



И. А. Еввин

СИНЕРГЕТИКА МОЗГА

R&C
Dynamics

И. А. ЕВИН

СИНЕРГЕТИКА МОЗГА

R&C
Dynamics

РХД

Москва • Ижевск

2005

Интернет-магазин

MATHESIS

<http://shop.rcd.ru>

- физика
 - математика
 - биология
 - нефтегазовые технологии
-

Евин И. А.

Синергетика мозга. — Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. — 108 с.

Предлагаемая книга посвящена проблемам самоорганизации в функционировании мозга. Используя такие важные понятия синергетики как критическое состояние, динамический хаос, синхронизация, распознавание образов, предлагаются объяснения таких фундаментальных свойств функционирования мозга как безусловные и условные рефлексы, способность к прогнозированию, сознание и творчество, феномен искусства и его необходимость для человека.

Книга может быть интересна специалистам в области синергетики и проблем высшей нервной деятельности, психологам, а также читателям, интересующимся междисциплинарными методами познания.

ISBN 5-93972-424-8

© И. А. Евин, 2005

© НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005

<http://ccd.ru>

<http://ics.org.ru>

Оглавление

| | |
|---|----|
| Введение | 5 |
| ГЛАВА I. СИНЕРГЕТИКА И ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МОЗГА | 11 |
| 1.1. Элементы теории критических явлений | 11 |
| 1.1.1. Самоорганизованная критичность | 14 |
| 1.1.2. Синхронизация как критическое явление | 16 |
| 1.1.3. Сети | 19 |
| 1.1.3.1. Феномен «тесного мира» | 19 |
| 1.1.4. Безмасштабные сети | 21 |
| 1.1.4.1. Нейронные сети | 23 |
| 1.1.4.2. Устойчивость к ошибкам и повреждениям | 25 |
| 1.2. Мозг и критическое состояние | 25 |
| 1.2.1. Биохимические особенности мозга | 27 |
| 1.2.2. Синестезия | 27 |
| 1.2.3. Нейропластичность | 28 |
| 1.2.4. Двигательная координация и стабилизация неустойчивых состояний | 29 |
| 1.3. Распознавание образов и модель ассоциативной памяти Дж. Хопфилда | 32 |
| 1.3.1. Распознавание образов и гештальтпсихология | 41 |
| 1.4. Подразделенные нейронные сети | 44 |
| 1.4.1. Преимущества и недостатки подразделенных нейронных сетей в хранении информации | 46 |
| 1.4.2. Сенсорная информация: цвет, форма и движение в зрительном образе | 47 |
| 1.4.3. Лингвистика: существительное, глагол и прилагательное в структуре предложения | 49 |
| 1.5. Хаотическая динамика мозга | 51 |
| 1.5.1. Динамический хаос электрической активности нейронных ансамблей | 51 |
| 1.6. Интегративная функция мозга и синхронизация нейронной активности | 52 |

| | |
|---|-----|
| ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ МОЗГА | 58 |
| 2.1. Инстинктивное поведение | 58 |
| 2.2. Существует ли связь между собственными частотами мозга и инстинктивными формами поведения? | 59 |
| 2.3. Условный рефлекс как процесс распознавания образов по неполным данным | 63 |
| 2.4. Прогнозирование как процесс восстановления полного образа по его фрагменту | 65 |
| 2.5. Сознание, подсознание, сверхсознание | 68 |
| 2.5.1. Язык как сетевая структура со свойствами «тесного мира». Сетевые свойства языка. | 69 |
| 2.5.2. Язык и сознание. Закон Ципфа | 71 |
| 2.6. Сон и бодрствование | 76 |
| 2.6.1. Гипноз | 78 |
| 2.7. Информация и творческий процесс | 79 |
| 2.7.1. Мышление и распознавание образов | 83 |
| ГЛАВА 3. ИСКУССТВО И МОЗГ | 85 |
| 3.1. Для чего нужно искусство? | 85 |
| 3.2. Для чего нужна музыка? | 92 |
| 3.2.1. Музыка и управление динамическим хаосом мозга | 95 |
| 3.2.2. Нейросетевая модель музыкального лада | 96 |
| 3.2.3. Музыка и инстинктивное поведение | 102 |
| 3.2.4. Почему мажорный лад вызывает радость, а минорный лад — грусть? | 103 |
| 3.2.5. О функции музыкального ритма | 104 |
| Список литературы | 105 |

Введение

Эволюция материи с момента возникновения Вселенной прошла до-биологическую и биологическую стадии, и сейчас мы находимся на этапе социальной самоорганизации. Высшим достижением биологической эволюции, несомненно, является мозг человека. Науке удалось сформулировать законы, управляющие процессами в неживой природе, и сейчас она близка к разгадке тайны возникновения Вселенной. Что же касается законов живой природы, принципов функционирования мозга и связанных с ними социальными процессами, то результаты здесь значительно скромнее.

Одним из важнейших научных достижений последнего времени стало понимание роли неустойчивости в эволюции материи. Только сравнительно недавно стало ясно, что все новое в мире возникает в результате бифуркаций, а основной причиной самоорганизации материи на любом уровне (неживой природы, биологической, социальной) являются неустойчивые, критические состояния. Благодаря использованию в полном объеме свойств понятия неустойчивости в современном научном мировоззрении, начинает исчезать пропасть между естественными и гуманитарными науками (или между «двумя культурами» по Ч. Сноу) и, как выразился И. Пригожин, появилась возможность включения человека в природу.

Физика и вся наука в целом со времен Галилея, Ньютона и Лейбница во многом игнорировали неустойчивость, иногда упоминая о ней лишь как о любопытном курьезе или даже рассматривая как нечто противоестественное. При этом часто подразумевалось, что соответствующее явление недоступно формальному анализу или что его вообще следует исключить из подлинно научного описания реальности, поскольку одно из важнейших свойств неустойчивого состояния — его непредсказуемое поведение.

В самом деле, мы не в состоянии предсказать, в какую сторону упадет вертикально стоящий стержень. Можно сказать также, что в неустойчивых явлениях не выполняется один из основных принципов естествознания — принцип воспроизводимости научных результатов.

Этот принцип означает, что научный результат является достоверным, если он повторяется при одних и тех же условиях. Однако мы не можем воспроизвести направление падения стержня при условии его нахождения в строго вертикальном положении — здесь все решают флуктуации.

Напротив, изучение устойчивых процессов и состояний стало основой формирования классического детерминистического мышления не только в физике, но и в биологических и гуманитарных науках (включая психологию и другие науки о мозге), поскольку достижения механики и физики в изучении устойчивых явлений были весьма впечатляющими. Согласно детерминистическому мировоззрению, все события и процессы в принципе можно моделировать и предсказывать с любой точностью. Предполагалось, что явления, которые мы не в состоянии предсказать, обусловлены теми приближениями, которые мы вносим в наше описание природы.

Примерно с середины XX века в работах И. Р. Пригожина, Г. Хакена и ряда других ученых в рамках физических и физико-химических исследований стала формироваться новая научная парадигма, связанная с изучением нелинейных систем и процессов как простых, так и сложных, вдали от термодинамического равновесия. В последнем случае возникают когерентные структуры, охватывающие миллионы частиц, благодаря чему создаются условия для возникновения жизни, биологической эволюции, появления человека. В этих же исследованиях было выяснено, что в системах, где есть неустойчивость, даже очень маленькие различия в начальных условиях приводят к очень большим различиям в конечных результатах. Небольшое возмущение или ошибка ведут к большим последствиям, и точное предсказание поведения таких систем на больших временных интервалах становится невозможным.

Таким образом, детерминистическая парадигма, господствовавшая в науке вплоть до последнего времени, может быть неверна в нелинейных системах, где есть неустойчивость. Однако фундаментальным свойством биологических, психических и социальных систем является именно их нахождение в неустойчивом, критическом состоянии. Известный физик Я. И. Френкель основное различие между неживой и живой природы сформулировал следующим образом:

«Нормальное состояние всякой мертвой системы есть состояние устойчивого равновесия, в то время как нормальное состояние всякой живой системы, с какой бы точки зрения она не рассматривалась (механической или химической), есть состояние неустойчивого равновесия, в поддержании которого и заключается жизнь».

Науки о мозге долгое время находились под влиянием традиционной для всей науки XIX и первой половины XX веков парадигмы устойчивых состояний и детерминизма. Мозг в традиционной психологии и нейрофизиологии рассматривается как сложная система в равновесном, устойчивом состоянии. В многочисленных психологических теориях и учениях отсутствует понятие неустойчивости, а понятия равновесия и устойчивости являются синонимами. Но даже в рамках традиционной научной парадигмы в изучении высшей нервной деятельности сделано очень многое: сейчас во многом понятны конкретные механизмы функционирования нейронов, законы проведения нервного импульса, сформировались такие важные понятия, как безусловный и условный рефлекс и т. д. При этом в психологии и других науках о мозге существует большое число качественных теорий, не поддающихся экспериментальной проверке, а сама методология эксперимента в психологии требует нового осмысления.

Ясно, что в рамках традиционного детерминистического мировоззрения, основанного на изучении устойчивых явлений и процессов, не могли быть сформулированы принципы работы мозга. С появлением теории детерминированного хаоса в середине 1980-х годов у некоторых психологов появилась надежда, что достаточно применить соответствующий математический аппарат к имеющимся в психологии многочисленным учениям о сознании, мышлении, восприятии, памяти и т. д., и фундаментальная теория высших психических функций будет сформирована. Известный американский нейрофизиолог Уолтер Фриман (Walter Freeman) образно сравнил теорию детерминированного хаоса с принцем, который должен поцеловать спящую красавицу психологию. Однако опыт прошедшего времени показал, что эти ожидания оправдались лишь в очень небольшой степени, а подлинное приращение научного знания в этой области идет по пути приложения физических идей и физических методов.

Что касается другого важного направления в исследовании мозга — традиционного экспериментального, нейрофизиологического направления, то, несмотря на огромную важность и непреходящую ценность полученного эмпирического материала, принципов функционирования мозга также сформулировано не было.

Ситуацию здесь можно сравнить со следующей. Допустим, человек, незнакомый с законами электромагнитной теории, захотел узнать, как работает ламповый радиоприемник. Он открыл заднюю стенку этого радиоприемника, описал все радиодетали, начертил схему их соединений между собой. Можно ли после этого утверждать, что он понял, как

работает радиоприемник, если этот человек не знает о существовании и свойствах электромагнитных волн, принципов работы колебательного контура и усилителя, не знаком с явлением резонанса и т. д.? Как мы знаем, после ламповых появились радиоприемники на транзисторах, на интегральных схемах, но принципы их работы остались неизменными.

Нейрофизиологи сформулировали закон проведения нервного импульса по аксонам, идентифицировали зрительную и слуховую зоны, построили карту проекций таламических ядер на кору больших полушарий и т. д. Современное состояние наук о мозге коротко можно охарактеризовать так: много знаем — мало понимаем. Накопленные здесь экспериментальные данные можно сравнить с кирпичиками, из которых выстроено научное мировоззрение. Однако из одних и тех же кирпичей можно построить и неказистое здание, и прекрасный дворец — все определяется архитектурным планом. Подлинно научное знание, помимо надежных экспериментальных данных, нуждается еще и в адекватной научной теории. Как показывает вся история науки, ее развитие всегда есть результат совместных достижений теории и эксперимента. Только в последнее время была осознана, простая в общем-то, мысль: свойства процессов и явлений на любом уровне организации материи есть одновременно и конечный результат предшествующей эволюции и сами принципы этой эволюционной самоорганизации. Поскольку мозг человека есть финал биологической эволюции, то совершенно естественно попытаться сформулировать законы функционирования мозга на основе тех фундаментальных принципов самоорганизации, которые изучают в синергетике. Сформулированные ниже принципы работы мозга имеют во многом физическое содержание, поскольку сама синергетика возникла из физики, главным образом из теории фазовых переходов и теории нелинейных колебаний.

Исследования в области синергетики высшей нервной деятельности позволяют сформулировать следующие принципы работы мозга человека.

Первый принцип: Мозг человека функционирует вблизи критического состояния. Чрезвычайная чувствительность нашего мозга к малейшим изменениям, как внешних стимулов, так и внутренних психических процессов, указывает на то, что мозг как сложная система функционирует вблизи бифуркационного состояния. Исследования показывают, что такие явления, как сознание и подсознание (неосознаваемое), а также творчество, синестезия, нейропластичность, синхронизация как механизм интегративной функции мозга, восприятие неоднозначных образов и т. д. связаны с феноменологией критических явлений. Важность этого

принципа для понимания работы мозга можно сравнить с формулировкой Галилеем принципа инерции в физике, который сменил господствовавшее до этого принцип Аристотеля — «тело движется с постоянной скоростью, пока к нему приложена сила». В науках о мозге принцип неустойчивости сменил господствовавшее до него представление традиционных наук о высшей нервной деятельности — «все процессы в мозге стремятся к устойчивому состоянию».

Второй принцип: Функция распознавания образов. Функция распознавания — фундаментальное свойство живой природы. Примером может служить распознавание иммунной системой инородных объектов. Наиболее распространенная в синергетике модель распознавания образов, предложенная американским физиком Джоном Хопфилдом (John Hopfield), обладает важным свойством мультистабильности, что делает эту модель согласованной со сформулированным выше принципом критического состояния, вблизи которого функционирует мозг.

Принципиально важной особенностью распознавания образов нейронной сетью является способность восстановления образа по редуцированным, неполным или искаженным данным. Например, к распознаванию может быть предъявлено сильно упрощенное изображение (например, переданное лишь несколькими основными линиями лицо или фигура) или даже неполное изображение (часть лица, часть фигуры и т. п.). Тем не менее, нейронная сеть способна по этим неполным данным восстановить полный ключевой образ, хранящийся в памяти. Условный рефлекс, способность прогнозирования будущих событий также можно описать как процесс восстановления полного образа по его фрагменту.

Третий принцип: Хаотическая динамика магнитоэлектрической активности мозга. Исследования последнего времени показали, что электроэнцефалограммы (ЭЭГ) животных и человека, а также магнитные поля, генерируемые в межнейронных тканях мозга, представляют собой детерминированные хаотические процессы с небольшим числом степеней свободы, что указывает на высокую степень самоорганизации соответствующих процессов.

Помимо того, что теория самоорганизации дала возможность сформулировать ряд фундаментальных принципов работы мозга, она позволила по-новому взглянуть на роль хорошо известных и детально изученных классической психологией явлений. Так, например, явление мультистабильности восприятия при распознавании неоднозначных образов считается в традиционной психологии неким научным курьезом. В большинстве университетских курсов по психологии это явление даже не упоминается. Только сравнительно недавно, в рамках исследований по

проблемам самоорганизации в когнитивных процессах, выяснилась фундаментальная роль явления мультистабильности восприятия неоднозначных образов в деятельности мозга.

Традиционные исследования рассматривают функции мозга как строго локализованные, осуществляющиеся на уровне индивидуальных нейронов, в то время как в синергетическом подходе все основные функции мозга (память, распознавание образов и т. д.) считаются распределенными среди огромного числа взаимосвязанных нейронов.

Наконец, еще одно принципиальное отличие — в концепции обработки информации мозгом. Традиционные науки о мозге отдают предпочтение концепции последовательной обработки информации, в то время как синергетика мозга базируется на идее параллельной обработки.

Эта книга не претендует на то, чтобы охватить все аспекты работы мозга. Скорее, это ряд очерков, посвященных анализу некоторых проблем функционирования мозга на основе принципов синергетики. Автор разделяет сформулированный Карлом Поппером принцип: в естественных науках теорию невозможно доказать — ее можно только опровергнуть. Многие сформулированные в этой книге утверждения относятся к числу «правдоподобных рассуждений» (по выражению Поля), и вполне возможно, что некоторые из них окажутся неверными. *Великая трагедия науки — убийство красивой теории безобразным фактом.* В этой формулировке драматического характера развития науки, принадлежащей Т. Хаксли — соратнику Ч. Дарвина, несомненно, присутствует изрядная доля иронии.

ГЛАВА 1

СИНЕРГЕТИКА И ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МОЗГА

1.1. Элементы теории критических явлений

Теория самоорганизации изучает наиболее общие закономерности возникновения спонтанных упорядоченных структур в результате развития неустойчивых процессов. Процессы самоорганизации происходят в термодинамически неравновесных условиях с подводом извне потоков вещества и энергии, в них участвует большое число элементов (атомов, молекул, более крупных частиц). Математическое описание процессов самоорганизации удается осуществить единым образом в виде системы нелинейных обыкновенных дифференцированных уравнений достаточно общего вида. Обычно среди огромного числа переменных в этой системе находится одна наиболее неустойчивая. Анализ поведения таких систем показывает, что эта неустойчивая переменная подчиняет себе все остальные переменные, которые по этой причине вообще могут быть исключены из рассмотрения. Таким образом, поведение всей самоорганизующейся системы состоящей из огромного числа компонентов, будет определяться поведением лишь одной неустойчивой переменной, которая получила название **параметра порядка**. Само же нелинейное дифференциальное уравнение, получающееся после исключения стабильных переменных и определяющее все свойства параметра порядка, стало называться уравнением параметра порядка. Определяющая роль наиболее неустойчивой переменной в процессах самоорганизации известна как **принцип подчинения**.

Использование параметра порядка и принципа подчинения в настоящее время становится универсальным методом описания систем со многими степенями свободы вблизи точек неустойчивости. Этот метод не только описывает процесс упорядочения, но и свойства конечного упорядоченного состояния. Более того, правильный выбор параметра порядка для систем разной физической природы позволяет осуществить универсальное, однотипное описание.

Элементарный процесс самоорганизации — процесс перехода вещества из одного состояния в другое, или фазовый переход. Любые вещества при изменении температуры, давления или других внешних параметров переходят из одной фазы (состояния) в другую. Для фазового перехода «газ — жидкость» параметром порядка является плотность вещества. Для ферромагнитного железа параметром порядка служит его намагниченность. Новая фаза возникает либо в виде зародышей в старой фазе (например, пузырьков пара при переходе воды в пар), которая постепенно увеличивается в размерах, либо сразу по всему объему, заменяя старую фазу. В первом случае переход из одной фазы в другую называется фазовым переходом первого рода. Когда фазовый переход протекает по второму сценарию, то говорят о фазовых переходах второго рода. Точка, где происходит фазовый переход второго рода, называется **критической точкой**.

В качестве примера рассмотрим фазовый переход диамагнитного вещества в ферромагнитное состояние. Явление ферромагнетизма связано с упорядочением спинов электронов атомов кристаллов. Между спинами существует особое обменное взаимодействие, которое выстраивает их параллельно друг другу. Когда температура кристалла выше критической температуры T_C тепловое движение достаточно велико и препятствует выстраиванию спинов в одном направлении, вследствие чего вещество находится в диамагнитном состоянии. При понижении температуры до значений $T < T_C$ обменное взаимодействие уже превалирует над тепловыми флуктуациями, и кристалл переходит в ферромагнитную фазу.

Наряду с равновесными фазовыми переходами, уравнения параметра порядка могут описывать и неравновесные фазовые переходы в системах, далеких от термодинамического равновесия: лазерах, химических средах, живых организмах и т. д. При этом обнаружено большое количество аналогий между неравновесными и равновесными фазовыми переходами. В то же время неравновесные переходы отличаются большим разнообразием в поведении — в них возникают колебания, пространственные структуры, хаос.

В дальнейшем мы будем часто пользоваться моделью фазового перехода Гинзбурга–Ландау. Потенциальная функция этой модели

$$V(x, a) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2,$$

где x — параметр порядка (намагниченность в случае ферромагнетика), a — управляющий параметр (например, температура), имеет один мини-

мум при $a \geq 0$ и два минимума при $a < 0$. Фазовый переход происходит при переходе параметра a через $a = 0$. При изменении управляющего параметра a около нуля имеет место промежуточная ситуация, когда у потенциальной функции существует только один минимум, но дно у этого минимума широкое и плоское. Такое состояние и есть **критическое состояние системы**. В таких условиях система очень чувствительна к любым воздействиям. Резкий рост интенсивности флуктуаций вблизи критического состояния называется **критическими флуктуациями**.

При фазовом переходе в ферромагнитное состояние намагниченность возникает спонтанно сразу во всем объеме образца, поскольку по мере приближения к T_c между спинами формируется некое эффективное взаимодействие, которое позволяет им чувствовать взаимную ориентацию на огромных по сравнению с межатомными масштабами (а значит с радиусом действия обменных сил) расстояниях. Это означает, что фазовый переход второго рода представляет собой кооперативное, коллективное явление. Таким образом, физическая система в критическом состоянии неоднозначна, поскольку невозможно предсказать, в какое из двух состояний перейдет система под влиянием флуктуаций.

В 1966 г. Л. Каданов (Leo Kadanoff) выдвинул гипотезу масштабной инвариантности (фрактальности) флуктуаций в критической точке. Корреляционная функция C_r в окрестности критической точки спадает очень быстро по экспоненциальному закону $C_r = \exp(-r/\xi)$, где ξ называется корреляционной длиной и служит тем характерным размером, за пределами которого корреляционная функция становится очень малой. В самой критической точке экспоненциальный закон спада корреляционной функции сменяется на значительно более медленный степенной закон в виде $C_r = B/r^\eta$, где $\eta > 0$ называется критической экспонентой. Если корреляции спадают по этому закону, то система не имеет характерного масштаба (scale free).

Итак, вблизи критических точек всегда наблюдается резкое усиление флуктуаций, причем эти флуктуации имеют не только большую амплитуду, но и простираются на большие расстояния. Именно благодаря критическим флуктуациям происходит переход к новым структурам и новым состояниям. Пригожин назвал такой переход «порядок через флуктуации». Поскольку возвращающая сила у потенциала вблизи минимума чрезвычайно мала, любая частичка, находящаяся в таком потенциальном поле, релаксирует в свое равновесное состояние очень медленно. Время τ релаксации системы вблизи критической точки в состоянии равновесия равно $\tau \approx 1/(T - T_c)$, где T_c — критическая температура. Ес-

ли $T \rightarrow T_c$, то $\tau \rightarrow \infty$. Это явление получило название **критического замедления**. Важно иметь в виду, эти законы поведения в критической точке универсальны и практически не зависят от закона взаимодействия между элементами (атомами, молекулами, более сложными образованиями) системы. Многочисленные экспериментальные данные действительно подтверждают, что в критической точке самые разнообразные материалы (ферромагнетики и антиферромагнетики, обычные жидкости и смеси, сверхтекучий гелий и сверхпроводящие сплавы и т. п.) ведут себя одинаково. Можно ожидать, что и в других, в том числе в нефизических сложных системах (биологических, нервно-психических), также будут наблюдаться рассмотренные выше качественные особенности поведения в критической точке и вблизи нее.

1.1.1. Самоорганизованная критичность

В описанном выше сценарии самоорганизации выход на критическое состояние системы достигался за счет определенной настройки управляющих параметров. Например, критическое состояние при фазовых переходах достигается при определенных соотношениях между температурой и давлением. Существует, однако, класс сложных систем с большим числом степеней свободы, которые выходят на критический режим по самой своей природе, в результате присущих этим системам внутренних тенденций эволюции. Критические состояния таких систем не требуют точной настройки внешних управляющих параметров и по сути дела обладают свойством самоподдержки.

Физической моделью явления самоорганизованной критичности является куча песка. Если сверху на ровную горизонтальную поверхность тонкой струйкой будут сыпаться песчинки, то на горизонтальной поверхности постепенно будет расти песчаный холм. Песчинки, падающие сверху на склон холма, будут оставаться в том месте, куда они упали, до тех пор, пока крутизна не достигнет определенного критического значения. Выше некоторого порогового значения угла склона холма песчинки будут скатываться вниз, увлекая за собой другие песчинки на своем пути и образуя сход песчаных лавин различных размеров. Достигнув этого критического значения крутизны склона, песчаный холм уже не будут расти в высоту, а все добавляемые песчинки будут скатываться вниз.

