций* (М.: Питер, 2006)]
19. Franz A J *Int. J. Psychoanalysis* **16** 399 (1935)
20. Zautra A *Emotions, Stress, and Health* (New York: Oxford Univ. Press, 2003)
21. Bruner J *Acts of Meaning* (Cambridge, MA: Harvard Univ. Press, 1990)
22. Bar-Yam Y *Dynamics of Complex Systems* (Boulder, CO: Westview Press, 2003)
23. Watts D J, Strogatz S H *Nature* **393** 440 (1998)
24. Maass W, Natschläger T, Markram H *Neural Comput.* **14** 2531 (2002)
25. Majda A J, Harlim J *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **104** 9558 (2007)
26. Friston K et al. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* **355** 135 (2000)
27. Rabinovich M I et al. *PLoS Comput. Biol.* **4** e1000072 (2008)
28. Schraagen J M, Chipman S F, Shalin V L (Eds) *Cognitive Task Analysis* (Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2000)
29. Hollnagel E (Ed.) *Handbook of Cognitive Task Design* (Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2003)
30. Price D D, Barrell J E, Barrell J J *Motivation Emotion* **9** 19 (1985)
31. Scherer K R *Cognition Emotion* **7** 1 (1993)
32. Thagard P, Aubie B *Consciousness Cognition* **17** 811 (2008)
33. Lee J H *J. Exp. Education* **67** 218 (1999)
34. Fales C L et al. *Biol. Psychiatry* **63** 377 (2008)
35. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Механика сплошных сред* (М.: ГИТТЛ, 1954) [Landau L D, Lifshitz E M *Fluid Mechanics* (Oxford: Pergamon Press, 1959)]
36. David O, Friston K J *NeuroImage* **20** 1743 (2003)
37. Zavaglia M et al. *J. Neurosci. Methods* **157** 317 (2006)
38. Phan K L et al. *NeuroImage* **16** 331 (2002)
39. Dolcos F, McCarthy G J. *Neurosci.* **26** 2072 (2006)
40. Young M P et al. *Rev. Neurosci.* **5** 227 (1994)
41. Gorman J M et al. *Am. J. Psychiatry* **157** 493 (2000)
42. Damasio A R *Descartes' Error: Emotion, Reason, and the Human Brain* (New York: Putnam, 1994)
43. Scherer K R, in *Handbook of Cognition and Emotion* (Eds T Dalgleish, M Power) (Chichester: Wiley, 1999) p. 637
44. Williams L W, Gordon E *Neuroscientist* **13** 349 (2007)
45. Lewis M D *Behav. Brain Sci.* **28** 169 (2005)
46. Pessoa L *Nature Rev. Neurosci.* **9** 148 (2008)
47. Gray J R, Braver T S, Raichle M E *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **99** 4115 (2002)
48. Raichle M E, Gusnard D A *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **99** 10237 (2002)
49. Kelso J A S *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior* (Cambridge, MA: MIT Press, 1995)
50. Ganguli S, Huh D, Sompolinsky H *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **105** 18970 (2008)
51. Keightley M L et al. *Neuropsychologia* **41** 585 (2003)
52. Meador K J et al. *Neurology* **59** 847 (2002)
53. Libet B et al. *Brain* **102** 193 (1979)
54. James W *The Principles of Psychology* (New York: H. Holt, 1890)
55. Gurwitsch A *Philos. Phenomen. Res.* **3** 449 (1943)
56. Baars B J *A Cognitive Theory of Consciousness* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1988)
57. Arzy S, Molnar-Szakacs I, Blanke O *J. Neurosci.* **28** 6502 (2008)
58. Laureys S *Trends Cognitive Sci.* **9** 556 (2005)
59. Shanahan M J. *Consciousness Studies* **12** (12) 46 (2005)
60. Wallace R *Consciousness: A Mathematical Treatment of the Global Neuronal Workspace Model* (New York: Springer, 2005)
61. Afraimovich V S, Zhigulin V P, Rabinovich M I *Chaos* **14** 1123 (2004)
62. Rabinovich M, Huerta R, Laurent G *Science* **321** 48 (2008)
63. Rabinovich M et al. *Phys. Rev. Lett.* **87** 068102 (2001)
64. Wicker B et al. *Brain Res. Rev.* **43** 224 (2003)
65. Kelley W M et al. *J. Cognitive Neurosci.* **14** 785 (2002)
66. Northoff G et al. *NeuroImage* **31** 440 (2006)
67. Broyd S J et al. *Neurosci. Biobehav. Rev.* **33** 279 (2009)
68. Gusnard D A, Raichle M E *Nature Rev. Neurosci.* **2** 685 (2001)
69. Gusnard D A et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **98** 4259 (2001)
70. Raichle M E et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **98** 676 (2001)
71. Buckner R L, Andrews-Hanna J R, Schacter D L *Ann. NY Acad. Sci.* **1124** 1 (2008)
72. Hameroff S R *Cognitive Sci.* **31** 1035 (2007)
73. John E R *Consciousness Cognition* **10** 184 (2001)
74. Litt A et al. *Cognitive Sci.* **30** 593 (2006)
75. Penrose R *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness* (Oxford: Oxford Univ. Press, 1996)
76. Менский М Б *УФН* **175** 413 (2005) [Menskii M B *Phys. Usp.* **48** 389 (2005)]