Такой сценарий достижения критического состояния получил название самоорганизованной критичности. Как показывают исследования,

такие системы имеют стандартный спектр флуктуаций. Например, размеры лавин в модели «куча песка» распределены по закону:

$$P = \frac{A}{I^\gamma},$$

где P — вероятность схода лавины, размер которой I , а A и $\gamma > 1$ — константы. Этому закону подчиняются интенсивности землетрясений, размеры наводнений и многие другие природные процессы. Это распределение имеет самые разнообразные названия: Мандельброт назвал его фрактальным распределением, в физике оно известно как «фликкершум» и « $1/f$ -распределение», в лингвистике и социологии его называют распределением Ципфа – Парето.

В последнее время в теории сложных систем сформировалось понятие о состоянии «на границе хаоса и порядка». Системы в таком состоянии не являются ни в полной мере регулярными, предсказуемыми, ни в полной степени хаотическим, непредсказуемыми. Как показывают исследования, такие состояния аналогичны критическим состояниям с аналогичными свойствами (степенной закон распределения флуктуаций, дальние корреляции и т. д.) и обеспечивают сложным системам оптимальные условия для адаптации.

Основные свойства степенного (фрактального) распределения заключаются в явлениях концентрации и рассеяния.

Пример концентрации — накопление статей на небольшом множестве высокопродуктивных ученых, то есть наличие малой группы научных работников, пишущих основную массу статей. Рассеяние заключается в распределении оставшейся массы печатной продукции по большому числу малопродуктивных ученых.

Явления концентрации и рассеяния поистине универсальны в социальных системах: это рост населения городов-гигантов и рост числа малых городов, концентрация капитала в небольшом числе крупных фирм и рост числа малых фирм в рыночной экономике, концентрация основного содержания текста в малом числе слов и резкое возрастание числа слов при расширении этого содержания, распределение филателистов по величине и стоимости их коллекций и т. д.

Этому феномену американский социолог Роберт Мертон дал название «эффект Матфея», имея в виду библейское изречение «имущему дается...». Существуют и другие афористические выражения этого явления: «успех порождает успех», «ресурс идет к ресурсу», «деньги — к деньгам» и т. д.

В нелинейных системах со многими степенями свободы, к которым принадлежит и куча песка, помимо докритического и критического состояния, возможна также реализация надкритического состояния, при котором угол наклона холма будет превышать критическое значение. Такое состояние получится, если к куче песка в критическом состоянии осторожно добавлять по одной песчинке. В фазовых переходах надкритическому состоянию соответствуют переохлажденная жидкость или переохлажденный пар. Надкритическое состояние всегда нестабильно, кратковременно и в конце концов переходит в устойчивое. Далее будет показано, что и в нейро-психологических состояниях возможна реализация докритических, критических и надкритических состояний.

1.1.2. Синхронизация как критическое явление

Описанные выше сценарии возникновения порядка из хаоса (самоорганизации) относятся к системам с большим числом элементов ($> 10^{10}$). В этом разделе мы опишем явление синхронизации в сети связанных осцилляторов, которое можно рассматривать как частный случай самоорганизации. В этом случае можно говорить о самоорганизации системы, состоящей из любого числа элементов (осцилляторов), — например, состоящей всего из двух элементов (двух связанных осцилляторов). Причина этого понятна — сама осцилляция уже представляет собой упорядоченный, организованный процесс. Синхронизацию также можно рассматривать как один из сценариев возникновения порядка из хаоса.

Синхронизацией называется подстройка ритмов автоколебательных систем за счет слабого взаимодействия между ними.

В простейшем случае две автоколебательные системы с изначально различными частотами и независимыми фазами, будучи слабо связанными, подстраивают свои ритмы и начинают осциллировать на одной частоте. При этом возникает определенное устойчивое соотношение между фазами этих двух осцилляторов.

Важно подчеркнуть, что выравнивание частот выполняется в некотором диапазоне изначальной расстройки по частоте. Синхронизация называется взаимной, когда два или несколько осцилляторов в равной степени воздействуют друг на друга и взаимно подстраивают свои ритмы.

Другой важный вид синхронизации — это синхронизация внешней силой. Примером является подстройка организмами ритма «бодрствование — сон» к внешнему ритму освещенности, связанному с вращением

Земли. В этом случае воздействие одностороннее — ни человек, ни животное не влияют на вращение Земли.

Явление синхронизации было открыто в 1665 году великим голландским физиком Христианом Гюйгенсом. Он обнаружил, что маятники двух часов после того, как их повесят рядом на одну стену, начинают спустя некоторое время качаться полностью синхронно. Когда эти часы помещены на противоположные стены комнаты, явления синхронизации не наблюдается. Очевидно, что синхронизацию колебаний маятников этих часов можно объяснить их влиянием друг на друга через невидимую на глаз вибрацию стены, на которой они висят.

Синхронизация представляет собой частный случай эффекта, называемого «захватом фазы» (phase locking). Когда два одинаковых осциллятора связаны друг с другом, есть две возможности их совместного движения: когда разность фаз их колебаний равна нулю (синхронизация) и когда разность фаз равна 180 градусам (антисинхронизация). Если сеть связанных осцилляторов содержит больше двух осцилляторов то число возможностей увеличивается. В живой природе и в искусстве чаще всего мы имеем дело с большим числом связанных осцилляторов и здесь обычно реализуется именно синхронный тип поведения.

Синхронизация играет важнейшую роль в пространственно-временной организации одно- и многоклеточных организмов. Синхронно делятся клетки на ранних стадиях эмбрионального развития. Волокна сердечной мышцы также сокращаются синхронно. Синхронизация наблюдается в полете стай птиц и движении косяков рыб: взмахи крыльев и плавников происходят синхронно.

Впечатляющим примером явления синхронизации в живой природе может служить согласованно вспыхивающее свечение многих сотен тысяч светлячков, которые обычно собираются в огромных количествах на берегах рек в Южной Азии.

Математический анализ поведения сети большого числа связанных осцилляторов показывает, что легче всего режим синхронизации наступает в том случае, когда на каждый отдельный осциллятор влияет уже сформировавшийся ритм окружающих его осцилляторов. В случае светлячков это условие, видимо, удовлетворяется, и каждый светлячок подстраивается под уже сформировавшийся ритм своих соседей. Очевидно, эти условия выполняются во многих случаях синхронного поведения и в социальной системе: идущем в ногу строе солдат, хоровом пении, танцах, овациях в концертном зале, скандировании и т. д.

Когда имеется небольшой разброс частот в сети связанных осцилляторов, процесс их взаимной синхронизации очень напоминает фазо-

вый переход, в котором роль температуры играет ширина полосы частот осцилляторов в сети. В предложенной Курамото (Kuramoto) модели коллективной синхронизации каждый i -тый осциллятор описывается фазой θ_i , а сам процесс синхронизация описывается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{i=1}^N \sin(\theta_i - \theta_i), \quad i = 1, \dots, N.$$

Параметр K/N определяет силу связи между осцилляторами. Собственные частоты ω_i осцилляторов подчиняются распределению Лоренца:

$$g(\omega) = \frac{\gamma}{\pi[\gamma^2 + (\omega - \omega_0)^2]},$$

ширина которого равна γ , а среднее значение частоты равно ω_0 .

В качестве параметра порядка r вводится мера синхронизации системы:

$$r(t) = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j(t)} \right|.$$

Если все частоты различны, то в каждый момент времени все фазы равномерно распределены на интервале $[0, 2\pi]$ и параметр порядка равен нулю. Если же несколько осцилляторов в ансамбле синхронизируются на некоторой частоте, то их фазы складываются и возникает ненулевой параметр порядка. В пределе $N \rightarrow \infty$ и $t \rightarrow \infty$ для параметра порядка получаются следующие значения: $r = 0$, если $K < K_c$ (полная десинхронизация), $r = \sqrt{1 - (K_c/K)}$, если $K \geq K_c$ и $K_c = 2\gamma$. То есть критический индекс для параметра порядка равен $1/2$.

Таким образом, система связанных осцилляторов десинхронизирована, пока сила связи между осцилляторами не превышает критического значения, равного удвоенной ширине разброса частот. После этого в системе связанных осцилляторов появляется «островок синхронизации», размер которого растет по мере роста силы связи между осцилляторами. В предельном случае бесконечно большой силы связи все осцилляторы будут колебаться синхронно.

Эта глубокая связь между явлением синхронизации и феноменологией критических состояний — хорошая иллюстрация того, как естественнонаучные методы выявляют скрытое для обыденного сознания

единство природы. В заключение этого раздела, посвященного явлению синхронизации, стоит подчеркнуть еще одно важное обстоятельство. Мы рассматривали феномен синхронизации только применительно к периодическим осцилляторам. На самом деле природа этого явления более фундаментальна и не ограничивается только периодическими колебательными системами. Например, движения участников соревнований танцевальных пар в фигурном катании обычно синхронны и согласованы, но это отнюдь не повторяющиеся периодические движения. Это обстоятельство делает возможным синхронизацию странных аттракторов и использование этого явления в передаче сообщений.

1.1.3. Сети

Взаимодействие элементов между собой во многих биологических и социальных системах удобно представлять в виде сетей, узлами которых являются сами элементы, а связи между элементами изображать соответствующими отрезками (ребрами). В математике такие сети получили название графов.

Примерами сетей могут служить пищевые связи в биоценозах, где узлами являются представители животного и растительного мира. Между узлами в пищевой сети существует связь, если животное, соответствующее данному узлу, питается представителем животного или растительного мира, которому соответствует другой узел сети.

Геном человека представляет собой сеть из приблизительно 30 тыс. генов. Мозг животных и человека является большой сетью связанных между собой нейронов.

В социальной системе любой город также можно представить некоторым графом (сетью), ребрами которого являются улицы города, соединяющие между собой те или иные объекты (узлы). Любое сообщество людей можно изобразить в виде сети, узлы которой соединяются отрезком, если соответствующие люди знакомы друг с другом.

1.1.3.1. Феномен «тесного мира»

В 1967 году социолог из Гарвардского университета С. Милграм (Stanley Milgram) сделал удивившее многих заявление: каждого человека на земном шаре можно связать с любым другим человеком цепочкой из шести знакомых. Таким образом, несмотря на то, что на Земле живет более шести миллиардов людей, мир действительно тесен («small

world»). Это свойство социальной коммуникации получило еще название «шесть ступеней разделения» — по названию бродвейской пьесы, а затем и фильма («Six degrees of separation»). Героиня этого фильма говорит:

Я где-то читала, что каждый на нашей планете отделен от другого человека только шестью людьми. Шесть ступеней отделения. [...] Между нами и любым другим на планете. Президентом Соединенных Штатов и гондольером в Венеции. [...] Не обязательно известные имена. С любым. Можно найти ровно шесть людей, чтобы установить связь. Туземцем в джунглях и эскимосом. [...] Каждая персона как новая дверь, распахнутая в остальной мир.

Столь неожиданное на первый взгляд утверждение С. Мильграма не будет казаться неожиданным, если представить, что человек имеет, скажем, сотню знакомых, а каждый из этих знакомых имеет также по сотне знакомых. В этом случае, при одной степени разделения можно связаться с одной сотней людей, а при двух степенях разделения — уже с десятью тысячами. При трех степенях разделения можно установит связь с одним миллионом, при четырех — со ста миллионами и уже при шести степенях я могу легко связать себя со всем населением планеты. Социологические исследования показывают, однако, что люди сгруппированы в малые кластеры друзей, коллег и знакомых, и эти кластеры обычно слабо связаны с другими аналогичными кластерами. В социологии это называется кластеризацией. Поэтому чем лучше ваши друзья знают друг друга, тем в меньшей степени вы можете рассчитывать на то, что они помогут вам связаться с незнакомым вам человеком.

В середине 1990-х годов С. Строгатц (Steven Strogatz) и его аспирант Д. Воттс (Duncan Watts) из Корнельского университета в Итаке (штат Нью-Йорк) решили изучить сети, которые обладают свойством «тесного мира». Компьютерное моделирование различных типов сетей показало, что свойствами «тесного мира» обладают сети с высокой степенью кластеризации (точное определение этого понятия будет дано ниже) и малой средней длиной пути между узлами.

Случайные сети обладают малой средней длиной пути, но и малой степенью кластеризации. Регулярные, упорядоченные сети типа кристаллических решеток, напротив, имеют высокую степень кластеризации и большую среднюю длину пути между узлами.

Таким образом, свойством «тесного мира» обладают сети со структурой, промежуточной между высокой степенью упорядочения и случайности, на границе между порядком и хаосом. Исследование некоторых реальных сетей (таких, например, как электрические сети севера Со-

единенных Штатов и Канады, нейронная сеть червя, Интернет и многие другие) показали, что эти сети имеют высокую степень кластеризации и малую среднюю длину пути между узлами и, следовательно, обладают свойством «тесного мира».

1.1.4. Безмасштабные сети

В 1999 году физик из университета Нотр Дам (США) Л. Барабаши (Laszlo Barabasi) и его аспирантка Р. Альберт (Reka Albert) изучали свойства реальных сетей с несколько иной точки зрения. Если Строгатц и Воттс в своем исследовании сетей исходили из феномена «тесного мира», то Барабаши и Альберт решили исследовать закон распределения узлов некоторых реальных сетей по числу связей. Результат оказался неожиданным.

Вместо ожидавшегося распределения числа k связей по закону $P(k)$ Пуассона, который имеет строгий максимум около среднего значения $k = \langle k \rangle$, для многих реальных сетей (например, таких, как метаболические сети и белковые взаимодействия в клетках, структура авиационных сообщений в США, структура Интернет и его виртуального двойника World Wide Web и т. д.) такого среднего значения не существует, а соответствующее вероятностное распределение подчиняется свойственному всем критическим состояниям степенному закону $P(k) = k^{-\gamma}$.

Таким образом, во многих реальных сетях небольшое число узлов содержит очень большое число связей, а огромное число узлов содержит лишь несколько связей.

Общим свойством природных и социальных сетей является их негомогенная, кластерная структура. Кластер образуют, например, клубы по интересам, научные семинары, круг друзей и общих знакомых, в которых каждый знает каждого. Это свойство допускает количественную характеристику в виде коэффициента кластеризации.

Пусть i -тый узел сети содержит k_i число связей, которые соединяют этот узел с k_i другими узлами. Общее максимальное число связей, которое может существовать между этими узлами, равно $k_i(k_i - 1)/2$.

Однако, если: реальное число связей между этими узлами равно E_i , то коэффициент кластеризации C_i определяется следующим образом: $C_i = 2E_i/k_i(k_i - 1)$.

В реальных сетях коэффициент кластеризации обычно на несколько порядков выше, чем в случайных графах такого же размера.

Барабаши и Альберт, которые назвали такие сети безмасштабными (scale free networks), предложили также простую и элегантную модель

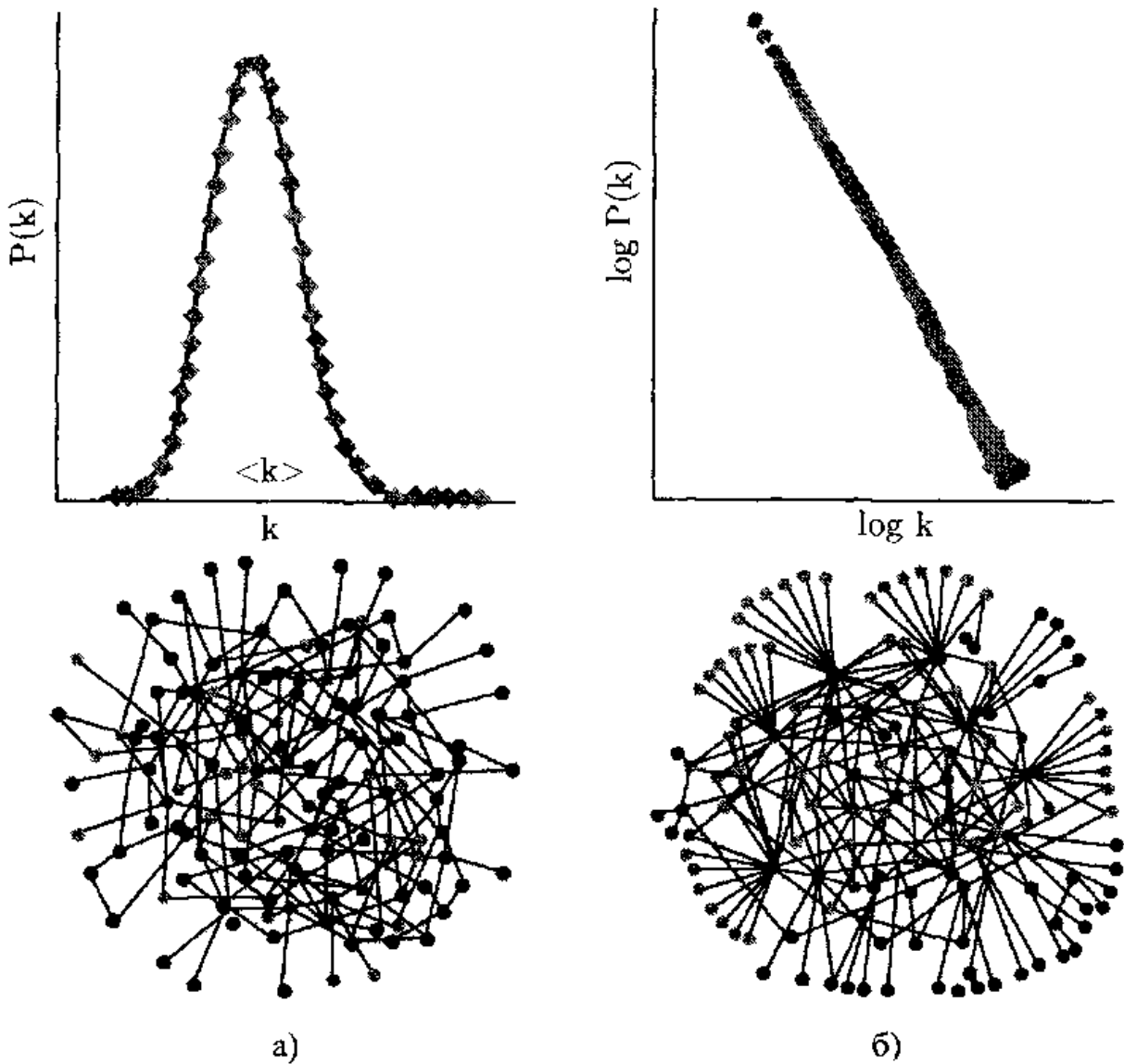


Рис. 1. Случайный граф: а) безмасштабная и б) самоорганизующаяся сети.

возникновения и эволюции таких сетей. Они показали, что для возникновения безмасштабных сетей необходимы два условия:

1. *Рост*. Начиная с небольшого числа m_0 узлов, на каждом временном шаге добавляется один новый узел с m ($m \leq m_0$) связями, которые соединяют этот новый узел с m различными уже существующими узлами.

2. *Предпочтительное присоединение (preferential attachment)*. Когда выбираются узлы, к которым присоединяется новый узел, предполагается, что вероятность Π , с которой новый узел будет соединяться с уже существующим узлом i , зависит от числа связей k_i , которыми этот узел уже связан с другими узлами, так что $\Pi(k_i) = k_i / \sum_j k_j$.

Безмасштабные сети — это одно из проявлений феноменологии кри-

тических явлений, поскольку их структура подчиняется степенному закону, а сама топология занимает промежуточное положение между строго упорядоченной структурой кристаллического типа и случайным графом.

Исследования, проведенные в университете Нотр Дам (США), показали, что среднее число «кликов», которые необходимо сделать, чтобы перейти от одной Web-странички на любую другую, описывается формулой

$$D \sim 0.35 + 2.061 \log(N),$$

где N — число узлов в WWW.

Известно, что $N \propto 10^9$; получаем $D \sim 18 \div 19$ и, следовательно, всемирная паутина представляет собой «тесный мир».

Теорию безмасштабных самоорганизующихся сетей можно рассматривать как развитие физической теории критических состояний и развивающихся сложных систем. Как известно, в физической теории критических явлений критические индексы являются универсальными константами, в то время как в теории самоорганизующихся сетей показатель степени γ может изменяться при изменении такого параметра, как *предпочтительное присоединение*. Приведем несколько примеров безмасштабных сетей.

1.1.4.1. Нейронные сети

Была исследована очень простая ($N = 282$) нейронная сеть червя нематода *C. elegans* (собственно круглого червя). Было обнаружено, что эта сеть характеризуется довольно высокой степенью кластеризации по сравнению с такого же размера случайной сетью, однако закон распределения имеет максимум при промежуточных значениях k , после чего спадает по экспоненциальному закону.

Недавно получены свидетельства того, что функциональные связи в мозге человека образуют безмасштабные самоорганизующиеся сети.

В мозге животных и человека постоянно идут процессы самоорганизации и распада функциональных нейронно-сетевых структур. Каждая такая нейронная сеть, объединяющая нейронные ансамбли из разных отделов мозга, создается для реализации определенной функции мозга — поведенческой, когнитивной и т.п. Именно такие функциональные нейронные сети стали объектом изучения группы исследователей во

главе с Д. Чиалво (Dante Chialvo), целью которых было проверить возможность приложения идей и методов современной теории сетей (безмасштабные сети, сети «тесного мира» и т. д.) к топологии реальных нейронных структур мозга.

Используя метод магнитно-резонансного изображения, ученые измеряли активность мозга при осуществлении простого моторного действия (стук пальцем по столу) на каждом временном интервале в 2,5 секунды на протяжении 400 таких интервалов, а также при прослушивании музыкального произведения. Изучалась область мозга размером $36 \times 64 \times 64$ пространственных ячеек с размером каждой ячейки $3 \times 3,475 \times 3,475$ мм³.

Обозначим активность каждой такой ячейки x в момент времени t через $V(x, t)$. Каждые две ячейки будем считать функционально связанными между собой, если значение пространственно-временной корреляции между $r(x_1, x_2)$ ними превышает некоторый порог r_c . Само значение корреляции вычисляется по следующей формуле:

$$r(x_1, x_2) = \frac{\langle V(x_1, t)V(x_2, t) \rangle - \langle V(x_1, t) \rangle \langle V(x_2, t) \rangle}{\sigma(V(x_1))\sigma(V(x_2))},$$

где $\sigma(V(x_2)) = \langle V(x, t)^2 \rangle - \langle V(x, t) \rangle^2$, а $\langle \cdot \rangle$ означает усреднение по времени. На рисунке 2 показана типичная функциональная сеть, полученная таким методом.



Рис. 2. Функциональная сеть мозга человека при выполнении им простого моторного действия.

Эти исследования проводились с семью испытуемыми при небольших вариациях заданий. Хотя размеры функциональных сетей при раз-

ных заданиях оказывались разными, а сами сети формировались в разных областях мозга, во всех случаях функция распределения узлов по числу связей подчинялась степенному закону. Это означает, что функциональные сети мозга являются безмасштабными сетями

Именно такая структура обеспечивает фундаментальные свойства мозга — нейропластичность и устойчивость к повреждениям

1.1.4.2. Устойчивость к ошибкам и повреждениям

Для сложных систем, взаимодействия элементов которых описываются случайными графами Эрдеша–Реньи, их устойчивость к ошибкам и повреждениям может быть исследована методами теории перколяции. Эти исследования показывают, что при произвольном удалении узлов из случайного графа существует определенное критическое число, измеряемое отношением числа удаленных узлов к их общему числу в сети, при превышении которого сеть распадается на отдельные кластеры.

Для безмасштабных сетей такого критического числа не существует. Численные эксперименты показывают, что при удалении даже 80% узлов оставшиеся узлы продолжают образовывать связанный кластер. Следовательно, такие сети очень устойчивы к случайным повреждениям или внешним воздействиям. Эта устойчивость объясняется негомогенной топологической структурой. Но у них существует своеобразная «ахиллесова пята». Хорошо образованный хакер может существенно повредить Интернет или WWW, если выведет из строя один или несколько наиболее связанных узлов.

1.2. Мозг и критическое состояние

Впервые теоретические и экспериментальные обоснования гипотезы о природе работы механизмов мозга как сложной системы вблизи критического состояния, появились в работах А. Тьюринга (Alan Turing), Г. Хакена, Крюкова В. И. и др, а также в работах П. Бака (Per Bak) и С. Келсо (Scott Kelso).

П. Бак, один из создателей теории самоорганизованной критичности, приводит две основные причины, по которым мозг должен находиться в критическом состоянии. Внешний сигнал должен в принципе иметь доступ ко всем отделам мозга, ко всей информации, хранящейся в памяти, поскольку информация хранится в мозге в распределенном виде. Но это возможно лишь в критическом состоянии, в котором корреляции распространяются на дальние расстояния (явление скейлинга).

Это же свойство нейронных сетей, находящихся в критическом состоянии, можно описать следующим образом. Допустим, в сети есть некий входной нейрон (например, рецепторный нейрон зрительной системы) и на большом расстоянии от него есть некий выходной нейрон (например, мотонейрон). Нейронная сеть в целом должна обладать следующим свойством: любое изменение параметров входного нейрона, например, изменения силы его связи с ближайшими нейронами, должно оказать воздействие и на поведение выходного нейрона. То есть локальные изменения в одной части нейронной сети должны сказаться на свойствах в другой, даже наиболее удаленной области нейронной сети. Но такие дальние корреляции — уникальное свойство систем в критических состояниях.

Основным параметром, определяющим нахождение мозга в критическом состоянии, является среднее число нейронов, возбуждаемых одним нейроном в нейронной сети мозга. Если это число меньше некоторого критического значения (докритическое состояние), то информация по нейронной сети распространяться не будет. Если это число будет больше критического (надкритическое состояние), то все отделы мозга окажутся связанными между собой.

Видимо, все эти возможности реализуются в функциях мозга как сложной системе со многими степенями свободы. Критическому значению числа возбуждаемых нейронов соответствует состояние сознания. Значению, меньшему критического значения, соответствует состояние подсознания, из которого информация не может попасть в сознание и потому не может быть передана другим. Наконец, значение параметра выше критического соответствует творческому состоянию (сверхсознанию, интуиции, озарению и т. д.). Более подробно проблема природы сознания, подсознания и сверхсознания будет обсуждаться во второй главе.

В своих экспериментах Келсо регистрировал динамику магнитной активности мозга во время выполнения испытуемым сенсомоторного действия и им были обнаружены неравновесные фазовые переходы и явление критического замедления в процессе выполнения этих действий. Наличие в мозге функций для выявления во внешней среде критических состояний (например, непроизвольное внимание), а также тот факт, что человек постоянно стремится создавать критические состояния в искусстве (это будет показано ниже), спорте, азартных играх, указывает на то, что критическое состояние в мозге поддерживается извне.

1.2.1. Биохимические особенности мозга

Функционирование мозга на границе неравновесных фазовых переходов определяет некоторые его биохимические особенности. Концентрация нейромедиаторов в мозге больше, чем в других тканях. На биохимическом уровне в значительной степени определяется среднее число нейронов, возбуждаемых одним нейроном. От этого показателя зависит, будет ли мозг находиться в критическом, надкритическом или докритическом состоянии. Имеет место высокая метаболическая активность и высокая интенсивность экспрессии генов. Высокая концентрация липидов в веществе мозга объясняется высокой интенсивностью энергетического метаболизма в мозге. Мозг человека в пересчете на единицу массы потребляет в 16 раз больше энергии, чем мышечная ткань. У взрослого человека в состоянии покоя доля мозгового метаболизма составляет 20–30% всех энергетических потребностей организма, в то время как у других приматов 8–10%. В мозге имеет место также высокая чувствительность к кальциевой концентрации, который в качестве посредника запускает множество биохимических реакций.

1.2.2. Синестезия

Термин «синестезия» появился в науке около ста лет назад. Синестезией называется одновременное возникновение ощущений разной природы (модальности) при воздействии мономодального раздражителя. Сейчас различают около 50 форм синестезии. Наиболее распространенная форма — цветовые ощущения, вызванные звуками. Встречаются и очень редкие, например, ассоциация букв с мужским и женским полом. Особенно хорошо известны проявления синестезии в искусстве. Это поэтические тропы межчувственного содержания; цветовые и пространственные образы, вызываемые музыкой и. д. Явление «цветного слуха» стало основой светомузыкального направления в искусстве. К синестетическим метафорам часто прибегают в поэзии («... и гудят, как шмели, золотые глаза» — А. Вознесенский), в литературе («по мостовой порхнуло ярко-румяное кукареку» — Г. Санников). Метафора, образующая связи между образами и понятиями разной природы, — важнейшее свойство искусства. Видимо, такие межчувственные сравнения помогают человеку точнее и полнее вербализовать и передать другим свои образные психические переживания.

Наш повседневный язык насквозь синестетичен: «яркий голос», «пронзительный взгляд», «кричащие краски», «острый звук», «мато-

вый тембр», «теплый цвет», «легкая музыка», «баритон» (т. е. тяжелый звук) и т. д.

Для одних исследователей синестезия — это аномалия, даже болезнь, для других — это чудо, таинственная способность психики. В последнее время феномен синестезии объясняется взаимной активацией различных отделов мозга, которые функционально обычно не взаимодействуют. Таким образом, речь идет о возникновении дальних пространственных корреляционных взаимодействиях, характерных для всех сложных систем в критическом и надкритическом состоянии. Такие дальние корреляции возникают в мозге не только благодаря существованию реальных нейронных связей между разными отделами мозга, но и вследствие изменения химического баланса веществ мозговой ткани, ведущего к ослаблению тормозящего действия некоторых нейротрансмиттеров, ослабляющих действие одного участка мозга на другой.

Таким образом, синергетика не только качественно объясняет это явление, но и показывает, что синестезия есть следствие функционирования любого нормального мозга в критическом или надкритическом (творческом) состоянии. Среди людей творческих профессий синестезия встречается в семь раз чаще, чем среди всего населения в целом.

У синестезии, как и у любого явления, возможны различные формы аномалии и патологии. Но сам феномен синестезии есть следствие функционирования мозга в критическом и надкритическом состоянии и в той или иной степени присущ всем людям, и поэтому есть все основания полагать, что изучение синестезии поможет лучше понять природу мышления человека.

1.2.3. Нейропластичность

Вплоть до 80-х годов прошлого века считалось, что мозг взрослого неизменен. Исследования последних двух десятилетий убедительно показали, что мозг способен перестраиваться. При этом имеется в виду не только развивающийся мозг ребенка, но и мозг взрослого человека.

Наиболее впечатляюще выглядят изменения мозга у музыкантов-исполнителей. Исполнение музыкальных произведений на профессиональном уровне является одним из наиболее сложных двигательных навыков. Пианист, например, при исполнении одного из этюдов Ф. Листа, должен точно координировать производство примерно 1800 звуков в минуту. Исследования показали, что у скрипачей та часть моторной коры, которая постоянно управляет работающими пальцами одной руки, оказывается заметно большей, чем аналогичная область другой.

У взрослых людей, перенесших инсульт, у больных с нарушенной способностью к чтению путем выполнения интенсивных умственных и физических упражнений удается добиться значительных улучшений соответствующих функций за счет того, что работа поврежденной области мозга была заменена работой другой области.

Сам термин «пластичность» возник в физическом материаловедении и означает, что при нагревании вблизи точки фазового перехода «твердое состояние — жидкость» многие материалы становятся податливыми и хорошо поддаются обработке.

Нейропластичностью называют способность одной части мозга брать на себя функции другой. Эта способность мозга связана, главным образом, с пластичностью синапсов, с помощью которых нейроны связываются друг с другом посредством нейромедиаторов.

Обучение ведет к укреплению связей между нейронами, в том числе за счет образования новых связей. Такие связи объединяют нейроны в цепочки и сети, которые в конечном итоге определяют некоторое свойство мозговой активности — движение, ощущение, мысль.

Высокая пластичность синапсов, в свою очередь, объясняется их нахождением в бифуркационном состоянии — в простейшем случае это бистабильное состояние.

Как уже отмечалось выше, фундаментальное свойство критических состояний — независимость их свойств от материала и его структуры. Например, в физике показано, что в критической точке самые разнообразные материалы проявляют одни и те же свойства.

Следовательно, пластичность мозга — это просто проявление того, что он находится в критическом состоянии.

В последнее время нейрофизиологи успешно создают методики использования пластичности мозга для лечения различных заболеваний: нарушения речи, инсульта и т. д. Нейропластичность — основа обучения, и именно в детском возрасте, когда мозг ближе всего к критическому состоянию (есть основания полагать, что мозг ребенка находится в надкритическом состоянии), он наиболее хорошо обучаем.

1.2.4. Двигательная координация и стабилизация неустойчивых состояний

Многие из нас пробовали удержать в вертикальном положении на кончике пальца указку или лыжную палку.

В работах Д. Кабрера (Juan Cabrega) и Д. Милтона (John Milton) из Чикагского университета исследовался процесс стабилизации неустойчивого состояния вертикального стержня на кончике пальца.

На обоих концах стержня были закреплены маленькие зеркала, и на эти зеркала направлялись лучи света в инфракрасном диапазоне. Все движения стержня при его балансировании на кончике пальца записывались на видеокамеру, а затем анализировались. Оказалось, что флуктуации угла θ отклонения стержня от вертикали подчиняются степенному закону распределения $P \approx A/\theta^\gamma$, $\gamma = 1,5$.

Изучение механизма такой стабилизации восходит к классическим работам П. Л. Капицы по изучению устойчивости перевернутого математического маятника, точка подвеса которого колеблется в вертикальной или горизонтальной плоскостях. Например, если точка подвеса перевернутого маятника колеблется в горизонтальной плоскости с частотой γ по закону $a \cos \gamma t$, то устойчивому положению отвечает состояние с углом отклонения ϕ от вертикали: $\cos(\phi) = 2gl/a^2\gamma^2$ ($a\gamma > gl$).

Если точка подвеса маятника колеблется в вертикальной плоскости, то устойчивому состоянию отвечает строго вертикальное положение маятника.

В экспериментах Д. Кабрера и Дж. Милтона флуктуации стержня оказались слегка смещенными от строго вертикального положения, что указывает на то, что основной вклад в стабилизацию стержня на кончике пальца в вертикальном состоянии вносят движения руки в горизонтальной плоскости.

Нейрофизиологические исследования показывают, что обычно минимальное время двигательной реакции человека на соответствующий зрительный образ в процессах балансировки не бывает меньше, чем 100 миллисекунд. Д. Кабрера и Дж. Милтон обнаружили, что 98 процентов всех управляющих движений руки, поддерживающих стержень в вертикальном положении на кончике пальца, происходят быстрее этого времени. Это обстоятельство заставило авторов исследования предположить, что в процесс балансировки основной вклад вносит собственный шум нервной системы, вызывающий произвольные движения руки.

Было предложено простое уравнение, описывающее движения стержня. Исследование этого уравнения показывает, что действительно возможно неуправляемое человеком поддержание стержня в вертикальном положении за счет стохастического воздействия на нижний конец.

Можно предположить, что аналогичный механизм балансировки использует канатоходец в цирке, где стабилизирующие реакции также

должны иметь очень высокое быстродействие, которое не способна обеспечить обычная моторная реакция.

Организация движений животных и человека — это возникшая в результате биологической эволюции система стабилизации и управления неустойчивыми состояниями тела животных и человека при их перемещении в пространстве.

Вертикальное положение тела человека представляет собой неустойчивое состояние, стабилизируемое его вестибулярной системой, зрительной и соматосенсорными системами, которые управляют мускульными корректирующими движениями.

Количественные исследования закономерностей отклонения во времени центра тяжести тела человека в покое показывают, что эти отклонения представляют собой коррелированный шум с фрактальными (скейлинговыми) свойствами и, следовательно, можно сделать вывод, что вертикальная поза человека в покое представляет собой критическое состояние с соответствующим критическим спектром флуктуаций.

Несомненно, двигательная система человека гораздо более совершенна, чем двигательная система животных, поскольку обеспечивает ему более высокую точность движений и более широкий диапазон двигательной активности в процессах трудовой деятельности, спортивных соревнованиях, а также в искусстве.

Поскольку моторная система животных и человека представляет собой сложную нелинейную систему со многими степенями свободы, можно предположить, что в такой системе, аналогично тому, как это имеет место в мозге, помимо критического состояния, необходимого для адаптации в условиях бодрствования, реализуются также докритическое и надкритическое состояния. Докритическое состояние двигательной системы имеет место при осуществлении автоматических действий, например, во время ходьбы. Надкритическое состояние двигательной системы, при котором возможна мобилизация всех ресурсов организма, реализуется в состояниях аффекта или гипноза. У спортсменов это состояние наилучшей спортивной формы.

В работах Шерригтона, Бернштейна, Келсо, Хакена и многих других исследователей по проблеме координации движения человека и животных было показано существование когерентных поведенческих паттернов (образов) в электрической и магнитной активности мозга, управляемых небольшим числом параметров порядка. Эксперименты и соответствующий теоретический анализ показывают, что по мере овладения человеком способностью к стабилизации соответствующего неустойчивого

состояния все меньшее и меньшее число степеней свободы участвует в создании соответствующего двигательного паттерна.

Хореографическое искусство, некоторые виды циркового искусства (например, искусство канатоходца) есть результат многолетних тренировок по координации движений, и можно ожидать, что соответствующие двигательные паттерны также могут быть описаны небольшим числом параметров порядка.

Умение контролировать и управлять неустойчивыми состояниями — основа балетного искусства. В последнее время техника балета стала объектом изучения физиков. В этих исследованиях основное внимание пока уделяется вопросам изучения равновесных состояний, способам осуществления вращений, технике исполнения прыжков. В других видах хореографического искусства — народных, балльных и современных танцах неустойчивые элементы также широко представлены, хотя они часто носят не столь четко выраженный характер, как это имеет место в балете. Многие элементы в фигурном катании, гимнастике, акробатике насыщены неустойчивыми по своей природе состояниями.

Хореографическое искусство переводит двигательную систему человека ближе к критическому состоянию, создавая тем самым условия для более гибкого и точного управления неустойчивыми состояниями. Возможно, этот вид искусства способствует тренировке двигательной системы человека, чтобы сделать эту систему более приспособленной для трудовой, военной и повседневной деятельности. Видимо, аналогичные задачи выполняет и спортивная деятельность.

Одно из важнейших свойств живых организмов, включая человека, — это умение управлять неустойчивыми состояниями и процессами. Чувствительность неустойчивых систем к внешним воздействиям с одной стороны, облегчает задачу управления, поскольку не требует больших силовых и энергетических ресурсов, но, с другой стороны, подчас превращает сам процесс управления в подлинное искусство, поскольку для этого необходима высокая точность воздействия на управляемую систему.

1.3. Распознавание образов и модель ассоциативной памяти Дж. Хопфилда

Функция распознавания — фундаментальное свойство живой природы, которое можно обнаружить от молекулярного и клеточного уровня

(узнавание белком-ферментом молекулы субстрата, узнавание антигеном антитела в иммунной системе) до высших психических функций (узнавание человеком тональности музыкального произведения).

Основы теории распознавания образов были заложены в работах М. М. Бонгарда, И. М. Гельфанда, Дж. Хопфилда и других. В последнее время появилось большое число компьютерных систем, моделирующих функцию распознавания образов. По-видимому, наибольшее развитие моделирование распознавания образов получило в медицинской диагностике.

Г. Хакеном обнаружена глубокая аналогия между процессами распознавания образов в когнитивных процессах и динамическими процессами формообразования в природных системах.

Таблица 1.

| Образование структур | Распознавание образов |
|---|---|
| Элементы структур | Элементы образа |
| Их кооперация ведет к образованию нового качества — макроскопической структуры | Их кооперация ведет к возникновению нового качества — идентификации образа («идеи») |
| Закон кооперации элементов структуры определяется законами природы | Закон кооперации элементов образа сформировались в ходе биологической, либо социальной эволюции |
| Алгоритмы для предсказания возникающих структур определяются уравнениями параметра порядка и принципом подчинения | Алгоритмы идентификации образа определяются формальными языками |

Для процессов формообразования вблизи точек неустойчивости любой образ $q(t)$ может быть представлен в следующей форме:

$$q(t) = d_1(t)v_1(x) + d_2(t)v_2(x) + \dots,$$

где $d_i(t)$ — параметры порядка, зависящие от времени; $v_i(x)$ — пространственные моды, не зависящие от времени.

В последнее время получены принципиально важные результаты для понимания физической сущности распознавания зрительных образов и проделаны первые успешные эксперименты моделирования этого про-

цесса. Оказалось, что математическая сущность распознавания образов имеет неалгоритмический характер и потому плохо поддается моделированию на современных компьютерах, архитектура которых создавалась для решения вычислительных, хорошо алгоритмизируемых задач.

Распознавание мозгом каждого конкретного образа, например, дерева, связано с выделением из памяти по поступающим извне данным наиболее близкого этим данным образа. В памяти человека все возможные реализации образа хранятся в распределенном виде по всей нейронной сети. Обращение к хранимой в памяти информации происходит по содержанию, а не по адресу в памяти (как в современных компьютерах), и этим объясняется очень высокая быстрота процесса распознавания.

Работу ассоциативной памяти можно проиллюстрировать на следующем механическом примере. Пусть имеется некоторый неровный ландшафт, по которому катится тяжелый шарик (рисунок 3).

Ямы в этом ландшафте будем идентифицировать с ключевыми образами, то есть с образами, хранящимися в памяти. Пики этого ландшафта мы соотнесем с еще не распознанными (не узнанными, только предъявленными к распознаванию) образами. Процесс распознавания можно представить как скатывание шарика в наиболее близкую к нему яму или, другими словами, опознаваемый образ будет тяготеть к наиболее близкому к нему хранящемуся в памяти образу. После того как шарик окажется на дне ближайшей ямы, он уже находится в устойчивом положении и процесс распознавания будет закончен.

В музыкальном звукоряде ноты «ре» разных октав (как и любые ноты с интервалами, кратными октаве) распознаются нейронной сетью мозга как очень похожие звуки именно потому, что у этих звуков очень похожая (практически совпадающая) структура обертонов (другими словами, обертоновая структура этих звуков имеет максимальную корреляцию). Интервалы с высокими значениями корреляций обертонов соответствующих звуков называются консонансными. Диссонансным интервалам отвечают низкие значения корреляций обертоновых структур звуков.

В реальных задачах распознавания ключевым образам соответствуют изображения, семантические конструкции, образы, которые могут быть представлены векторами большой размерности.

Описанная схема распознавания образов реализуется в модели распределенной нейронной памяти Дж. Хопфилда — по нашему мнению наиболее содержательной среди многих предложенных в последние го-

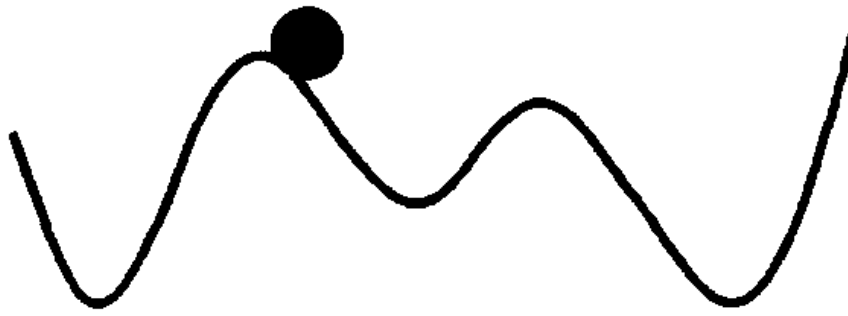


Рис. 3. Механическая модель распознавания образов.

ды моделей распознавания и обладающей наибольшими возможностями для обобщения и развития.

Первоначально при моделировании реальных нейронных сетей в качестве модели нейрона был выбран бистабильный элемент, а основное внимание было уделено связям между нейронами. Конечно, реальный нейрон намного сложнее бистабильного элемента. Нейрон может находиться в нескольких стационарных состояниях, в том числе колебательном и квазихаотичном. Сама нейронная сеть есть активная среда, по которой могут распространяться автоволны, в ней может возникать явление синхронного возбуждения сразу многих нейронов.

Тем не менее, даже такая упрощенная модель нейронной сети, в которой нейрон моделируется бистабильным элементом, отражает многие принципиальные свойства реальных нейронных сетей и прежде всего — процесс распознавания неполных и зашумленных образов.

Физической моделью распределенной нейронной памяти может служить так называемое спиновое стекло — магнитное вещество с аморфной неупорядоченной структурой. Чтобы понять необычные свойства спинового стекла, представим его состоящим из атомов, магнитные моменты (или спины) которых могут принимать всего две ориентации: $S_1 = +1$ (вверх) и $S_2 = -1$ (вниз). Для двух атомов энергия их магнитного взаимодействия равна $E_{12} = J_{12}S_1S_2 \dots$. Коэффициент J_{12} есть переменная величина как по знаку, так и по амплитуде. Если J_{12} отрицательно, это означает, что ориентация спинов двух атомов совпадает и система имеет минимально возможную энергию. Когда спины направлены в противоположные стороны, J_{12} положительно. Полная энергия системы получается суммированием E_{ij} по всем парам атомов:

$$E = \sum_{i,j} J_{ij}S_iS_j \quad \text{— функция Ляпунова}$$

Можно показать, что эта величина играет роль функции Ляпунова при эволюции нейронной сети как динамической системы, то есть ее величина не возрастает в процессе распознавания предъявленного образа, а точнее, эволюционирует в один из локальных минимумов.

В спиновом стекле коэффициент J_{ij} есть случайная величина. Существуют определенные конкретные устойчивые распределения коэффициента J_{ij} , соответствующие локальным минимумам полной энергии системы и представляющие собой определенные пространственные картины ориентации спинов. Каждая изначально выбранная картина ориентации спинов будет со временем превращаться в одну из наиболее близких по состоянию устойчивых пространственных картин. Таким образом, даже случайная сеть обладает определенного сорта памятью.