77. Wheeler J A, Zurek W H (Eds) *Quantum Theory and Measurement* (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1983)
78. Hopfield J J *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **79** 2554 (1982)
79. Cohen M A, Grossberg S *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* **13** 815 (1983)
80. Wills T J et al. *Science* **308** 873 (2005)
81. Абарбанель Г и др. УФН **166** 363 (1996) [Abarbanel H D et al. *Phys. Usp.* **39** 337 (1996)]
82. Nowotny T, Huerta R, Rabinovich M I *Chaos* **18** 037119 (2008)
83. Friston K J *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* **355** 215 (2000)
84. Koenig T, Marti-Lopez F, Valdes-Sosa O *NeuroImage* **14** 383 (2001)
85. Friston K J *NeuroImage* **5** 164 (1997)
86. Louis M et al. *Nature Neurosci.* **11** 187 (2007)
87. Смолянинов В В УФН **170** 1063 (2000) [Smolyaninov V V *Phys. Usp.* **43** 991 (2000)]
88. Botvinick M M *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **362** 1615 (2007)
89. Abeles M et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **92** 8616 (1995)
90. Bressler S L, Kelso J A S *Trends Cognitive Sci.* **5** 26 (2001)
91. Oullier O, Kelso J A S *Trends Cognitive Sci.* **10** 353 (2006)
92. Werner G *Biosystems* **90** 496 (2007)
93. Ito J, Nikolaev A R, van Leeuwen C *Hum Brain Mapping* **28** 904 (2007)
94. Sasaki T, Matsuki N, Ikegaya Y *J. Neurosci.* **27** 517 (2007)
95. Fingelkurts A A, Fingelkurts A A *Cognitive Process* **7** 135 (2006)
96. Chen Y, Bressler S L, Ding M *Comput. Math. Organ. Theo.* (2009) (in press)
97. de Borda J C *Memoire sur les Elections au Scrutin* (Paris: Académie Royale des Sciences, 1781)
98. Saari D G *Basic Geometry of Voting* (Berlin: Springer, 1995)
99. Busse F H, Heikes K E *Science* **208** 173 (1980)
100. Rabinovich M I, Ezersky A B, Wiedermann P D *The Dynamics of Patterns* (Singapore: World Scientific, 2000)
101. Afraimovich V, Tristan I, Huerta R, Rabinovich M I *Chaos* **18** 043103 (2008)
102. Wilson H R, Cowan J D *Kybernetik* **13** (2) 55 (1973)
103. Lotka A J *Elements of Physical Biology* (Baltimore: Williams and Wilkins, 1925)
104. Свиржев Ю М, Логофет Д О *Устойчивость биологических сообществ* (М.: Наука, 1978)
105. Свиржев Ю М, в кн. Вольтерра В *Математическая теория борьбы за существование* (М.: Наука, 1976)
106. Базыкин А Д *Математическая биофизика взаимодействующих популяций* (М.: Наука, 1985) [Bazykin A D *Nonlinear Dynamics of Interacting Populations* (Singapore: World Scientific, 1998)]
107. Rabinovich M I, Huerta R, Afraimovich V *Phys. Rev. Lett.* **97** 188103 (2006)
108. Huerta R, Rabinovich M *Phys. Rev. Lett.* **93** 238104 (2004)
109. Kifer Y *Israel J. Math.* **40** 74 (1981)
110. Stone E, Holmes P *SIAM J. Appl. Math.* **50** 726 (1990)
111. Aron A R *Neuroscientist* **13** 214 (2007)
112. Kelly A M C et al. *NeuroImage* **39** 527 (2008)
113. Jaffard M et al. *NeuroImage* **42** 1196 (2008)
114. Buzsáki G, Kaila K, Raichle M *Neuron* **56** 771 (2007)
115. Jones L M et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **104** 18772 (2007)
116. Кадомцев Б *Динамика и информация* 2-е изд. (М.: Редакция журнала "Успехи физических наук", 1999)
117. Кадомцев Б УФН **164** 449 (1994) [Kadomtsev B B *Phys. Usp.* **37** 425 (1994)]
118. Кадомцев Б УФН **165** 967 (1995) [Kadomtsev B B *Phys. Usp.* **38** 923 (1995)]
119. Кадомцев Б УФН **173** 1221 (2003) [Kadomtsev B B *Phys. Usp.* **46** 1183 (2003)]
120. Mazor O, Laurent G *Neuron* **48** 9069 (2005)
121. Stopfer M, Jayaraman V, Laurent G *Neuron* **39** 991 (2003)
122. Friedrich R W, Laurent G *Science* **291** 889 (2001)
123. Fox M D et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **102** 9673 (2005)
124. Fox M D et al. *Neuron* **56** 171 (2007)
125. Just M A, Varma S *Cognitive Affect. Behav. Neurosci.* **7** 153 (2007)
126. Hawkins J, Blakeslee S *On Intelligence* (New York: Times Books, 2004)
127. Yamashita Y, Tani J *PLoS Comput. Biol.* **4** e1000220 (2008)
128. Rabinovich M I, Bick C, submitted (2009)
129. Иванитский Г Р, Медвинский А Б, Цыганов М А УФН **164** 1041 (1994) [Ivanitskiy G R, Medvinskii A B, Tsyanov M A *Phys. Usp.* **37** 961 (1994)]
130. Чернавский Д С УФН **170** 157 (2000) [Chernavskiy D S *Phys. Usp.* **43** 151 (2000)]
131. Борисюк Г Н и др. УФН **172** 1189 (2002) [Borisuk G N et al. *Phys. Usp.* **45** 1073 (2002)]
132. Schyns P G, Gosselin F, Smith M L *Trends Cognitive Sci.* **13** 20 (2009)
133. Muezzinoglu M K et al. *Int. J. Bifurcation Chaos* June (2010)
134. Varona P et al. *Neurocomputing* **58–60** 549 (2004)
135. Afraimovich V, Young T, Muezzinoglu M K, Rabinovich M I *Bull. Math. Biol.* to appear (2010)
136. Glover H J. *Traumatic Stress* **5** 643 (1992)
137. Zeeman E C *Catastrophe Theory: Selected Papers, 1972–1977* (Reading, MA: Addison-Wesley, 1977)
138. Ellis H C, Ashbrook P W, in *Mood and Memory: Theory, Research, and Applications* (Ed. D Kuiken) (Newbury Park, CA: Sage Publ., 1991) p. 1–22
139. Freud S, in *The Standard Edition of the Complete Psychological Works of Sigmund Freud* Vol. 1 (London: Hogarth Press, 1953) p. 283–397
140. Katerndahl D et al. *Prim. Care Companion J. Clin. Psychiatry* **9** 183 (2007)