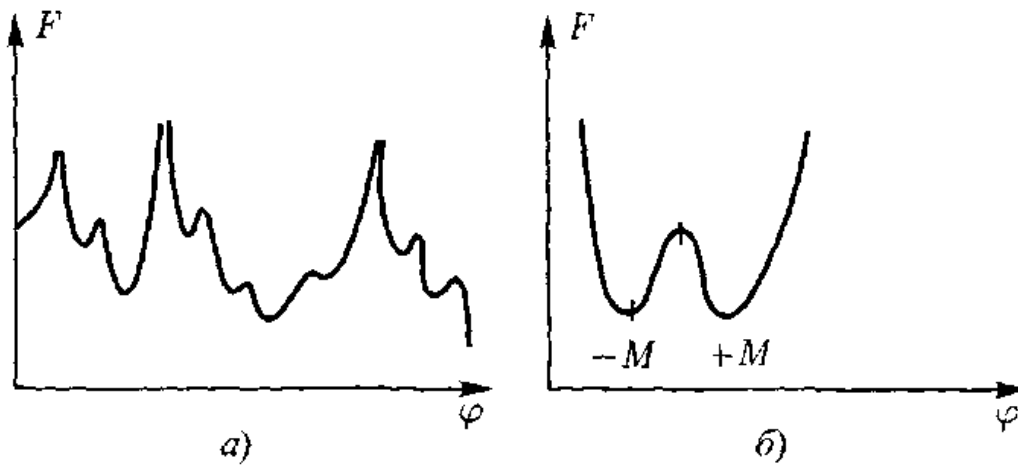


Рис. 4. Свободная энергия для а) спинового стекла, б) ферромагнетика.

Качественно свойства распределенной памяти можно понять из энергетических представлений. На рисунке 4 показана зависимость свободной энергии спинового стекла как функции некоторой координаты в N -мерном «пространстве образов» (или «пространстве смыслов»).

Для сравнения дана также соответствующая функция для ферромагнетика, у которого лишь два минимума, отвечающих ориентации спинов вверх и вниз. В спиновом стекле число таких минимумов (а значит и возможных состояний) практически бесконечно. Эти состояния могут быть метастабильными: хотя каждый спин направлен так, как этого требует его взаимодействие с ближайшим окружением, полная энергия всей системы оказывается выше, чем в состоянии равновесия. С течением времени такие состояния релаксируют в одно из равновесных.

Коэффициенты J_{ij} можно выбрать таким образом, чтобы создавать определенные нужные нам картины-образы, хранящие определенную ин-

формацию. Такая система окажется способной распознавать вводимые извне образы по степени их близости к одной из записанных картин. Подчеркнем, что запомненная информация хранится сразу во всей сети, распределена по связям между отдельными атомами. Именно поэтому такая система малочувствительна к дефектам в сети, приводящим лишь к некоторому уменьшению емкости памяти.

Автор модели распределенной нейронной памяти Хопфилд показал аналогию свойств такой физической модели со свойствами нейронной сети. Дело в том, что каждый нейрон, как и магнитное состояние атома, может находиться в двух состояниях: $S_1 = +1$ — возбужденное состояние и $S_2 = -1$, когда нейрон находится в покое. Нейроны связаны между собой синаптическими связями, которые бывают возбуждающие и тормозящими. Рассмотрим, например, два нейрона, связанных через тормозящий синапс. Если один из этих нейронов находится в активном состоянии $S_1 = +1$, то генерируемый им сигнал преобразуется синапсом в тормозящий сигнал для другого нейрона и он будет находиться в неактивном состоянии $S_2 = -1$. В случае связи двух нейронов через возбуждающий синапс ситуация меняется: возбуждение первого нейрона вызовет возбуждение второго. Таким образом, синаптическую связь можно описывать коэффициентом J_{ij} , который равен $+1$, если синапс возбуждающий, и -1 , если синапс тормозящий. Можно убедиться, что величина $E_{12} = J_{12}S_1S_2$ будет минимальной для устойчивых состояний двух нейронов, а если система состоит из большого числа нейронов, то устойчивым картинам будут соответствовать локальные минимумы величины, получаемой суммированием E_{ij} по всем парам нейронов. Распознавание образов в такой нейронной системе есть коллективный процесс всей нейронной системы в целом путем релаксации к устойчивому состоянию, ближайшему к введенному образу. Такая система очень надежна — часть нейронов могут погибнуть, выйти из строя, но память при этом заметно не пострадает.

В предложенной Хопфилдом модели коэффициенты межнейронных связей, когда в нейронной сети запомнено p образов, задаются в следующем виде (правило обучения Хебба):

$$J_{ij} = \frac{1}{N} \sum_a \zeta_i^a \zeta_j^a \quad i = j, J_{ii} = 0, J_{ij} = J_{ji}$$

множество $\{\zeta_i^a\} i = 1, 2, \dots, N$ задает некоторый образ в нейронной сети, построенный в результате обучения, то есть в результате некоторого определенного внешнего воздействия. Каждому такому образу отвечает

некоторый определенный локальный энергетический минимум, и вследствие этого хранящиеся в нейронной сети образы имеют иерархическую организацию.

Когда мы видим лицо человека, мы всегда пытаемся установить ассоциативную связь этого лица с некоторым именем, или хотя бы понять, видели ли мы это лицо в прошлом. При этом лицо, которое сейчас перед нашими глазами, может сильно измениться, например, постареть, это может быть лицо с бородой, хотя раньше мы его видели без бороды, и наоборот. Таким образом, распознавание образа неразрывно связано с работой ассоциативной памяти.

Принципиально важным свойством распознавания образов нейронной сетью является восстановление образа по редуцированным, неполным данным. Например, к распознаванию может быть предъявлено сильно упрощенное (например, переданное лишь несколькими основными линиями) лицо или фигура или даже неполное изображение (часть лица, часть фигуры и т. п.). Тем не менее, нейронная сеть способна по этим неполным данным восстановить полный ключевой образ, хранящийся в памяти.

Это свойство ассоциативной памяти в виде распределенных нейронных сетей принципиально важно для понимания процессов восприятия художественных произведений, как зрительных, так и акустических, поскольку любое произведение искусства дает нам редуцированные, неполные образы (*pars pro toto* — часть вместо целого). Такое восстановление образа по неполным данным в психологии называется сотворчеством.

Например, талантливый карикатурист может лишь несколькими удачными штрихами достичь удивительного сходства портрета и оригинала. Любой портрет, картина, любая фотография также дают далеко не полную информацию об оригинале, и процесс восприятия художественных произведений связан с использованием предварительно накопленной и хранящейся в памяти человека информации для воссоздания полного образа.

T. Nishikava, Y. C. Lai, F. Hoppenstedt предложили более реалистическую осцилляторную модель ассоциативной памяти, которую можно рассматривать как обобщение модели Kuramoto, описывающей возникновение синхронизации в сети связанных осцилляторов, так и модели Хопфилда. Такая модель имеет следующую форму:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i \sum_{j=1}^N C_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \psi_{ij}), \quad \text{где } i = 1, 2, \dots, N.$$

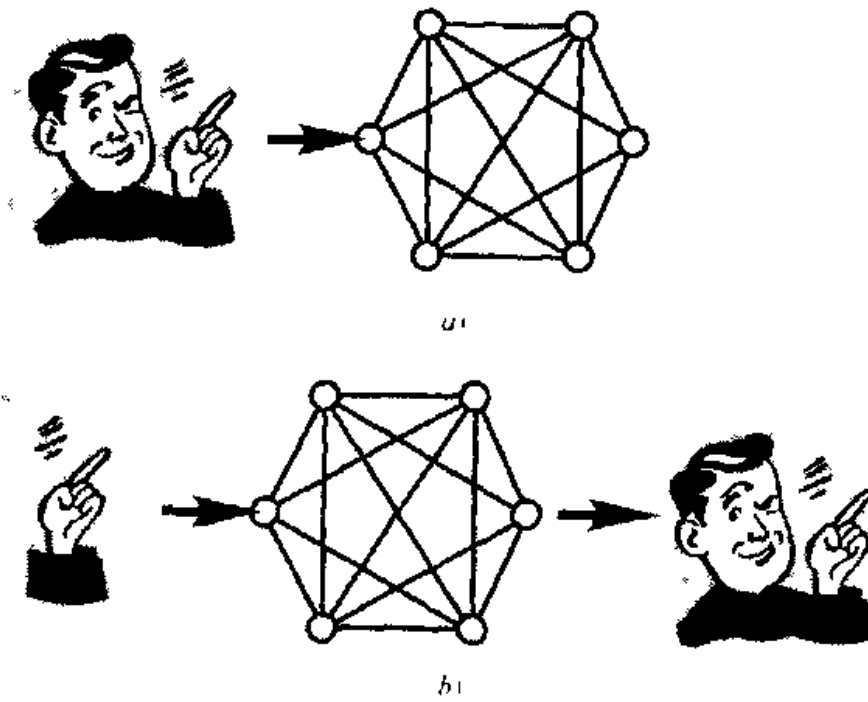


Рис. 5. а) Процесс обучения нейронной сети. Запоминание ключевого образа
 б) Процесс восстановления полного образа по его фрагменту искусственно нейронной сетью.

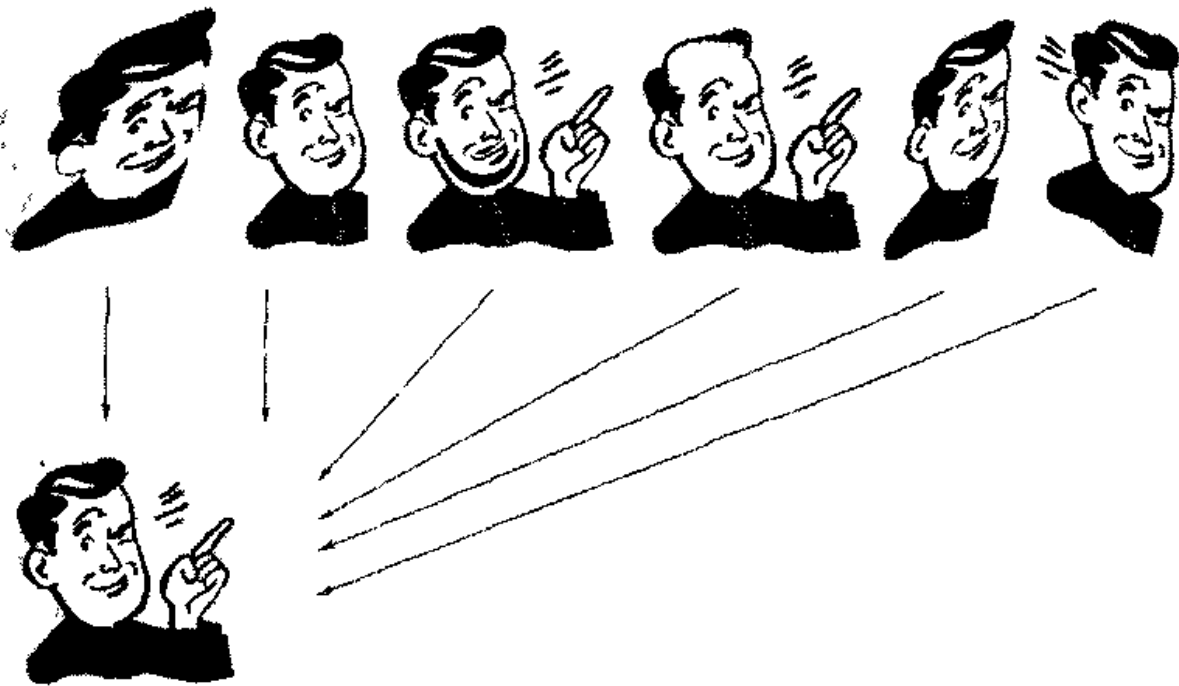


Рис. 6. Все представленные сверху образы принадлежат бассейну одного аттрактора — ключевого образа, изображенного внизу.

Каждый нейрон в этой модели описывается как осциллятор с фазой $\theta_i(t)$, C_{ij} — коэффициенты связи между нейронами, а ψ_{ij} описывает синаптическую задержку фазы. Такая более реалистичная модель ассоциативной памяти обладает информационной емкостью, составляющей примерно треть емкости модели Хопфилда. Но у этой модели появляется проблема устойчивости — в отличие от хопфилдовской модели, предъявляемые к распознаванию образы уже не притягиваются автоматически к ближайшему образу-прототипу.

Чтобы преодолеть этот недостаток, Т. Nishikawa и его соавторы к слагаемому, описывающему связь между осцилляторами, добавили еще одно слагаемое $\frac{\varepsilon}{N} \sin 2(\theta_j - \theta_i)$, соответствующее второму члену в разложении Фурье, где ε характеризует вес данного слагаемого. После замены переменной $\theta_i \rightarrow \theta_i \rightarrow +\omega t$ уравнение (1) приобретает вид:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \sum_{j=1}^N C_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) + \frac{\varepsilon}{N} \sum_{j=1}^N \sin 2(\theta_j - \theta_i).$$

Это уравнение имеет 2^N стационарных точек, соответствующих всем возможным бинарным образам длины N . Они соответствуют всем возможным синхронным состояниям данной сети осцилляторов.

Пусть $(\eta = \eta_1, \dots, \eta_N)^T$, где η представляет собой N -мерный вектор, координатами которого являются $+1$ и -1 , описывает один из таких бинарных образов. Тогда существует единственное, с точностью до трансляционной константы, стационарное решение, соответствующее образу η , для которого $|\theta_i - \theta_j| = 0$, если $\eta_i = \eta_j$, и $|\theta_i - \theta_j| = \pi$, если $\eta_i \neq \eta_j$. Обозначим это решение θ_η .

Это решение описывает колебательный режим с «захватом фазы» (phase locking), при котором компоненты бинарных образов осциллируют синхронно, изменяясь от $+1$ до -1 и обратно. Это уравнение может быть представлено как градиентное с энергетической функцией (функцией Ляпунова):

$$L(\theta, \varepsilon, C) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N C_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - \frac{\varepsilon}{4N} \sum_{j=1}^N \cos 2(\theta_j - \theta_i),$$

и любое решение в конечном счете стремится к локальному минимуму этой функции.

Исследования уравнения на устойчивость показывают, что возможен выбор такого интервала значений веса ε , на котором эта нейронная сеть ведет себя аналогично классической нейронной сети Хопфилда с приблизительно тем же значением информационной емкости.

1.3.1. Распознавание образов и гештальтпсихология

Сформулированные около века назад в Германии (Wertheimer, Kohler, Koffka) принципы восприятия зрительных и слуховых образов до сих пор считаются основополагающими принципами психологии восприятия, в том числе в психологии искусства. Гештальтпсихология (от немецкого слова Gestalt — конфигурация, форма) полагает, что стимулам от каждого зрительного образа свойственно естественное стремление к организации. Рассмотрим некоторые принципы организации образов в гештальтпсихологии и сравним их с принципами работы ассоциативной памяти в модели Хопфилда.

Близость (proximity) и **сходство** (similarity). Элементы, расположенные близко в пространстве или времени, воспринимаются вместе как нечто целое. Одинаковые черты и свойства имеют тенденцию группироваться вместе в нашем перцептивном пространстве (рисунки 7, 8).

С точки зрения модели распознавания образов в модели Хопфилда, оба эти принципа гештальтпсихологии можно объяснить тем, что стимулы, близкие в пространстве и во времени, а также сходные (одинаковые по форме) стимулы, расположены очень близко друг к другу в соответствующем пространстве состояний (перцептивном пространстве) и, таким образом, находятся в зоне притяжения одного и того же аттрактора (расположены в бассейне одного аттрактора) на соответствующем потенциальном ландшафте функции Ляпунова нейронной сети Хопфилда.



Рис. 7. Группировка по близости.

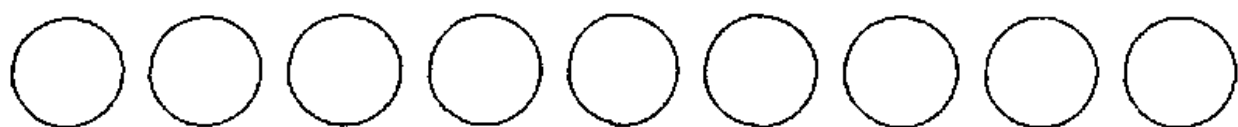


Рис. 8. Группировка по сходству.

1. Замкнутость (closure) и прегнантность (Pregnanz). Замкнутость — это свойство видеть хорошо знакомую форму как единое целое. Например, окружность, в которой есть разрывы, мы имеем тенденцию видеть без разрывов

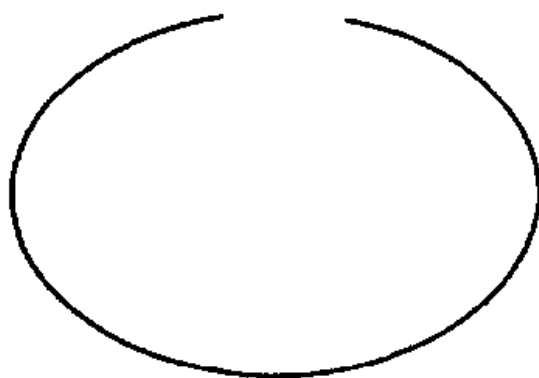


Рис. 9. Свойство замкнутости: предъявленная на короткое время, такая фигура будет восприниматься нами как целая.

Прегнантность изображения означает, что при восприятии сложной формы, когда появляется неоднозначность в интерпретации изображения, мы выбираем наиболее осмысленный, типичный и простой вариант.

Оба эти свойства также допускают простое объяснение в рамках модели Хопфилда. Как мы знаем, фундаментальным свойством этой модели является способность восстанавливать полный образ по неполным данным. Именно об этом идет речь в описанных выше двух принципах гештальтпсихологии. В обоих случаях мы имеем дело с неполными образами (один с разрывами, в другом случае происходит перекрывание). Наша зрительная система в обоих случаях восстанавливает эти неполные образы до полных.

Большим достоинством модели Хопфилда является то обстоятельство, что она может быть детально изучена как с помощью вычислительного эксперимента, так и аналитически с использованием методов статистической физики.

Важно иметь в виду, что описанная выше модель ассоциативного распознавания образов представляет собой упрощенную модель реальных процессов (всякая модель есть упрощение). В действительности, когда мы видим знакомое лицо, мы никогда не видим в точности то же самое лицо, которое мы видели раньше. Мы его видим в другом ракурсе, при другом освещении, за прошедшее время оно могло сильно измениться и т.д. Соответственно, представление этого образа в виде точечного аттрактора в модели Хопфилда также есть приближение. В более реалистических (и потому более сложных) моделях все возможные варианты одного и того же образа образуют малоразмерное многообразие в пространстве большой размерности этого образа. Структура этого многообразия может иметь особенности в виде предельного цикла и седловой точки.

Недостатком изложенной выше модели Хопфилда является наличие «ложной памяти», то есть наличие в потенциальной функции E мелких локальных минимумов, не связанных с ключевыми образами, но к таким «ложным образам» нейронная сеть может эволюционировать при распознавании конкретного предъявленного образа.

Другой недостаток связан с отсутствием в нейронной сети Хопфилда особого промежуточного состояния, аналогичного критическому состоянию в теории фазовых переходов. Вследствие этого нейронная сеть обязательно эволюционирует в один из ключевых образов, даже если предъявленный образ совершенно не соответствует этим ключевым образам. Представим, например, что в памяти нейронной сети хранятся образы кошки и собаки, то есть система, как и в фазовых переходах, имеет два минимума функционала энергии. Допустим, мы предъявили для распознавания птицу. Функционал энергии нейронной сети в процессе этого распознавания достигнет одного из минимумов, соответствующего, например, собаке. То есть нейронная сеть не умеет говорить «не знаю», не умеет выходить на метастабильное состояние, аналогичное критическому состоянию при фазовых переходах.

Как мы знаем, критическому состоянию в фазовых переходах соответствуют явления критического замедления и критических флуктуаций. Поэтому можно ожидать, что добавление в нейронную сеть шума (флуктуаций) избавит нейронные сети от этих недостатков.

Исследования, проведенные Amit, а также другими учеными, действительно показали, что в нейронных сетях существуют уровни шумов, при которых «ложные образы» теряют свою устойчивость, и возникает метастабильное состояние «не знаю», аналогичное критическому состоянию при фазовых переходах второго рода. По сути дела, нейронная сеть

с шумом, предложенная и исследованная в этих работах, представляет собой обобщение модели фазовых переходов на случай многих (более двух) устойчивых состояний (аттракторов).

Как мы видели выше, понятие параметра порядка позволяет существенно упростить описание сложной системы вблизи точки неустойчивости. Для модели Хопфилда параметрами порядка являются величины, называемые корреляциями между образами:

$$r_{\mu\nu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_{\mu i} \xi_{\nu i}.$$

Эти величины принимают значения от $+1$, когда два образа совпадают, до -1 , когда один образ является негативом другого. Обычно при анализе нейронных сетей возникает вопрос: можно ли в дополнение к уже хранящимся в сети M образам записать еще один ξ_{M+1} , чтобы этот новый образ также стал аттрактором нейронной сети, а остальные продолжали оставаться аттракторами. Исследования Г. Г. Малинецкого с сотрудниками показали, что чем больше корреляция нового образа с одним из уже записанных, тем «труднее» нейронной сети запомнить и распознать его.

1.4. Подразделенные нейронные сети

Существует две крайние точки зрения относительно функциональной локализации в мозге:

- 1) специфические функции локализованы в отдельных нейронах;
- 2) функции полностью делокализованы по всему мозгу.

Сейчас общепризнано, что на самом деле истина где-то посередине, то есть, существует определенный уровень региональной специализации. Мозг, действительно, должен быть функционально разделен. Например, зрительная система должна быть отделена от слуховой и моторной (системы, отвечающей за двигательные функции) и т. д. Но мы знаем также, что все эти области, а следовательно, и сами функции, в сложных поведенческих актах связаны между собой.

Один из возможных подходов к моделированию такой регионально-функциональной специализации представляют собой подразделенные нейронные сети (subdivided neural networks), где предполагается, что синаптические связи внутри нейронных подразделений гораздо сильнее и более многочисленны, чем между подразделениями. В таких подразделенных нейронных сетях обработка информации происходит параллель-

но. Схематически подразделенная нейронная сеть показана на рисунке 10.

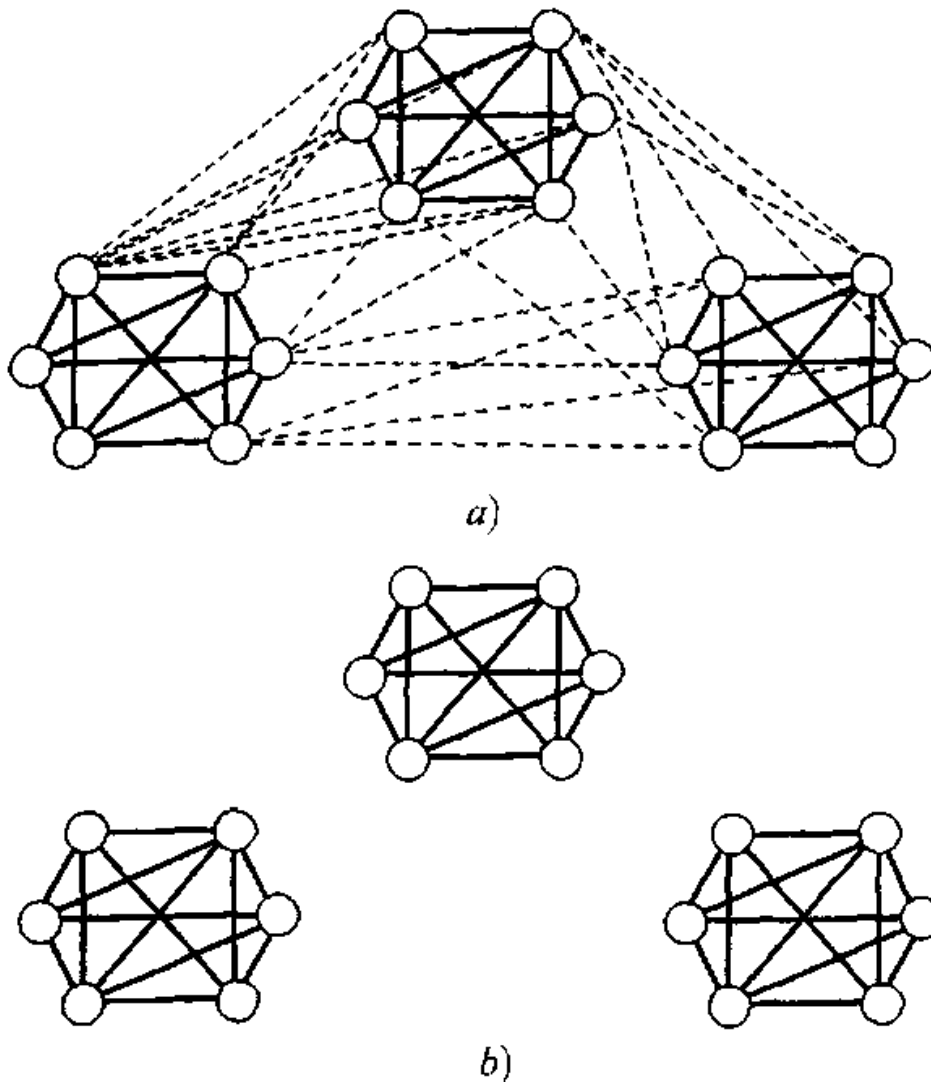


Рис. 10. Схематическое изображение а) частично связанной подразделенной нейронной сети, б) несвязанной подразделенной нейронной сети.

Причина возникновения архитектуры подразделенных сетей заключается в том, что хотя информационная емкость полностью связанной сети выше, чем подразделенной, но, если необходимо хранить образы с коррелированной структурой, то именно для таких образов подразделенные сети имеют значительно большую емкость.

Если мы сравним подразделенную нейронную сеть с целостной, полностью связанной нейронной сетью (fully connected neural network), то информационная емкость последней оказывается выше, и она тем выше, чем больше степень внутренней связности этой сети. Полностью связанная нейронная сеть, содержащая N нейронов, способна запомнить $p = \alpha_c N$ образов, где $\alpha_c = 1,185$.

Анализ устойчивости хранимых в нейронной сети образов показывает, что если все образы ортогональны друг другу, то есть между образами нет взаимных корреляций, то $p = N$.

1.4.1. Преимущества и недостатки подразделенных нейронных сетей в хранении информации

Сравним процесс хранения информации в подразделенной нейронной сети, состоящей всего из двух подразделений, которые мы для краткости будем называть полусферами (биологическими аналогом такой модели являются две полусферы мозга, управляющие, например, левой и правой рукой), и в полностью связанной сети, взяв в качестве примера задачу хранения инициалов людей, например:

(А,В); (М,Б); (А,Х); (М,Р); (А,Б) и т. д.

Это как раз тот случай, когда между двумя образами (в данном случае между начальными буквами имен и отчеств) возможны корреляции.

В нашем случае подразделенной нейронной сети левая полусфера запоминает первую букву инициалов (первую букву имени), а вторая полусфера — вторую букву инициалов (первую букву отчества).

Как уже говорилось выше, полностью связанная нейронная сеть способна хранить $p = \alpha_c N$ различных некоррелированных между собой образов. Каждая полусфера содержит $N/2$ нейронов и потому способна запомнить $\alpha_c N/2$ различных букв.

Запоминание и хранение информации в каждой полусфере независимы друг от друга.

Поэтому если мы попытаемся восстановить (вспомнить) всю информацию, хранящуюся в обеих полусферах, то каждая буква левой полусферы может возникнуть в комбинации с любой буквой, хранящейся в правой полусфере, и мы получим даже такие инициалы, которые не закладывались на хранение.

Число таких комбинаций равно $(\alpha_c N/2)^2$. Поскольку N велико, то $(\alpha_c N/2)^2$ намного больше, чем $\alpha_c N$. Таким образом, два подразделения нейронной сети способны хранить намного больше информации, чем соответствующая полносвязанная нейронная сеть, состоящая из того же числа нейронов. Следовательно, подразделенные нейронные сети способны узнавать значительно больше образов, чем в них было заложено в процессе обучения.

Сложные образы, получающиеся в результате объединения элементарных образов, хранящихся в каждом подразделении нейронной сети, будем называть композиционными образами.

В Таблице 2 даны результаты расчетов емкости хранения композиционных образов для различного числа подразделений в нейронной сети. Если необходимо максимизировать число композиционных образов, то указано также оптимальное число подразделений $q_{\text{опт}}$.

Таблица 2.

| Число нейронов | Число образов в полностью связанной сети | Число образов в сети с двумя подразделениями | Число образов в сети с тремя подразделениями | $q_{\text{опт}}$ | Максимальное число образов |
|----------------|--|--|--|------------------|----------------------------|
| 100 | $1,45 \cdot 10^1$ | $5,26 \cdot 10^1$ | $1,13 \cdot 10^2$ | 5 | $1,48 \cdot 10^2$ |
| 1000 | $1,45 \cdot 10^2$ | $5,26 \cdot 10^3$ | $1,13 \cdot 10^5$ | 53 | $1,04 \cdot 10^{23}$ |
| 10000 | $1,45 \cdot 10^3$ | $5,26 \cdot 10^5$ | $1,13 \cdot 10^8$ | 533 | $1,01 \cdot 10^{231}$ |

1.4.2. Сенсорная информация: цвет, форма и движение в зрительном образе

Одним из примеров реализации принципа подразделенных сетей в мозге является процесс обработки зрительной информации. Детальные исследования функций зрительной коры мозга показали, что любой зрительный образ обрабатывается параллельно: отдельно обрабатывается форма, отдельно — цвет и отдельно — движение. Схематически это можно представить следующим образом.

Использование трех различных каналов обработки информации нашей зрительной системой косвенно подтверждается использованием в описании объектов внешнего мира соответствующих атрибутов. Описывая объект, мы обычно выделяем соответствующие его свойства: форму, цвет, тип движения (или действия). В пределах каждого из них мы можем создать список соответствующих качеств. Например:

Цвет: синий, красный, оранжевый, черный, белый, ...

Форма: круглый, овальный, квадратный, высокий, плоский, ...

Действие: движение, покой, движение вправо/влево, поднимается, падает, растет, ...

Из этих трех множеств можно сконструировать огромное число комбинаций, каждая из которых будет описывать реальный или придуманный зрительный образ. Цвет, форма и движение не являются независимыми ни в природе, ни при обработке соответствующих образов мозгом. Частичная подразделенность зрительной системы означает корреляцию между формой, цветом и движением. Но такая корреляция имеет место и в реальном мире.

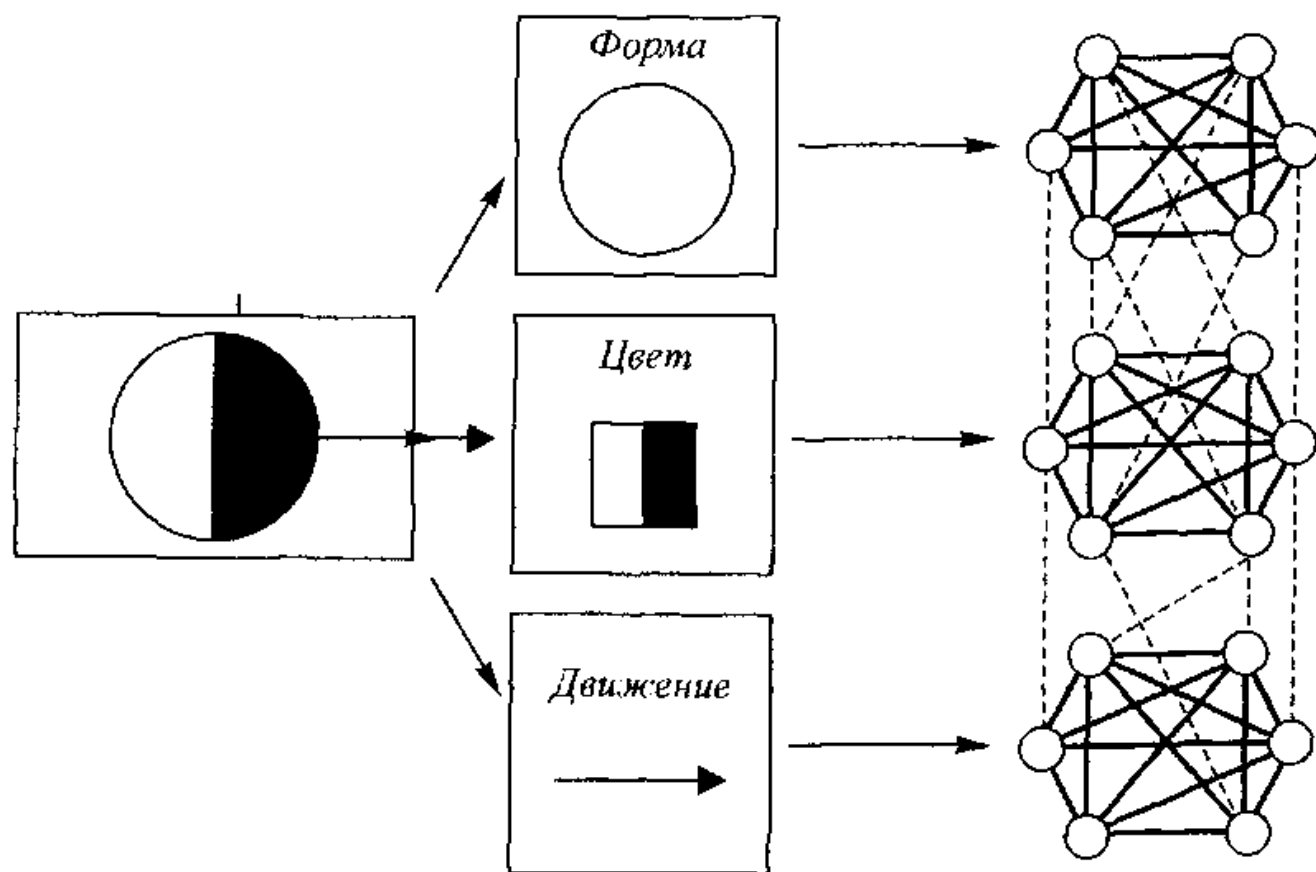


Рис. 11. Пример отдельной параллельной обработки мозгом зрительной информации по форме, цвету и движению. Образ летящего разноцветного мяча распознается тремя подразделениями: первое распознает круглую форму мяча, второе — цветную структуру, третье — характер движения.

Например, листья имеют набор характерных форм, и эти формы обычно имеют зеленый цвет.

Ствол дерева имеет вертикальную или ветвистую форму и обычно коричневого цвета. Движение падающих листьев совсем не такое, как движение падающего дерева. Паттерны двигательной активности правой руки и левой руки у человека (управляемые, соответственно, правым и левым полушариями головного мозга) всегда сильно коррелируют между собой. Именно для запоминания таких связанных между собой образов хорошо приспособлены частично подразделенные нейронные сети.

1.4.3. Лингвистика: существительное, глагол и прилагательное в структуре предложения

Поскольку архитектура подразделенных нейронных сетей дает преимущества в хранении информации, можно ожидать, что такая архитектура проявляет себя не только в функциях, возникших в ходе биологической эволюции, какой является зрительная система, но и в функциях, возникших в процессе социальной эволюции и свойственных только человеку. Примером такой функциональной системы является язык.

Разговорный и письменный язык представляют собой созданную самим человеком знаковую систему, структура которой, несомненно, отражает принципы функционирования мозга человека, и потому изучение естественных языков можно рассматривать как один из методов изучения высших психических функций человека.

Различают грамматические и семантические аспекты языка. Грамматика — это структура полным образом сформированного предложения, а семантика — содержание, смысл этого предложения. Грамматика, более поддающаяся формальному анализу, чем семантика, изучает наиболее универсальные, свойственные всем языкам, закономерности, которые, несомненно, отражают архитектуру и функции мозга.

Как известно, слова в предложении разделяются на категории: например существительное, глагол, прилагательное и наречие. Для того, чтобы слова запоминались и хранились в памяти, должны существовать правила представления определенных категорий в определенные подразделения мозга.

Можно предположить, что при слуховом восприятии и при чтении каждого предложения происходит разделение слов предложения на соответствующие категории и направление их в соответствующие подразделения мозга. При этом мозг запоминает и хранит не столько отдельные слова, сколько фразы, короткие предложения, каждое из которых состоит из существительного, глагола, прилагательного и наречия и т. д. В контексте лингвистики преимущества подразделенных нейронных сетей показаны в Таблице 3.

Пусть имеется полностью связанная нейронная сеть с числом нейронов, достаточным для запоминания и последующего распознавания девяти предложений, которые помещены в левой колонке таблицы.

Если такая сеть подразделена на три части, то она сможет запомнить только три предложения (центральная колонка).

Поскольку каждая часть такой сети функционирует независимо, можно сформировать двадцать семь предложений (правая колонка) как

Таблица 3.

| Полностью связанная нейронная сеть | Подразделенная нейронная сеть | |
|--|--|---|
| Запоминание и распознавание | Запоминание | Распознавание |
| Толстый Петр идет Красивый Николай пишет Высокий Сергей упал Печальный Борис сидит Усталый Алексей спит Грязный Владимир бежит Счастливый Михаил прыгает Умный Григорий плавает | Толстый Петр идет Красивый Николай пишет Высокий Сергей упал | Толстый Петр идет Красивый Николай пишет Высокий Сергей упал Толстый Петр идет Толстый Петр пишет Толстый Петр упал Толстый Николай идет Толстый Николай пишет Толстый Николай упал Толстый Сергей идет Толстый Сергей пишет Толстый Сергей упал Красивый Петр идет Красивый Петр пишет Красивый Петр упал Красивый Николай идет Красивый Николай пишет Красивый Николай упал Красивый Сергей идет Красивый Сергей пишет Красивый Сергей упал Высокий Петр идет Высокий Петр пишет Высокий Петр упал Высокий Николай идет Высокий Николай пишет Высокий Николай упал Высокий Сергей идет Высокий Сергей пишет Высокий Сергей упал |
| | | |

все возможные комбинации трех хранящихся в памяти предложений, и все эти двадцать семь предложений могут быть распознаны.

Можно предположить, что существительные более тесно связаны с областями мозга, обрабатывающими сенсорную информацию, а гла-

голы — с областями мозга, обрабатывающими моторную информацию. Если эти предположения подтвердятся, то станет понятно, почему слова подразделяются на категории существительного и глагола, а не на какие-то другие категории.

1.5. Хаотическая динамика мозга

1.5.1. Динамический хаос электрической активности нейронных ансамблей

Исследования последнего времени показали, что электроэнцефалограммы (ЭЭГ) животных и человека представляют собой детерминированный хаотический процесс с числом степеней свободы не выше 10, в зависимости от функционального состояния мозга (сон, бодрствование, эпилепсия и т. д.) Это сравнительно небольшое число степеней свободы ЭЭГ-сигнала указывает на высокую степень самоорганизации в электрической активности нейронов. Так, наиболее высокоорганизованному состоянию мозга отвечает эпилепсия, когда ЭЭГ-сигнал становится периодическим. Можно предположить, что свойства процесса генерации ЭЭГ-сигнала в основном определяются коллективными степенями свободы больших нейронных ансамблей, с числом нейронов в ансамбле порядка 10^9 . В экспериментах S. Kelso было установлено, что магнитные поля, генерируемые в межнейронных тканях мозга также образуют когерентные пространственно-временные паттерны, управляемые небольшим числом параметров порядка, хаотическая динамика которых подчиняется условию Шильникова.

В. Бондаренко была предложена математическая модель нейронной сети, состоящей всего из десяти нейронов, которая генерирует выходной сигнал аналогичный ЭЭГ-сигналу, генерируемому мозгом человека.

Предложенная В. Бондаренко модель нейронной сети описывается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

отом

ука

отр

изан

иде

коэф

ного

значение

$$\dot{u}_i(t) = -u_i(t) + \sum_{j=1}^M a_{ij} f(u_j(t - \tau_j)), \quad i, j=1, 2, \dots, M,$$

где $u_i(t)$ — входной сигнал i -го нейрона, M — число нейронов, a_{ij} — коэффициенты связей между нейронами, τ_j — временная задержка выходного сигнала j -го нейрона, $f(x) = c \tanh(x)$. Предполагается, что значение τ_j постоянно для всех нейронов ($\tau_j = \tau$). Значения для коэффи-

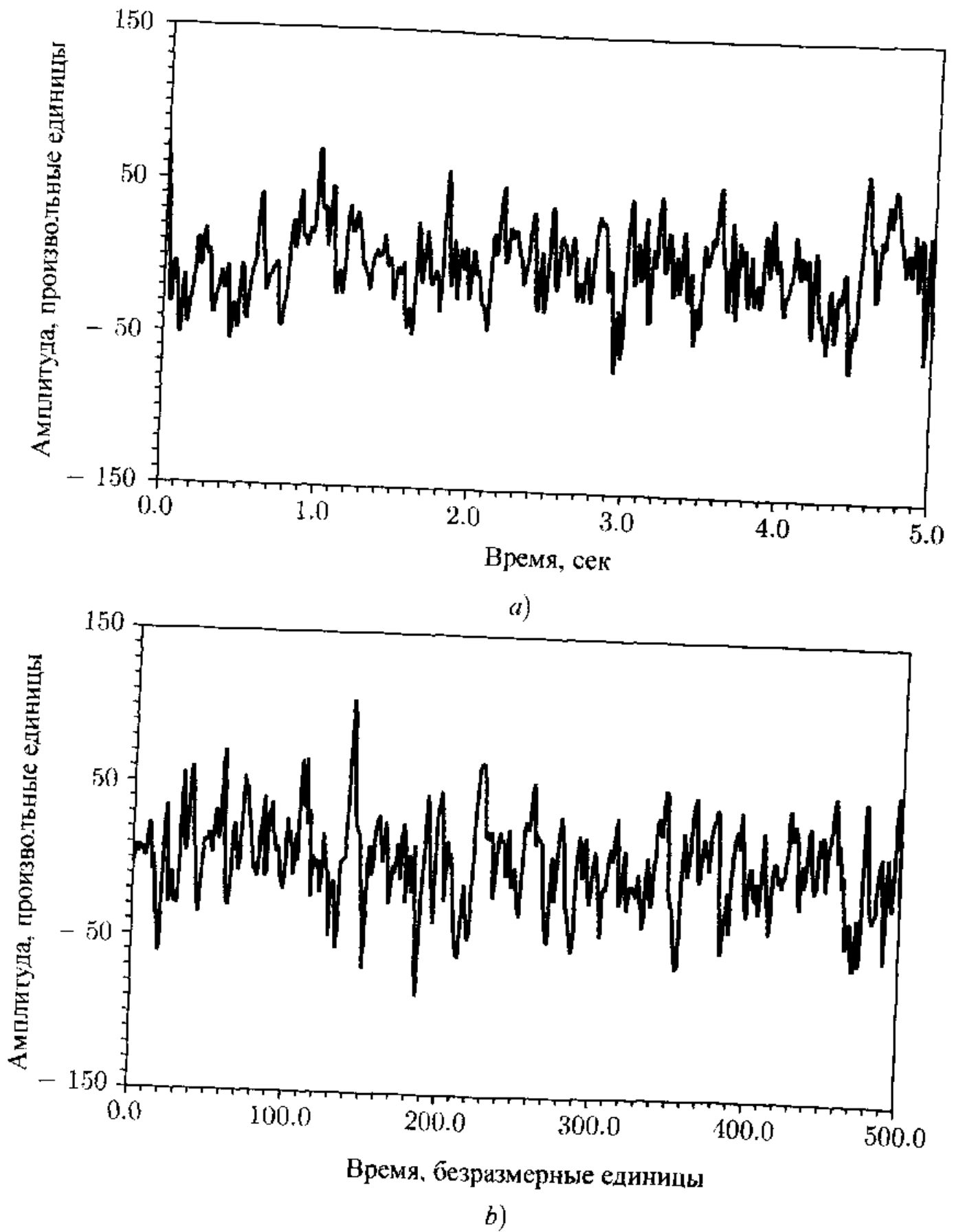


Рис. 12. а) ЭЭГ-сигнал фронтальной области мозга человека. б) Сигнал со входа первого нейрона модели В. Бондаренко.

циентов связей между нейронами получаются с помощью генератора случайных чисел в интервале между $-2,048$ и $+2,048$; коэффициент c используется для того, чтобы изменять значения a_{ij} коэффициентов одновременно.

При решении использовался метод Рунге – Кутты четвертого порядка с временным шагом $h = 0.01$.

Для вычисления корреляционной размерности использовался алгоритм Грассбергера – Прокаччия, с помощью которого анализировались временные ряды значений входных потенциалов отдельных нейронов. При вычислении наибольшего показателя Ляпунова в M -мерном фазовом пространстве из уравнения (1) вычислялись две траектории: невозмущенная $u_0(t)$ и возмущенная $u_\tau(t)$.

Такая нейронная сеть генерирует хаотичный сигнал, очень похожий на ЭЭГ-сигнал мозга с корреляционной размерностью $\nu = 5,2 - 7,1$ (в зависимости от порядкового числа нейрона) и безразмерным наибольшим ляпуновским показателем $\lambda = 0,017$ (рис. 12).

Пики частот в кумулятивном спектре из 10 нейронов находятся в соотношении $0,12:0,28:0,46:1,04$. Аналогичные соотношения основных ритмов в ЭЭГ человека $2,3:5,5:10,5:21,5$, называемые дельта-, тета-, альфа- и бета-ритмами, хорошо известны в нейрофизиологии (рис. 13).

1.6. Интегративная функция мозга и синхронизация нейронной активности

Когда во время утреннего кофе мы берем чашку со стола и подносим ее к губам, информация об этом процессе очень разнообразна и поступает она в разные отделы мозга. Это и зрительная информация о форме и цвете чашки, и осязательные впечатления о шероховатости чашки и ее температуре, а также обонятельная информация о запахе, информация о траектории движения руки и т.д. Все эти данные поступают практически одновременно в разные области мозга, но при этом формируется целостный многомодальный образ, в котором эта разнородная и разномодальная информация связана друг с другом.