## Nonlinear dynamics of the brain: emotion and cognition

**M.I. Rabinovich, M.K. Muezzinoglu**

9500 Gilman Dr., University of California,  
San Diego, La Jolla, CA 92093-0402, USA

Tel. +1 858 534 67 53. Fax +1 858 534 76 64

E-mail: mrabinovich@ucsd.edu, mrabinovich@gmail.com

Experimental investigations of neural system functioning and brain activity are standardly based on the assumption that perceptions, emotions, and cognitive functions can be understood by analyzing steady-state neural processes and static tomographic snapshots. The new approaches discussed in this review are based on the analysis of transient processes and metastable states. Transient dynamics is characterized by two basic properties, structural stability and information sensitivity. The ideas and methods that we discuss provide an explanation for the occurrence of and successive transitions between metastable states observed in experiments, and offer new approaches to behavior analysis. Models of the emotional and cognitive functions of the brain are suggested. The mathematical object that represents the observed transient brain processes in the phase space of the model is a structurally stable heteroclinic channel. The possibility of using the suggested models to construct a quantitative theory of some emotional and cognitive functions is illustrated.

PACS numbers: **05.45.-a**, 87.18.Sn, 87.19.L-, 87.19.Ij

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004b.0371

Bibliography — 140 references

Received 26 June 2009, revised 4 August 2009

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **180** (4) 371–387 (2010)

*Physics – Uspekhi* **53** (4) (2010)