В 1981 году Мальсбург (С. Von der Malsburg) высказал гипотезу, что механизмом такой интеграции является кратковременная (доля секунды) синхронизация активности нейронных ансамблей соответствующих отделов мозга, благодаря чему и формируется целостный образ. В научной

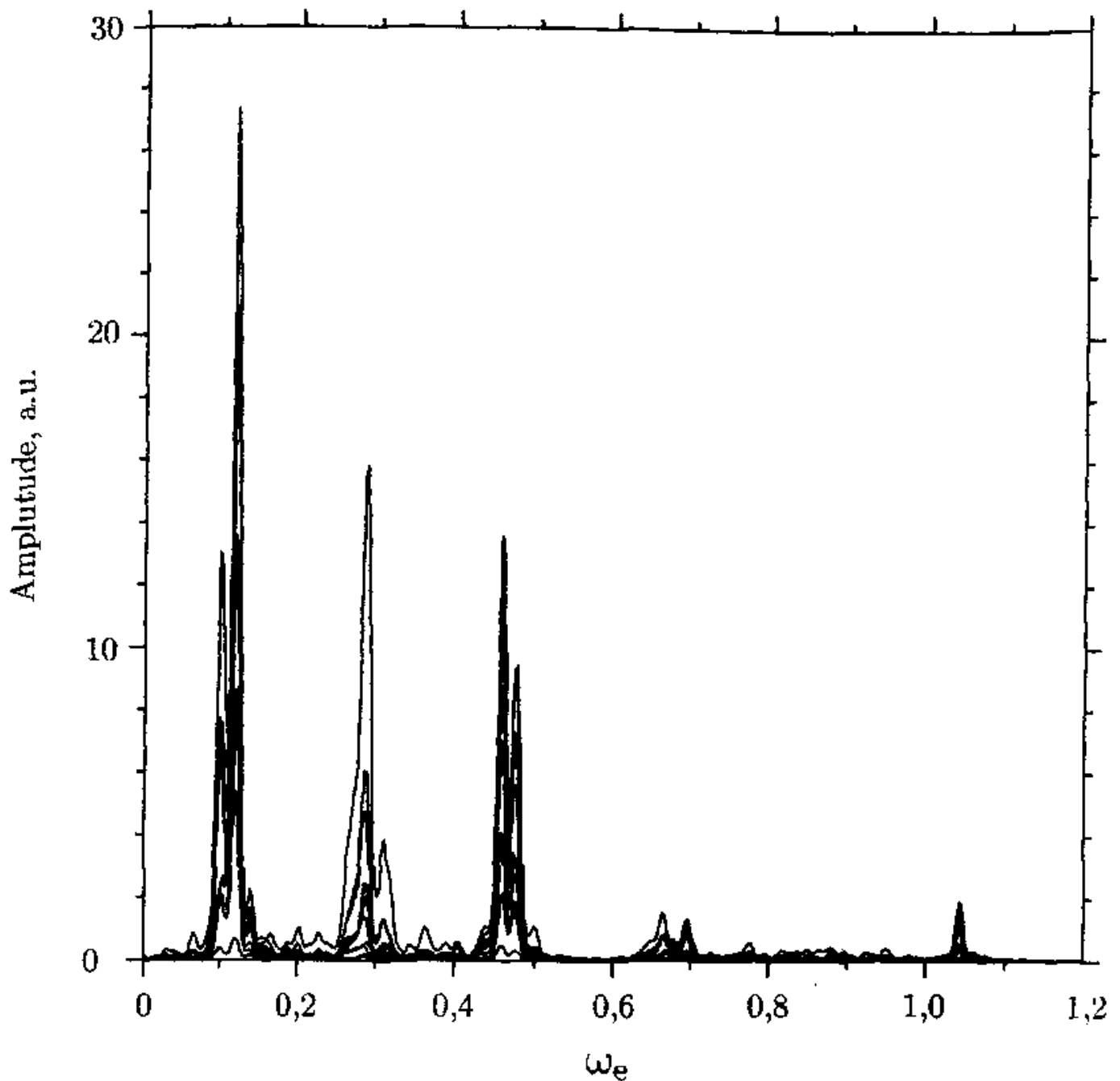


Рис. 13. Спектр суммарного выхода десяти нейронов без воздействия внешней силы в модели В. Бондаренко.

литературе эта гипотеза получила название *binding problem* (проблема связывания).

В последние годы эта гипотеза получает все большее признание, в первую очередь, благодаря работам В. Зингера (Wolf Singer) и Р. Экхорна. Эти исследователи регистрировали синхронизацию осцилляторов активности удаленных друг от друга участков коры на частоте около 40 герц у анестезированных кошек при предъявлении зрительных стимулов в виде ярких ориентированных движущихся отрезков.

Синхронизация есть мера степени согласованности между временными структурами сигналов безотносительно к амплитуде этих сигналов. Сигнал $x(t)$ может быть записан в следующем виде:

$$x(f, t) = a(t) \exp(i(ft + \phi_x(t))),$$

где $a(t)$ — амплитуда сигнала, а $\phi(t)$ — его фаза. Работая с сигналами мозга, мы сфокусируем свое внимание на фазе как той меры, которая содержит всю информацию о временной структуре активности нейронов.

Наиболее совершенная синхронизация между сигналами $x(t)$ и $y(t)$ означает, что между их фазами имеет место соотношение $\phi_x(t) = \phi_y(t)$.

В общем случае вводится следующая мера разности фаз:

$$\Phi_{xy} = |n\phi_x(t) - m\phi_y(t)|,$$

где n и m — целые числа. Хотя большая часть исследований связана со случаем $n = m = 1$, другие соотношения между этими целыми числами встречаются также. В нейрофизиологии о синхронизации говорят, когда Φ_{xy} поддерживается постоянной в течение нескольких сотен миллисекунд. Высказывается предположение, что в процессах синхронизации отдельные признаки объекта кодируются с помощью фаз групп осциллирующих нейронов, а объединение этой информации в единый образ происходит за счет синхронизации колебаний соответствующих групп осцилляторов.

В 1999 году группа нейрофизиологов под руководством Ф. Варелы (Francisco Varela) исследовала активность нейронных ансамблей различных отделов зрительной и моторной коры головного мозга человека при рассматривании черно-белых изображений лица в нормальном и перевернутом положении (рисунок 14).

Эти изображения демонстрировались на экране компьютера, и испытуемые должны были как можно быстрее нажать на соответствующую клавишу, как только они распознали в изображении лицо. В это время регистрировалась информация с 30 электродов, прикрепленных к голове.

Примерно через четверть секунды после начала рассматривания картинки, независимо от того, было ли это перевернутое или нормальное изображение лица, приборы регистрировали активность нейронных ансамблей в разных частях зрительной коры на частоте около 40 герц. Очевидно, начало этой нейронной активности отвечало началу процесса восприятия образа.



Рис. 14

Однако если частота осцилляции в обоих случаях была одинаковой, степень синхронизации активности нейронных ансамблей из разных отделов зрительной коры была совершенно разной. Колебания только при узнавании лица при рассматривании правильно предъявленного изображения, регистрируемые разными электродами, были синхронными.

Однако прежде чем испытуемый успевал нажать нужную клавишу, эта синхронная активность нейронов в разных частях мозга исчезала. Варела и его коллеги высказали предположение, что такая быстрая десинхронизация необходима для того, чтобы дать возможность использовать интеграционный механизм синхронизации для последующих поведенческих актов.

Следующим таким актом было нажатие клавиши на клавиатуре компьютера. И в самом деле, приблизительно через три четверти секунды после того, как было предъявлено изображение (типичное время моторной реакции на стимул), с электродов снималась следующая вспышка нейронной синхронизации, но теперь из областей мозга, соответствующих моторным функциям. В этом случае синхронизация имела место

независимо от того, было или не было узнано лицо, поскольку клавиша нажималась в обоих случаях.

Исследователей, работающих над проблемой природы сознания, эти результаты навели на мысль, что ритмическая и синхронизированная активность нейронных ансамблей могла бы служить основным механизмом сознания и осуществления координации относящихся к одному и тому же объекту активностей в разных областях коры.

В работе Кузьминой и др. в модели осцилляторной сети, имитирующей функционирование зрительной коры при распознавании зрительного образа, происходит синхронизация сетевых ансамблей, соответствующих контуру изображения, в то время как осцилляторы, соответствующие фону, остаются не синхронизированными. При этом осцилляторы, соответствующие более ярким элементам контура, синхронизируются в большей степени, чем осцилляторы, соответствующие менее ярким элементам.

Можно предположить, что в основе механизма реализации любого врожденного безусловного рефлекса, требующего высокой степени интеграции функций различных отделов мозга, также лежит механизм синхронизации, причем каждому типу безусловного рефлекса соответствует одна из собственных частот (дельта, тета, альфа, бета) электрической активности мозга.

ГЛАВА 2

ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ МОЗГА

2.1. Инстинктивное поведение

Любовь и голод правят миром.
Ф. Шиллер

Инстинктивное поведение (или безусловные рефлексы) относятся к тем формам поведения, которые не требуют обучения, поскольку необходимые для их реализации нейронные сети формируются в процессах морфогенеза, то есть их структура предопределена генетически.

К. Лоренц выделил в животном мире четыре вида первичных инстинктов: пищевое поведение, страх, репродуктивное поведение и агрессия. С точки зрения синергетики, каждый из этих первичных инстинктов можно рассматривать как соответствующий параметр порядка. Эти четыре параметра порядка взаимодействуют между собой и подчиняют себе другие формы поведения. Например, пищевому инстинкту подчиняется охотничье поведение хищников, исследовательское поведение таких животных, как мыши, собаки и т. д. Репродуктивному поведению подчиняются обряды ухаживания у животных, постройка гнезда у птиц и у некоторых рыб и т. д.

Каждый первичный инстинкт полностью формируется на разных этапах онтогенетического развития организма. Самым первым, несомненно, появляется пищевое поведение и связанное с ним удовольствие. Затем (а иногда практически одновременно с пищевым инстинктом) появляется страх как реакция на любую внешнюю угрозу. Репродуктивное поведение и связанное с ним сексуальное удовольствие в полной мере формируется в период полового созревания животного или человека, хотя и до полового созревания существуют определенные различия в поведении особей разного пола.

К. Лоренц впервые установил связь репродуктивного поведения и внутривидовой агрессии, показав, что этот вид агрессии является важнейшим фактором биологической эволюции. Лоренцом также был впер-

вые открыт и сформулирован бистабильный характер взаимодействия страха и агрессии, когда в поведении животного доминируют либо страх, либо агрессия. На основе этого наблюдения К. Зиман предложил математическую модель бистабильного взаимодействия страха и агрессии, на основе элементарной катастрофы «сборка».

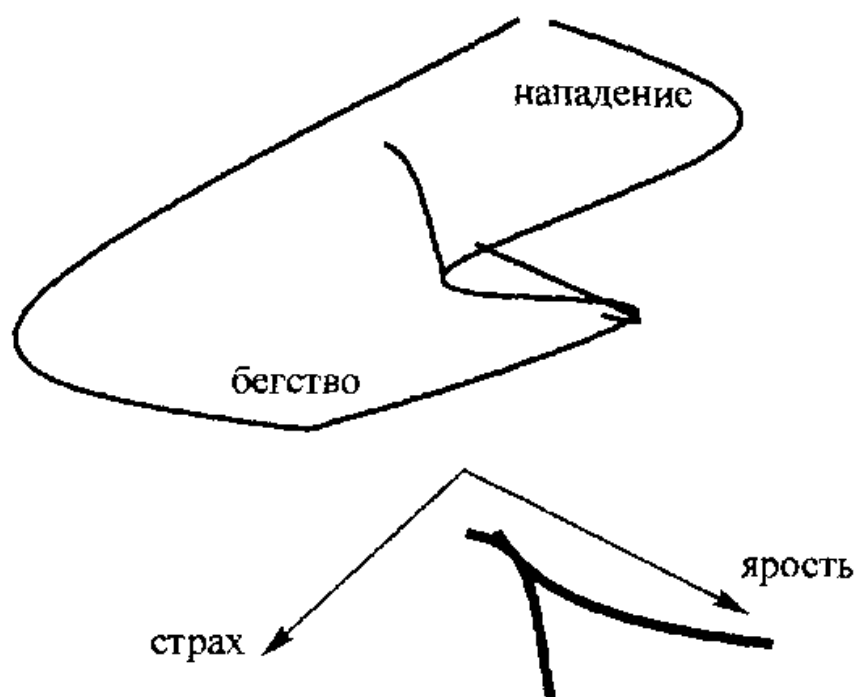


Рис. 15. Бистабильность страха и агрессии, моделируемая элементарной катастрофой «сборка».

Доминирование одной только ярости ведет к нападению. Один только страх вызывает бегство. Когда же присутствуют оба эти эмоциональные состояния, результат становится менее предсказуемым, и мы имеем дело с бимодальным состоянием.

2.2. Существует ли связь между собственными частотами мозга и инстинктивными формами поведения?

В физических науках собственные частоты и соответствующие им собственные колебания являются важными характеристиками физических объектов. Известные в настоящее время эмпирические данные и основанные на этих данных теоретические представления о роли собственных частот (δ -, θ -, α -, β -ритмов) в функционировании мозга свиде-

тельствуют об отсутствии сколько-нибудь целостной, системной концепции.

Автор полагает, что между четырьмя видами инстинктивного поведения, сформулированными Лоренцем, и четырьмя собственными частотами (δ -, θ -, α -, β -ритмами) мозга может существовать однозначное соответствие.

Предполагается, что это соответствие можно сформулировать следующим образом:

δ -ритм — пищевое поведение и удовольствие;

θ -ритм — опасность и страх;

α -ритм — репродуктивное поведение и сексуальное удовольствие;

β -ритм — агрессия.

Этот своеобразный спектр четырех базовых форм инстинктивного поведения (безусловных рефлексов) можно разбить на два временных интервала, соответствующих двум этапам в онтогенетическом развитии живого организма, — периоду до полового созревания и периоду после полового созревания.

Периоду от рождения до полового созревания соответствует интервал частот (δ, α). Собственная частота δ (0, 1–3 герца) представляет собой основной ритм новорожденных животных и человека (младенцев до 1 года) и присутствует в стадиях 3 и 4 медленного сна. Из всех четырех типов безусловных рефлексов (пищевое поведение, страх, репродуктивное поведение, агрессия) главным для всех новорожденных, несомненно, является пищевое поведение. Поэтому δ -ритм может оказаться связанным с удовольствием, получаемым от приема пищи. Если это правильно, то такая связь, скорее всего, возникла за счет синхронизации на частоте δ -ритма спонтанной составляющей активности тех областей мозга, которые связаны с пищевым поведением.

Существуют ли какие-либо эмпирические свидетельства связи δ -ритма с пищевым поведением? Имеющиеся данные носят косвенный характер.

Первое из них — это связь продолжительности медленного сна (сна без сновидений, для которого как раз характерна высокая амплитуда δ -ритма) со скоростью метаболизма в организме, который, в свою очередь, связан с пищевым поведением. Мелким млекопитающим (мыши, крысы, кошки и т. д.) свойственна более высокая скорость обмена веществ и более высокая температура тела и мозга, чем крупным. Такая высокая интенсивность метаболизма ведет к увеличению частоты повреждения свободными радикалами соответствующих нейронных структур мозга, связанных с желудочно-кишечным трактом. Видимо, во время сна

происходит восстановление мембран поврежденных клеток. Именно по этой причине мелкие животные снят дольше, чем крупные, и, соответственно, продолжительность δ -ритма оказывается в прямой зависимости от интенсивности метаболизма, а значит и от интенсивности пищевой активности.

Второе свидетельство связано с экспериментами И. Н. Пигарева из Института проблем передач информации РАН. В этих экспериментах была обнаружена четкая корреляционная связь активности гладких мускулов желудочно-кишечного тракта во время медленного сна у кошек (когда, напомним еще раз, в активности ЭЭГ доминирует δ -ритм) с активностью нейронов зрительной зоны V4A. В этом эксперименте для нас важна корреляционная связь активности мускулов желудка и активности δ -ритма.

Собственную частоту θ (4–8 герц) обычно связывают с доминантной формой активного поведения, специфического для разных животных. Для хищников, например кошек, это охотничье поведение. Для крысы это исследовательское поведение. Несомненно, в основе всех этих различных форм доминантного поведения разных животных лежит пищевой рефлекс. У детей до 13 лет θ -ритм — это доминирующий ритм, свойственный бодрствованию и сну.

Можно предположить, что пищевое поведение млекопитающего, особенно в младенческий и детский период, в той или иной степени сопровождается страхом, поскольку животное при добывании пищи может само стать объектом пищевого поведения другого более крупного и более сильного хищника. Именно в детском возрасте животное наименее защищено от различных угроз извне, и в детском возрасте из всех форм инстинктивного поведения следующим по важности после пищевого поведения является страх. Поэтому θ -ритм в процессе онтогенетического развития животного и человека мог оказаться связанным с чувством угрозы, тревоги и страха.

Важно подчеркнуть, что в норме пищевое поведение в конечном итоге должно преобладать над страхом. Обычно θ -ритм доминирует у млекопитающих, находящихся в состоянии быстрого сна. В сонном состоянии любое животное становится очень уязвимым для хищника и любых других угроз извне, и если θ -ритм действительно связан со страхом, то присутствие этого ритма в ЭЭГ спящего животного вполне закономерно.

Исследования показали, что быстрый сон у животных и человека максимален при рождении, затем его продолжительность начинает постепенно сокращаться и в зрелом возрасте стабилизируется. У животных продолжительность быстрого сна больше у тех млекопитающих,

чьи детеныши рождаются наименее подготовленными к жизни в заданных условиях. Рекорд продолжительности быстрого сна принадлежит утконосу. Она равна 8 часам. Детеныши утконоса появляются на свет слепыми и совершенно беспомощными.

Дельфины же, напротив, сразу после рождения способны регулировать температуру и спастись от хищников. У взрослых дельфинов быстрый сон полностью отсутствует. Из этих данных можно сформулировать гипотезу, что θ -ритм может быть связан с опасностью и соответствующим чувством страха.

Следующее наше предположение состоит в том, что интервалу частот (α, β) соответствует период половой зрелости и, соответственно, доминирование в поведении сексуального инстинкта и связанного с ним агрессивного поведения. Формирование α -ритма (8–12 герц) происходит в период полового созревания. У детей до 12–13 лет α -ритм очень слабый, а в ЭЭГ доминирует θ -ритм. Резкий рост α -ритма у человека наблюдается в спокойном состоянии с закрытыми глазами. Мы полагаем, что α -ритм может иметь связь со зрительными сексуальными образами, поскольку у многих животных и у человека зрение играет основную роль в поисках полового партнера. Однако в состоянии наивысшего сексуального удовольствия, когда зрение никакой существенной роли уже не играет, максимальная амплитуда α -ритма достигается при закрытых глазах. У слепых от рождения людей α -ритм вообще не формируется.

Связь α -ритма со зрительной системой, видимо, носит условно-рефлекторный характер. Для некоторых животных, живущих в густых зарослях деревьев, слух, а не зрение, играют определяющую роль в выборе партнера, и можно ожидать поэтому, что у таких животных амплитуда α -ритма связана со слухом.

Конрад Лоренц впервые подчеркнул тесную связь репродуктивного поведения с внутривидовой агрессией, выражающейся в конкуренции самцов за самку. У самок агрессия обычно связана с ситуациями угрозы для ее детеныша.

У человека связь агрессии и секса может принимать патологические формы, когда получение сексуального удовольствия связано с агрессивной направленностью на партнера. Крайняя форма такой патологии — это сексуальные маньяки-убийцы. Следовательно, β -ритмом (12–18 Гц) может быть связан последний, четвертый тип инстинктивного поведения — агрессия.

Ясно, что в амбивалентной паре (секс–агрессия) секс в норме должен доминировать над агрессией.

Подчеркнем еще раз, что изложенные выше соображения во многом гипотетичны и требуют специального изучения.

2.3. Условный рефлекс как процесс распознавания образов по неполным данным

Обнаружение И. П. Павловым условного рефлекса оказалось крупным открытием в науках о высшей нервной деятельности. Однако до сих пор отсутствует ясное понимание и объяснение природы этого явления. Между тем, можно показать, что феномен условного рефлекса может быть понят и описан на основе модели распознавания образов.

Условный рефлекс вырабатывается высшими отделами центральной нервной системы на основе одного из безусловных рефлексов (инстинктов) — голода, страха, репродуктивного поведения. В результате однократного или неоднократного сочетания какого-либо раздражителя любой модальности (звук, свет, запах и т. д.) с безусловным рефлексом образуется корреляционная связь. Например, если включить звонок в момент кормления животного и повторить эту процедуру несколько раз, то животное в следующий раз в ответ на звонок начинает вырабатывать пищевую реакцию — возникает слюноотделение, животное бежит в сторону кормушки и т. п.

Условный рефлекс можно описать как процесс восстановления полного образа по его фрагменту. Сочетание условного раздражителя (в нашем примере — звонка) и безусловного рефлекса (например, рефлекса страха) есть не что иное, как запоминание животным сложного полимодального образа.

Пусть теперь животному предъявлен только фрагмент этого сложного образа — звонок. Как уже описывалось ранее, ассоциативная память при распознавании образа способна восстанавливать исходный образ по его фрагменту или если этот образ был искажен или зашумлен. В данном случае будет происходить восстановление полного сложного образа «звонок + страх» по его фрагменту «звонок» (рисунок 15).

Предложенная модель условного рефлекса применима и для случая комплексного раздражителя, когда условный сигнал составлен из нескольких раздражителей различной модальности (световых, звуковых, тактильных). Эта же модель описывает возникновение разных условных рефлексов, когда один и тот же раздражитель воздействовал в неодинаковых условиях. Например, если звук определенной частоты в одной камере подкреплять пищей, то формируется пищевой условный рефлекс.

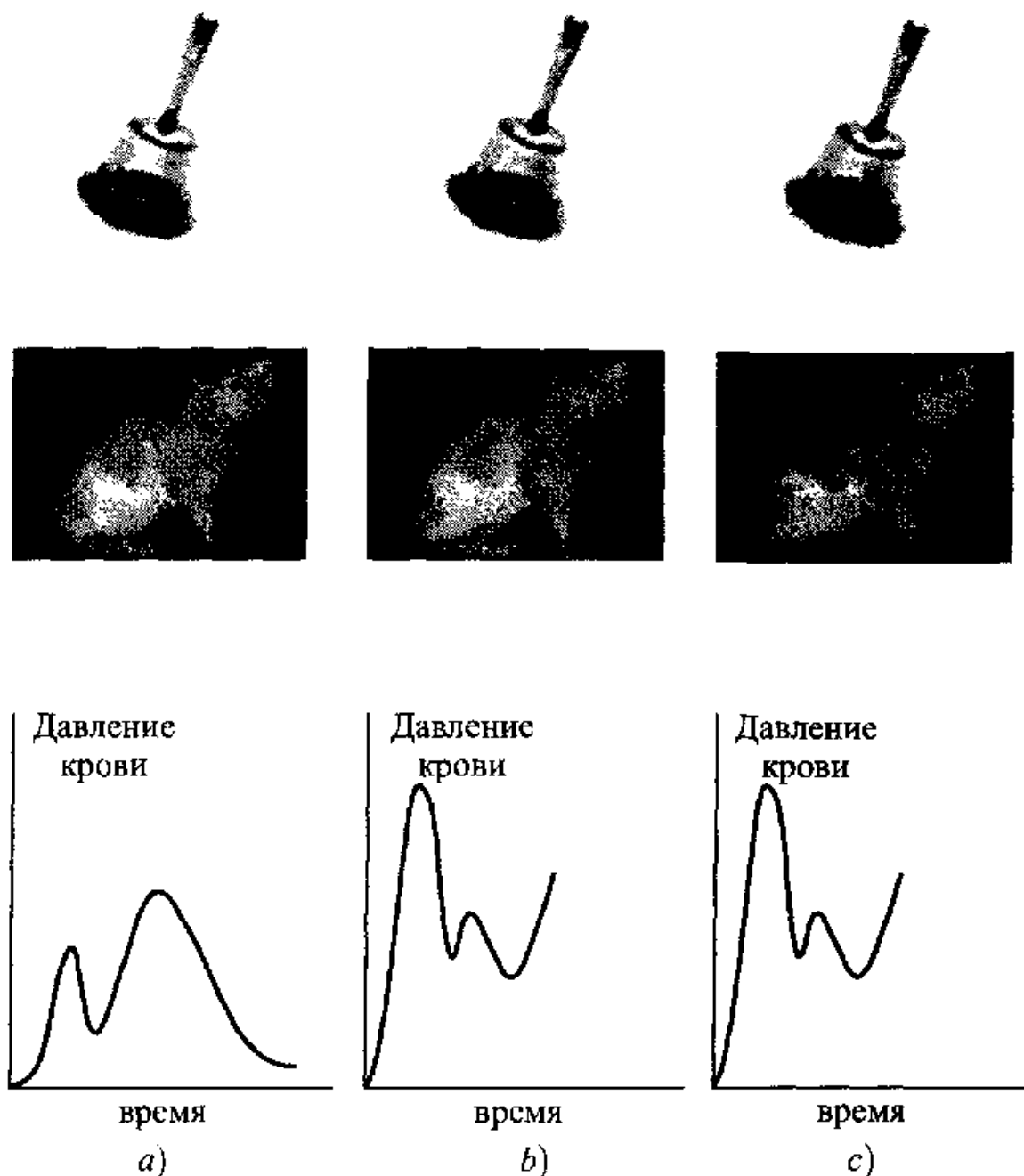


Рис. 16. Условный рефлекс есть восстановление нейронной сетью полного образа по его фрагменту: а) животное слышит звонок, в ответ на который давление крови незначительно повышается; б) сочетание звонка с ударом тока по лапе животного вызывает реакцию страха с резким повышением давления крови; в) в ответ на звонок формируется условный рефлекс страха.

Но если в другой камере под этот же звук раздражать лапу животного током, то формируется оборонительный рефлекс. В литературе это явление получило название условно-рефлекторного переключения. В обоих этих случаях разные условные рефлексы формируются по существу разными раздражителями. Животное реагирует на целостные полимодаль-

ные образы — раздражители «звук + камера 1» и «звук + камера 2». В целом эти образы различны (хотя и содержат одну одинаковую компоненту — «звук»). Поэтому и реакция животного на эти разные условные раздражители будет разной: в одном случае — пищевое поведение, в другом случае — оборонительный рефлекс.

Связь механизма условного рефлекса с феноменом распознавания образов глубоко закономерна. Животное должно уметь не просто забрать в рот лежащую возле него пищу. Ему необходимо уметь найти пищу по разным случайным или временным признакам, а это и есть процесс распознавания образов — точнее, процесс восстановления полного образа по его фрагменту.

Поскольку в реализации безусловного и соответствующего условного рефлексов участвуют различные области мозга (слуховая, зрительная, обонятельная и т. д.), это означает, что имеет место явление крупномасштабной интеграции (*large-scale integration*), в основе которого лежит еще один вид критического поведения — синхронизация. В связи с этим можно предположить, что каждый вид инстинктивного поведения связан с одной из собственных частот мозга, то есть с одной из дельта-, тета-, альфа- или бета-частот, на базе которых с использованием механизма синхронизации и реализуются все виды безусловных и соответствующих условных рефлексов.

По-видимому, аналогичные процессы возникают в ситуациях, когда требуется быстрая двигательная реакция на определенные зрительные образы. Такие ситуации широко распространены, например, в спорте: теннисе, боксе и т. д. По сути дела, в этих процессах опять встает задача восстановления полного перцептивно-моторного паттерна по его фрагменту — изображению. В работах Г. Хакена, С. Келсо и других показано, что формирование таких перцептивно-моторных паттернов происходит при участии очень небольшого числа параметров порядка.

Механизм условного рефлекса содержит синестетические явления, что подтверждает на его связь с феноменологией критических состояний.

2.4. Прогнозирование как процесс восстановления полного образа по его фрагменту

Функция прогнозирования — одно из важных свойств живой природы, в том числе и функционирования мозга. Любой живой организм представляет собой систему, стремящуюся сохранить постоянство своего

гомеостаза, то есть удерживать стабильность таких внутренних параметров, как температура, давление, химический состав и другие. В качестве механизма поддержания постоянства гомеостаза в живой природе широко используется отрицательная обратная связь — управляющая система, которая реагирует на рассогласование действительного состояния организма от заданного и определенными действиями стремится ликвидировать это рассогласование. Этот механизм сохранения гомеостаза можно назвать механизмом запаздывающего типа, поскольку компенсирующая реакция возникает после того, как на организм подействовало возмущающее воздействие, которое и привело к рассогласованию. Академик П. К. Анохина сформулировал другой очень важный и эффективный механизм поддержания постоянства гомеостаза, которому в теории автоматического управления можно сопоставить принцип разомкнутого, программного (без обратной связи) управления. Программное управление реализуется в том случае, когда существует полностью предсказуемое будущее, то есть известны не только будущие внешние воздействия на объект управления, но и реакция самого объекта управления на управляющие воздействия. Само управление реализуется в виде набора команд — программы, задающей управляющие воздействия. Примерами программного управления могут служить операционные системы для компьютеров, программы для станков с числовым управлением, управление роботами в различных видах производства (например, при сборке автомобилей) и т. п.

В живой природе примером программного управления может служить генетическая программа, результатом реализации которой является живой организм, предназначенный к существованию в определенной внешней среде.

Таким образом, концепция программного управления отражает идею классического детерминизма о полностью предсказуемом будущем.

Согласно принципу Анохина, любой живой организм, чтобы обеспечить свое выживание в определенных внешних условиях (сохранить постоянство своего гомеостаза), должен уметь заранее готовиться к тем внешним воздействиям, которые жизненно важны для его существования. Для этого вида деятельности был введен специальный термин — антиципация (от лат. *anticipio* — предвосхищаю). Антиципация проявляется во всех областях человеческой активности: трудовой деятельности, повседневной жизни, спорте и т. д. Эволюция живой системы от биологических форм к социальной организации шла по пути увеличения точности и дальности прогнозов, расширения диапазона прогнозируемых явлений. Одним из наиболее изученных проявлений принципа

опережающего отражения (принципа Анохина) на уровне нервного вещества является условный рефлекс. В этом случае принимаемый живым организмом информационный сигнал (вспышка света, звук колокольчика и т. д.) является началом подготовки организма к важному, но еще не наступившему событию. Но, как было показано выше, в основе любого условного рефлекса лежит механизм восстановления полного образа по его фрагменту.

Длительное время считалось, что возможности прогнозирования определяются главным образом точностью и полнотой информации о состоянии прогнозируемой системы. Предельно четко эта идея сформулирована Лапласом в виде фантастического существа (демона), который способен собрать всю информацию о координатах и скоростях механической системы в определенный момент времени и произвести мгновенные вычисления. Подставив эту информацию в законы физики в качестве начальных условий, такой демон способен прогнозировать не только будущее, но и прошлое, поскольку законы физики обратимы во времени.

Только сравнительно недавно — около двадцати лет назад — стало понятно, что возможности прогнозирования поведения системы определяются, главным образом, устойчивостью этой системы. Если система устойчива, то ее поведение хорошо прогнозируется. Например, мы можем предсказать с высокой точностью и практически на любую дальность (как в будущее, так и в прошлое) такие астрономические явления, как солнечные и лунные затмения. Это оказывается возможным по той причине, что Солнечная система устойчива — по крайней мере, на временном отрезке, сравнимом с периодом существования человеческой цивилизации. Но и в астрономических процессах можно встретить проявления неустойчивостей, например, связанные с движением комет, и в этом случае уже невозможны какие-либо точные прогнозы.

Механизмы прогнозирования в мозге животных и человека в последнее время стали более понятными благодаря компьютерной имитации этих процессов в искусственных нейросетях — многослойных персептронах, в которых осуществляется послойная обработка информации.

Фактически задача прогнозирования с помощью нейронных сетей сводится к задаче аппроксимации (интерполяции) многомерной функции. По сути дела, речь идет опять о задаче восстановления полного образа по его фрагменту, которую должны уметь решать все системы распознавания образов.

Доказано, что уже двух слоев нейронов в персептроне достаточно, чтобы такая сеть могла аппроксимировать любую непрерывную многомерную функцию с произвольной точностью. Такие сложные системы,

как торговая биржа, атмосфера Земли и т. д. не поддаются моделированию с достаточной степенью точности. Однако поведение одного из показателей, характеризующего состояние такой сложной системы, может быть спрогнозировано по результатам регистрации значений этого показателя на достаточно большом временном интервале.

В настоящее время наиболее типичной задачей прогнозирования с помощью искусственных нейронных сетей является предсказание финансовых временных рядов — например, стоимости акций.

2.5. Сознание, подсознание, сверхсознание

Для объяснения **сознания** необходимо дать четкое определение этого феномена. Остановимся на предложенном П. В. Симоновым определении: сознание как знание, которое может быть передано (сообщено) человеком другим членам сообщества, в том числе другим поколениям с помощью слов, математических формул, произведений искусства и т. д. Эта информация в любой момент может быть использована самим человеком, перенесена на другие носители и т. п.

«Сознание есть знание вместе с кем-то (сравни с со-чувствием, со-переживанием, со-трудничеством)». [П. В. Симонов. Лекции о работе мозга. Москва, Наука, 2001. с. 66].

Способность передавать свои знания, означает, что человек способен отделять себя не только от других людей, но и от окружающего их мира, знания о котором он также может передать. Появляется возможность диалога не только с другими, благодаря чему человек может смотреться, как в зеркало, в другого человека, но и мысленный диалог человека с самим собой, то есть ведет к появлению самосознания.

Феномен сознания и связанные с ним явления (язык, искусство, наука) есть следствие того, что мозг каждого члена общества находится в критическом состоянии и имеет связь с мозгом хотя бы еще одного члена общества, как бы образуя одну общую нейронную сеть. Таким образом, сознание, как качественный феномен, есть кооперативное, критическое явление.

В самом деле, если две нейронные сети (два мозга) находятся в критическом состоянии и связаны между собой, то благодаря фундаментальному свойству критических флуктуаций распространяться на дальние расстояния (явление скейлинга) эти две сети можно рассматривать как одну сеть, находящуюся в критическом состоянии. При этом изменения в одной части сети сказываются на свойствах другой части. Следова-

но, появляется возможность обмена информацией между этими частями, а это и есть основное свойство сознания.

Возникает необходимость обеспечения связи между этими двумя нейронными сетями, чтобы была физическая возможность распространения критических флуктуаций. Такую связь обеспечивают голосовые и слуховые органы человека, а сам язык представляет собой запомненный случайный выбор ассоциативных связей, аналогичных ассоциативным связям, возникающим при условном рефлексе.

Таким образом, при наличии связи между нейронными сетями, находящимися в критическом состоянии, благодаря явлению скейлинга, появляется возможность передавать информацию из любой части таких нейронных сетей в любую другую ее часть.

2.5.1. Язык как сетевая структура со свойствами «тесного мира». **Сетевые свойства языка.**

Возникновение языка представляет собой одно из важнейших явлений в биологической эволюции. В сущности, возникновение языка означало возникновение сознания, и на протяжении примерно двух миллионов лет имела место коэволюция языка и мозга человека. Этот постепенный процесс, по всей видимости, начался с резкого перехода от собственной многим животным несинтаксической к синтаксической коммуникации. Человеческий язык позволяет создавать фактически бесконечное число новых комбинаций слов из конечного набора базовых элементов. Процесс генерации речи является удивительно быстрым и довольно устойчивым, что указывает на надежность самого механизма.

Все слова появляются связанными в предложения и, следовательно, можно с уверенностью говорить о существовании связей между словами — синтаксической, семантической (смысловой) либо, благодаря стереотипным выражениям, например, «полегче на поворотах», «Вышний Волочок» и т. д. Поэтому мы будем определять существование связей между двумя словами как возможность их появления в одном осмысленном предложении. На рисунке дан пример простой лингвистической сети, построенной на основе четырех предложений. «Сергей любит пельмени», «Сергей пишет книгу», «Маша любит конфеты», «Маша пишет письмо».

В 2001 году была сконструирована сеть для английского языка, в которой узлами являются слова. Два слова считаются связанными между собой, если оба слова могут появиться в предложениях рядом или если они несут приблизительно одинаковый смысл. Было обнаружено,

что такая сеть, содержащая 440902 слова, имеет высокий коэффициент кластеризации $C = 0,437$ и два режима степенного закона распределения. Слова с числом связей $k < 10^3$ распределены с показателем степени $\gamma = 1,56$, а слова с $10^3 < k < 10^5$ описываются степенным законом с $\gamma = 2,7$.

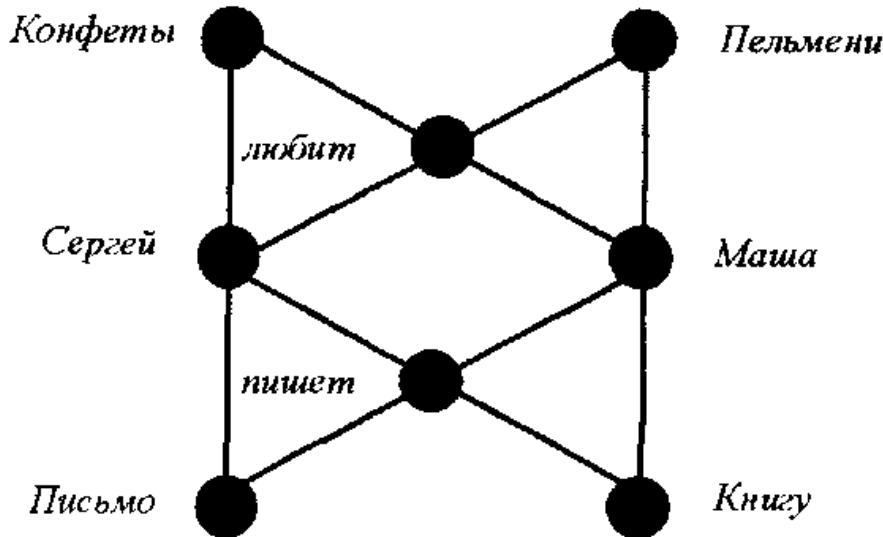


Рис. 17. Лингвистическая сеть, построенная на основе предложений «Сергей любит пельмени», «Сергей пишет книгу», «Маша любит конфеты», «Маша пишет письмо».

Такая сеть обладает свойствами «тесного мира» с длиной примерно два с половиной слова. То есть любое слово этого огромного лексикона может быть достигнуто от любого другого слова менее чем через три промежуточных слова.

Несомненно, уменьшению этой длины способствует то обстоятельство, что многие слова естественного языка имеют несколько смыслов (свойство неоднозначности естественных языков). Такая архитектура сетей естественных языков увеличивает эффективность поиска информации, поскольку даже очень разные слова разделены в такой сети всего 2–3 словами, и это гарантирует быстрый поиск, что, в свою очередь, обеспечивает быстроту процесса генерации устной речи.

Сложная словарная сеть языка есть результат эволюционного процесса, в ходе которого добавляются новые слова, и эти новые слова с высокой степенью вероятности присоединяются к уже существующим словам, имеющим наибольшее число связей с другими словами.

Если свойства «тесного мира» естественного языка сформировались в процессе эволюции как необходимость быстрого поиска (быстрой на-

вигации), можно предположить, что должны существовать специальные слова, основное назначение которых — увеличивать скорость навигации. Наилучшими кандидатами для таких целей являются артикли, предлоги и союзы, которые принадлежат к наиболее часто используемым словам в любом языке (например «and», «the», «of», «in», «a», «to», «as», «with», «by», «is» в английском языке).

При нарушении мозговых функций, по всей видимости, страдают в первую очередь именно навигационные свойства, в которые вовлечены эти наиболее часто употребляемые слова, поскольку в речи таких больных предлоги и союзы часто отсутствуют и речь становится замедленной и затрудненной. Хотя безмасштабные сети очень устойчивы к случайным удалениям узлов, однако удаление наиболее связанных узлов ведет к распаду сети на части.

2.5.2. Язык и сознание. Закон Ципфа

Возникновение языка — уникальное явление в биологической эволюции и представляет собой главную отличительную особенность человека от животных. Основным универсальным количественным законом в лингвистике, справедливым для всех естественных языков, является степенной закон распределения слов. Впервые этот закон был открыт в 1949 году лингвистом Гарвардского университета Г. Ципфом (George Kingsley Zipf). За прошедшее время было предложено несколько моделей, объясняющие возникновение закона Ципфа, однако ни одну из них нельзя признать удовлетворительной.

Лишь совсем недавно Р. Феррери Канчо (Ramon Ferreri i Cancho) и Р. Соле (Ricard Sole) предложили модель возникновения языка как критического явления, и закон Ципфа стал естественным свойством этой модели. Это согласуется с тем, что любое принципиально новое явление в биологической эволюции связано с феноменологией критических явлений.

Модель основана на естественном предположении, что говорящий стремится к краткости и лаконизму, чтобы минимизировать свои усилия. В предельном случае говорящему хотелось бы передать сообщение одним словом.

Слушающий, напротив, чтобы легче было понять сказанное, хотел бы, чтобы сообщение было максимально развернутым. Реальное сообщение всегда есть компромисс между требованиями говорящего и слушающего.

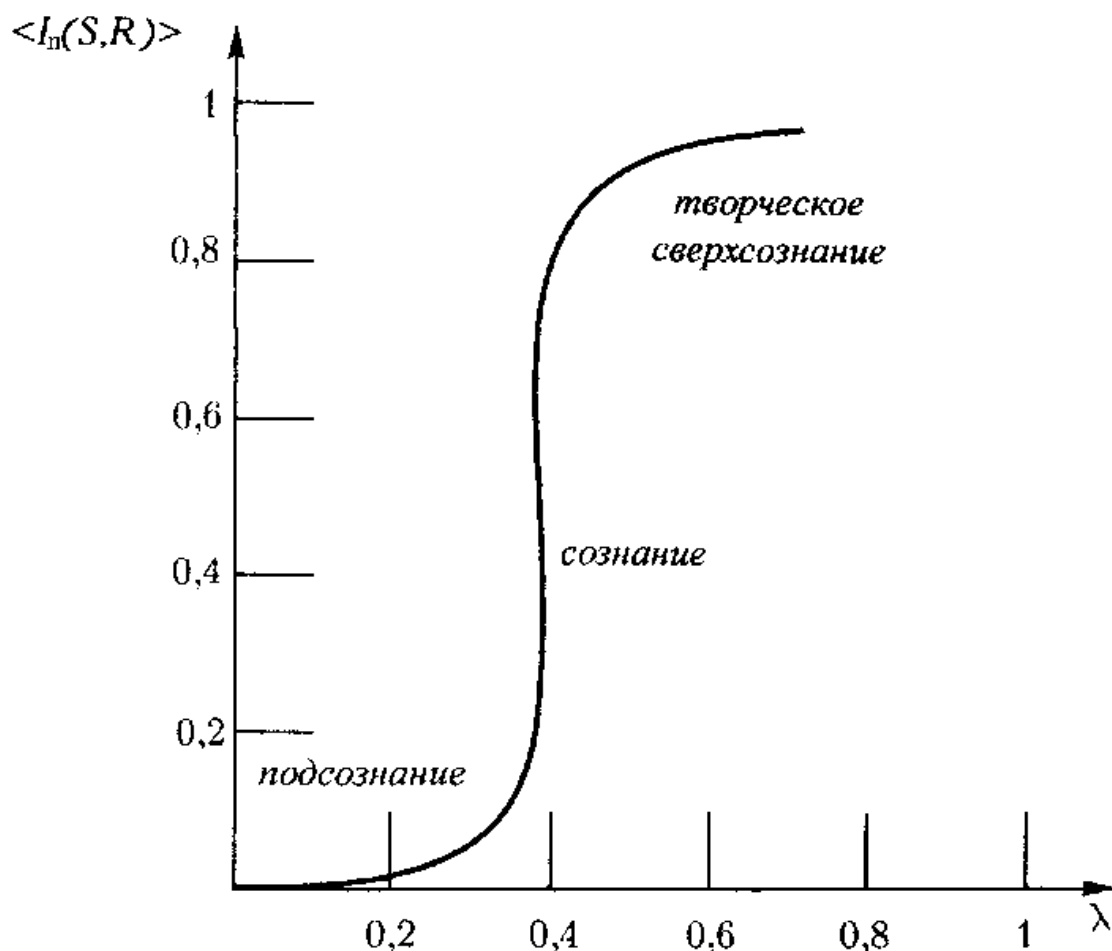


Рис. 18. Возникновение сознания как фазовый переход. $\langle I_n(S,R) \rangle$ — усредненная взаимная информация. (Адаптировано из работы Cancho R., F., Sole R. (2003) Least Effort and the Origins of Scaling in Human Language. PNAS, vol.100, No 3, 788-791, рисунок 1.)

Феноменологически возникновение сознания можно описать как фазовый переход на основе элементарной катастрофы «сборка» (рисунок 18). Управляющий параметр λ представляет собой среднее число нейронов, возбуждающихся одним нейроном мозга.

В модели Канчо Феррери и Соле язык возникает скачком, а не постепенно. То есть не существует промежуточного состояния между богатством человеческого языка и ограниченными сигнальными возможностями некоторых животных. Когда этот скачок произошел, частота использования различных слов во всех языках, как оказалось, подчиняется одному и тому же закону — степенному закону Ципфа.

Эта модель позволяет глубже понять природу связанных с сознанием явлений — подсознания и сверхсознания.

Подсознание — это набор программ поведения, заученных в процессе развития, успевших автоматизироваться, ставших навыками.

С точки зрения физики, это означает, что данная функциональная система мозга находится в докритическом состоянии и вследствие отсутствия дальних корреляций коммуникация между говорящим и слушающим отсутствует.

Нейрофизиологические исследования действительно показывают, что при восприятии повторяющихся процессов вовлечено значительно меньше нейронов, чем при восприятии новизны, что указывает на то, что в физическом смысле подсознанию отвечает докритическое состояние мозга, когда отсутствуют дальние корреляции.

В этом случае для входящего извне сигнала доступ имеется только к локальной части мозга, подобно тому, как песчинка, падающая на кучу песка в докритическом состоянии, может вызвать лишь небольшую лавину в ограниченной области места падения. Именно поэтому информация, хранящаяся в мозге в этом докритическом состоянии (подсознании), не доступна для передачи другим. Такая форма психической деятельности сознанием также не контролируется и благодаря этому мозг защищен от излишних нагрузок.

В феномене сознания отдельно выделяют еще одно состояние: **сверхсознание** — творческую интуицию или вдохновение. С точки зрения физики, мозг в этом случае находится в надкритическом состоянии, которое можно наблюдать и в физических системах при определенных условиях. Например, если к куче песка, находящейся в критическом состоянии, аккуратно добавлять по одной песчинке, то можно достичь надкритического состояния, когда угол наклона этой кучи песка будет превышать критический.

В случае, когда мозг находится в надкритическом состоянии, сигнал извне или флуктуация в самой нейронной сети вызывает взрывоподобный эффект цепных реакций и соединяет вход нейронной сети буквально со всей информацией, хранящейся в мозге.

Исследования последнего времени выявили, что глиальные клетки мозга, на которые в прошлом никто не обращал никакого внимания (хотя их в мозге примерно на порядок больше, чем нейронов), играют в когнитивных процессах не менее важную роль, чем сами нейроны. Глия влияет на формирование синапсов, на силу межнейронных связей, воздействует на активность нейронов. Можно предположить, что индивидуальные морфологические особенности расположения клеток у каждого человека определяют способности мозга переходить в надкритическое, метастабильное состояние, то есть определяет его творческие способности.

В. П. Эфроимсон в монографии «Гениальность и генетика» предложил некоторые механизмы поддержания мозга в надкритическом со-

стоянии. Это, например, повышенное содержание в организме мочевой кислоты, структура которой аналогична структуре кофеина и теобромина — хорошо известных стимуляторов умственной активности. Такое повышенное содержание мочевой кислоты примерно в полтора раза против нормы наблюдается у больных подагрой.

Мозг ребенка, несомненно, также находится в надкритическом состоянии, и этим объясняется повышенная творческая активность детей по сравнению со взрослыми. Благодаря тому, что сверхсознание не контролируется сознанием, возникают явления подражания в поэзии, заимствования в музыке, переформулировка результатов в научной деятельности. Сознание осуществляет окончательный отбор вновь созданной информации.

Религиозное сознание также относится к фазе сверхсознания. Религия возникает оттого, что небольшая часть людей обладает способностью ощущать и чувствовать острее и сильнее, чем остальные люди. Такие люди зачастую способны лучше чувствовать опасность и могут предупредить о ней других людей. Несомненно, у отдельных представителей первобытных людей такие способности были (они есть и у животных), и такие люди способны повести за собой остальных. У них появляется ощущение своей сопричастности космическим процессам. Это и есть религиозное чувство.

Феномен языка и сознания соответствует промежуточному критическому состоянию, когда интересы говорящего и слушающего сбалансированы, и только в этом случае имеет место степенной закон частоты распределения слов — закон Ципфа.

Чтобы реализовать эту возможность, необходим механизм связи между нейронными сетями. Таким механизмом является, прежде всего, естественный язык. Данные нейрофизиологии подтверждают неразрывную связь сознания и речевых структур головного мозга. Так, например восстановление сознания у больных с тяжелыми формами поражения мозга совпадает по времени с восстановлением связей между моторно-речевыми зонами левого полушария.

Рассмотрим подробнее, как язык обеспечивает такую связь. Механизм передачи информации с помощью слов аналогичен рассмотренному выше механизму условного рефлекса, где слово играет роль условного раздражителя (звонка, вспышки света и т. п.). С этим словом связывается определенный зрительный образ или определенный двигательный паттерн. Условный рефлекс у животных и человека создается на базе безусловных рефлексов, имеющих устойчивую врожденную нейрофизио-

логическую структуру. У человека, благодаря тому, что его нейронные структуры находятся в критическом состоянии, появляется возможность создавать такие полимодальные структуры не только с безусловными рефлексам, но и с любыми хранящимися в его памяти зрительными образами и двигательными паттернами.

Если это зрительный образ или абстрактная категория (понятие), то соответствующее слово существительное.

Если это двигательный паттерн, то соответствующее слово — глагол.

Каждое распознавание слова слушающим есть восстановление сложного полимодального образа по его фрагменту, то есть представляет собой неравновесный фазовый переход. Как уже упоминалось выше, язык формируется по законам самоорганизующихся сетей, которые есть одно из проявлений феноменологии неравновесных критических состояний. Можно предположить поэтому, что именно язык является основным механизмом формирования сознания как критического состояния мозга человека.

Сознание является новым параметром порядка, появляющимся у человека и выделяющим его из мира животных. Этот новый параметр порядка, взаимодействуя с четырьмя другими параметрами порядка — инстинктивными формами поведения, — определяет все свойства человеческого сообщества. Например, взаимодействие сознания с сексуальным инстинктом значительно увеличивает возраст полового созревания у человека по сравнению с человекообразными обезьянами.

Творческой деятельности человека присущи все качественные свойства неравновесных критических состояний. Рассмотрим некоторые из них.

Резкие скачкообразные переходы, свойственные параметру порядка в процессах самоорганизации, имеют место и в творческом процессе. Именно с таким скачком в творческом, продуктивном мышлении соотносят в психологии творчества озарение, скачок мысли, инсайт, в результате которого рождаются качественно новые идеи. Для шаблонного, репродуктивного мышления свойственно стремление свести задачу к уже известным случаям, воспользоваться уже готовыми способами.

Бифуркации, ведущие к дивергенции. С нелинейными свойствами моделей развития связан еще один вид поведения в критических точках — ветвление решений, когда в точке бифуркации нарушается единственность решения.

В биологии развития в таких случаях говорят о дивергентности, которая ведет к увеличению разнообразия видов. Это свойство является

важным фактором адаптации живых организмов к изменяющимся условиям внешней среды.

В психологии мышления и творчества есть понятие дивергентности мышления, означающее свойство мышления расходиться в разных направлениях. Американский психолог Гилфорд считает это свойство наиболее важным в творческой деятельности. В самом деле, творчество означает создание качественно нового, а в результате ветвления решений дифференциальных уравнений как раз появляются качественно новые свойства в поведении соответствующих систем.

Отбор и конвергенция. После прохождения стадии дивергенции в развивающихся системах наступает процесс отбора, в ходе которого уменьшается разнообразие ранее возникших форм, растет упорядоченность в системах, уменьшается стохастичность. В настоящее время построено достаточно много математических моделей, описывающих конвергенцию в живой природе.

В научном творчестве тоже рано или поздно наступает этап, когда необходимо вписать предложенные модели и идеи в существующую систему знаний, отобрать окончательный, наиболее правильный вариант. Предложены даже математические модели конкуренции различных теорий в науке, похожие на модели конкуренции видов в биологических системах.

Конвергенция имеет место и в художественном творчестве. В процессе работы над художественным произведением автор пробует различные варианты и в конце концов оставляет один — с его точки зрения, наиболее удачный.

2.6. Сон и бодрствование

Период бодрствования животного и человека — это критическое состояние большей части его мозга. Благодаря этому критическому состоянию мозга появляется возможность быстро и адекватно адаптироваться к изменяющейся внешней среде. Но при этом имеются еще области мозга, осуществляющие стереотипное поведение, и они находятся в докритическом состоянии. Видимо, сюда же записывается накапливаемая в период бодрствования информация.

В период бодрствования у животного реализуется так называемое доминантное поведение, организуемое с помощью организма синхронизации на частоте θ -ритма. У хищников это охотничье поведение, у других животных это исследовательское поведение. В процессе реализа-

ции такого поведения животное собирает и запоминает двигательную и зрительную важную для его выживания информацию, в виде «записи» движения его конечностей и движения глазных яблок.

Ввиду того, что нейронная сеть мозга имеет ограниченную возможность для запоминания, происходит насыщение памяти и возникает необходимость избавиться от ненужной информации и сохранить полезную, связанную с локализацией пищи, источников опасности и т. д. Соответствующая обработка информации происходит во время той фазы сна, при которой области мозга, связанные с накопившейся информацией, переходят в критическое состояние и эта информация становится доступной для обработки, в том числе и для стирания. Именно эта фаза сна называется **REM-фазой**, в процессе которой мы видим сны.

Сон — это, видимо, докритическое состояние той части мозга, которая во время бодрствования находится в критическом состоянии, то есть в состоянии сознания. Исследования электрической активности мозга во время сновидений выявили высокоамплитудные колебания на частоте θ -ритма, соответствующего как, мы знаем, доминантному поведению животных. Генерация этого ритма в гиппокампе во время сна, видимо, и обеспечивает «проигрывание» во время сна накопленной во время бодрствования информации и соответствующее стирание ненужной информации.

Для того чтобы при генерации θ -ритма сну не мешало движение ног, происходит ингибирование двигательных нейронов. Движение же глазного яблока сна не нарушает, и потому соответствующее движение глаз во время сна не затормаживается.

Отметим, что у ехидны — млекопитающего, откладывающего яйца, θ -ритм во время сна, отсутствует, но этот ритм присутствует в ее пищевом поведении. При этом у ехидны кора переднего мозга занимает значительно большую долю всего мозга, чем у млекопитающих более позднего этапа эволюции, включая человека.

Поскольку ехидна не в состоянии обрабатывать всю приходящую информацию во время сна ввиду отсутствия для этой процедуры механизма θ -ритма, она вынуждена делать это в период бодрствования, и именно для этого ей необходим большого размера кора переднего мозга. Дальнейшее развитие этой способности стало невозможным ввиду ограниченных размеров черепа, и потому эволюция нашла новый механизм обработки информации во время **REM-сна** у млекопитающих. Эксперименты показали улучшение запоминания пространственного расположения объектов во время **REM-сна**. Если животное было искусственно лишено **REM-сна**, то закрепление объектов в памяти не происходит.

2.6.1. Гипноз

Явление гипноза известно человеку с очень давнего времени, однако до сих пор науки о мозге не дали сколько-нибудь удовлетворительного объяснению этому феномену. Несомненно, это явление связано с фундаментальным свойством мозга — его функционированием вблизи критического состояния. Мы рассмотрим явление гипноза только у человека, поскольку здесь оно выражено в наиболее наглядной форме.

Гипнотизер переводит области мозга, соответствующие сознанию гипнотизируемого, в докритическое состояние. При этом области мозга, соответствующие подсознанию гипнотизируемого, переводятся в критическое состояние. В результате возникает связь сознания гипнотизера с областями мозга гипнотизируемого, соответствующими в норме его подсознанию, а соответствующая информация становится доступной для гипнотизера. Кроме того, двигательная система гипнотизируемого через механизм раппорта переводится в надкритическое состояние, благодаря чему становится возможной мобилизация и концентрация ресурсов организма. Мы не обсуждаем здесь возможный механизм концентрации ресурсов в надкритическом состоянии сложных систем, поскольку это требует специальных исследований. Возможно, аналогичные механизмы реализации ресурсов имеют место в методиках восточных боевых искусств.

В 1990 году автором была предложена феноменологическая теория перехода в гипнотическое состояние на основе элементарной катастрофы «бабочка»:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{d}{dx}(ax + bx^3 + cx^3 + dx^4 - x^6).$$

В этом уравнении параметр порядка — среднее число нейронов, которое возбуждает один нейрон в двигательной системе, которое коррелирует со степенью концентрации ресурсов в поведенческой реакции.

Параметры:

a — описывает внушаемость гипнотизируемого;

b — сила внушения со стороны гипнотизера;

c — психофизиологический индекс гипнотизируемого по шкале «психостения — истерия»;

d - раппорт.

Переход в гипнотическое состояние описывается этой моделью как фазовый переход, а также некоторые другие качественные свойства.

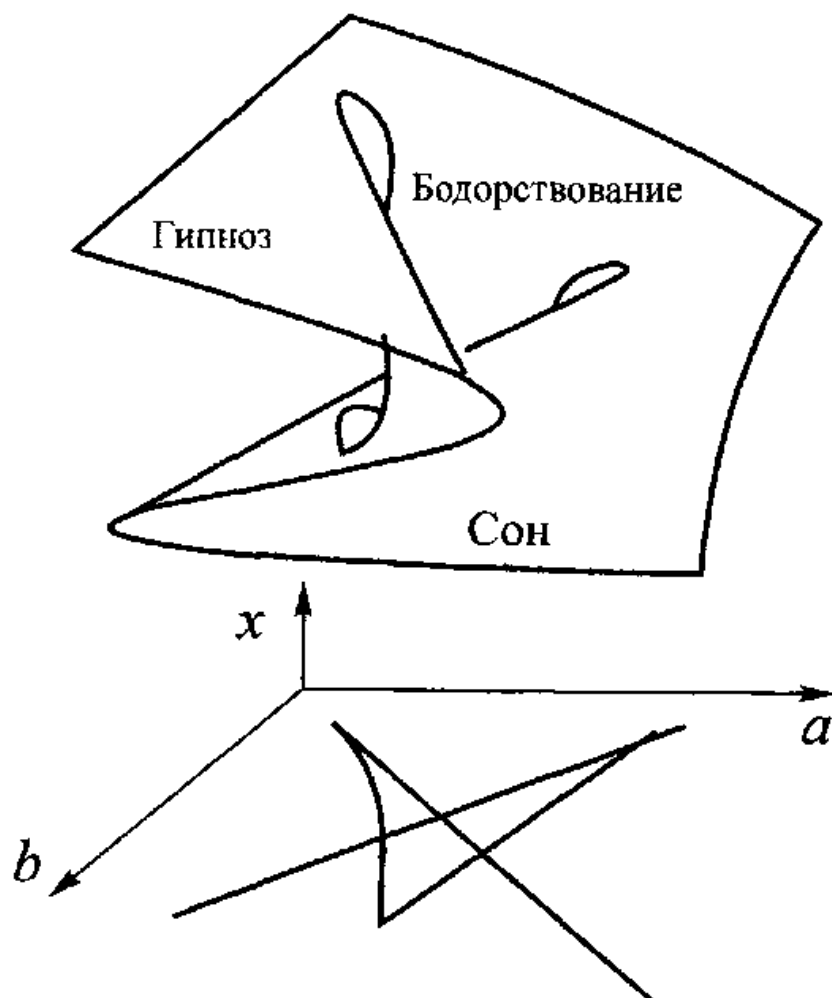


Рис. 19. Феноменологическая модель перехода в состояние гипноза на основе элементарной катастрофы «бабочка».

2.7. Информация и творческий процесс

Анализ роли информации в творческом процессе имеет два взаимосвязанных аспекта: проблема возникновения и проблема использования информации в творческой деятельности. Но прежде чем обсуждать эти проблемы, целесообразно остановиться на роли информации в биологическом развитии.

Для биологии этот вопрос является одним из центральных. Он важен для понимания двух основных процессов в биологии: онтогенеза — индивидуального развития организма из оплодотворенной яйцеклетки во взрослую особь и филогенеза — эволюционного развития организмов от низших форм к высшим.

В целом онтогенез так похож на филогенез, что одно время утверждалось, что онтогенез есть краткое, сжатое повторение филогенеза (принцип Геккеля). Но между этими процессами есть и существенные

различия, и главное из этих различий заключается как раз в вопросе возникновения информации.

Возникновение и накопление информации требует выполнения по крайней мере двух условий:

1. Условие выбора. Чтобы был возможен выбор, необходимо наличие множества устойчивых стационарных состояний, в которые может переходить развивающаяся система.

2. Условие памяти. Возникающая в результате случайного выбора информация должна запоминаться.

Качественная теория динамических систем позволяет четко сформулировать различие между понятиями отбора и выбора. Если есть несколько стационарных состояний, то мы имеем дело с выбором. Если устойчивое состояние только одно, можно говорить лишь об отборе. Информация возникает только в результате запоминания случайного выбора. При отборе происходит лишь реализация априорно заложенной информации, а новой информации не возникает. Следовательно, информация может возникать только в нелинейных системах, где есть точки бифуркации и ветвление решений, в которых и происходит случайный выбор.

В процессе индивидуального развития, то есть при оттогенезе, случайные события никакой существенной роли не играют. В самом деле, если бы это было не так, было бы крайне маловероятно, что взрослые однояйцевые близнецы окажутся похожими. Но поскольку абсолютно одинаковые близнецы встречаются, это означает, что онтогенез есть полностью динамический процесс и, следовательно, новой информации в ходе его не возникает, а лишь реализуется имеющаяся генетическая информация.

Напротив, в ходе филогенеза постоянно встречаются ситуации, когда результат заранее не predetermined, и путь, по которому пойдет эволюция, зависит от случайного выбора. Этот случайный выбор запоминается в генетической программе и затем реализуется в онтогенезе.

Обратимся теперь к проблеме использования информации в творческом процессе. Сущность этой проблемы может быть понятна на основе термодинамического подхода. Как известно, в термодинамике энтропия выражает степень неопределенности, степень отсутствия информации о состоянии микроскопической системы. Информация же, наоборот, характеризует степень нашего знания о системе. Приток информации в систему ведет к уменьшению ее неопределенности, то есть уменьшает ее энтропию, увеличивает упорядоченность.

В развивающихся системах живой природы (как в биологических,

так и социальных) приток информации сокращает число вариантов выбора, сокращает поиск в процессе достижения необходимого стабилизированного состояния в данной среде. Так, например в биологических системах приток информации происходит в процессе полового скрещивания, и это существенно ускоряет темп биологической эволюции по сравнению с эволюцией в неживой природе, сокращает время приспособления организмов к изменяющимся условиям внешней среды. Отметим, что для сокращения выбора годится не любая, а строго определенная (ценная) информация. Для фильтрации необходимой информации в природе созданы специальные механизмы. Так в скрещивании могут участвовать партнеры определенного вида, иначе рецепция информации становится невозможной. Проблема содержания (качества, смысла, ценности) информации в настоящее время — одна из центральных в синергетике, и к ней мы вернемся чуть позже. Наиболее эффективен отбор и использование информации в социальной системе, где используется информация не только по вертикали (от родителей к детям, как в биологических системах), но и главным образом по горизонтали — как передача опыта, знаний, умений и т. д. Как мы убедились, в этом и заключается феномен сознания. За счет этого резко сокращается время выбора оптимального варианта, и этим же можно объяснить существенно большую скорость социальной эволюции по сравнению с биологической эволюцией.

Обсудим теперь проблему возникновения информации в творческом процессе. В художественном творчестве доля случайного выбора, несомненно, очень велика. Конечный результат творческого процесса в искусстве в очень большой степени определяется личностью автора, его прошлым опытом, его окружением и т. д. Поэтому чтобы в полной мере понять творчество писателя, композитора, художника, нужно знать его биографию, знать эпоху, в которой он творил. Вот почему нам интересны любые новые факты, связанные с жизнью Пушкина, с людьми, его окружавшими. Таким образом, в результате художественного творчества происходит возникновение новой информации, и в этом оно аналогично филогенезу.

В научном творчестве любой правильный конечный результат не зависит от каких-либо субъективных, индивидуальных или случайных факторов. Конечно, и в научном творчестве есть свобода в выборе проблем и методов исследования, сам ход творческого процесса в большой степени определяется личностью ученого, но результат всегда заранее предопределен, поскольку он отражает объективные природные процессы. Ученый выявляет содержащуюся в природе информацию, но новой информации не создает, и в этом смысле научное творчество аналогично

онтогенезу. Однако уже в техническом творчестве, в деятельности конструкторов и всех разработчиков новой техники происходит создание новой информации, поскольку любая техническая конструкция неизбежно несет в себе, в явном или неявном виде, черты личности ее создателя.

В процессах выбора новое часто возникает как не существовавшее ранее сочетание старого, и чтобы сохранить это старое как материал для создания нового, необходима память. В биологическом развитии структурами, в которых запоминается случайный выбор, являются молекулы ДНК.

В изучении процессов рецепции информации целесообразно ввести понятие сложности, уровня развития информации. Ясно, что сообщение о результатах теории относительности более сложно, находится на более высоком уровне развития, чем сообщение о поведении тел на наклонной плоскости. Научная теория — это некоторая логическая конструкция, элементами которой являются понятия, связанные между собой. Чем сложнее теория, чем более развита взаимосвязь ее понятий, тем большее количество информации требуется для полного описания этой теории. А. Н. Колмогоров предложил длину такого сообщения принять за меру сложности системы.

Понятие ценности информации часто иллюстрируется таким примером: ценность учебника высшей математики равна нулю для первоклассника (он его не способен усвоить), имеет максимальную ценность для студентов первых курсов и снова равно нулю для академика-математика (он для него тривиален).

Здесь следует помнить, что сравнение ценности информации имеет смысл только для одной цели. Ясно, что ценность учебника высшей математики для студента театрального ВУЗа также равна нулю, хотя этот студент в принципе способен усвоить такую информацию. Для академика содержащаяся в учебнике информация может иметь ценность в его педагогической деятельности. Восприятие сложной информации возможно только при адекватном уровне развития тезауруса (базы знаний).

Г. Хакеном сделана попытка объединить теорию информации с теорией динамических систем. Информационное сообщение рассматривается в этом подходе как один из способов перевода динамической системы из одного аттрактора в другой аттрактор. Параметр порядка играет роль информатора о состоянии сложной системы, поскольку благодаря появлению этой макроскопической переменной происходит гигантская компрессия информации; отпадает необходимость описывать состояние каждого элемента самоорганизующейся сложной системы.

Справедливость утверждения Г. Хакена о том, что параметр порядка является наиболее информативным элементом сложной самоорганизующейся системы, наглядно можно проиллюстрировать на примере художественных произведений. Во многих таких произведениях параметрами порядка служат наиболее неправдоподобные, неожиданные события. Но именно такие события, согласно классическому определению информации, наиболее информативны, поскольку вероятность их осуществления близка к нулю. Неслучайно названия и обозначения таких событий часто выносятся в заглавия художественных произведений.

Интересно взглянуть на взаимосвязь мозга человека и произведения искусства, находящихся в критическом состоянии, с точки зрения теории информации. Информационный обмен $I(A, B)$ между мозгом (B) и искусством (A) можно описать хорошо известным из менноновской теории информации выражением:

$$I(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B).$$

Здесь $H(A)$ — энтропия произведения искусства, как мера его степени свободы;

$H(B)$ — энтропия мозга;

$H(A, B)$ — энтропия взаимосвязи (корреляции) между мозгом и искусством.

Энтропия мозга и произведений искусства в критическом состоянии максимальны, а энтропия их взаимосвязи минимальна (максимальна величина корреляции).

Следовательно, в критическом состоянии информационный обмен между произведением искусства и мозгом максимален. Таким образом, есть все основания полагать, что искусство есть тот инструмент, с помощью которого мозг человека поддерживается вблизи критического состояния.

Этот результат указывает также на то, что сценарий самоорганизованной критичности не применим для объяснения механизма работы мозга вблизи критического состояния.

2.7.1. Мышление и распознавание образов

Принятие решений сводится к выбору того класса обучающего множества (набора уже известных прецедентов), к которому принадлежит данный объект. Восстановление полного образа по фрагменту — это логическое мышление.

При интуитивном распознавании и прогнозировании идет обращение к другим обучающим множествам, в ходе которого проверяется, действует ли там решающее правило (то есть алгоритм, позволяющий отнести экзаменуемый объект к одному из классов) (подробнее см. книгу Д. С. Чернавский «Синергетика и информация»).

Мышление человека в значительной степени можно свести к процессу распознавания образов. Рассмотрим научное творчество. Каждая научная дисциплина формирует свой набор образов — понятий, т. е. свое обучающее множество. Например, в синергетике это понятия (и образы) «аттрактор», «предельный цикл», «странный аттрактор», «фрактал», «фазовый переход» и т. д. При исследовании непонятного явления или объекта, например, мозга, мы обращаемся к этому обучающему множеству и пытаемся соотнести известные накопленные эмпирические закономерности функционирования мозга с этим обучающим множеством. Выясняется, например, что ЭЭГ-активность можно описать как странный аттрактор небольшой размерности, а сам мозг можно рассматривать как сложную систему, функционирующую вблизи критического состояния.

Любой человек в течение своей жизни обучается на большом числе очень разных множеств, и все процессы принятия решений в повседневной жизни сводятся к процессам распознавания на этих обучающих множествах.

ГЛАВА 3

ИСКУССТВО И МОЗГ

3.1. Для чего нужно искусство?

Феномен искусства является неразрешимой загадкой для всех традиционных наук о высшей нервной деятельности.

Проведенный автором анализ различных видов и жанров искусства показал, что искусство существует в неустойчивом, бифуркационном, критическом состоянии.

Б. В. Раушенбах выразил это фундаментальное свойство искусства следующим образом.

«... когда у искусствоведов пытаешься понять, чем отличается гениальная картина от копии, даже той же эпохи, они говорят, что гениальность — это отличие «чуть-чуть». У них есть такое понятие «чуть-чуть». Это «чуть-чуть» и есть гениальность. А что до этого — школа, умение, ремесло, это все не то. А вот «чуть-чуть», эти мельчайшие, почти неуловимые особенности, они и делают картину гениальной».

Но именно неустойчивые состояния очень чувствительны к малейшим изменениям, к тем самым «чуть-чуть», о которых говорил Б. В. Раушенбах.

Одно из важнейших проявлений бифуркационного состояния художественных произведений — это их полисемантическая, неоднозначная структура. Известный американский исследователь искусства Колин Мартиндейл (Colin Martindale) утверждает:

«... искусство, по-видимому, должно обладать множеством смыслов и иметь самозащиту от превалирования одного смысла над другим. Чем более один смысл доминирует в произведении, тем менее это есть произведение искусства. Если произведение имеет один и только один смысл — независимо от того, насколько интересным или важным этот смысл является, — это уже больше не произведение искусства».

Дж. Кальоти (D. Caglioti) впервые обратил внимание на то, что неоднозначность является когнитивным аналогом критического состояния.

Когда мы смотрим на рисунок 20, наше восприятие испытывает скачкообразные переходы между двумя интерпретациями этого рисунка — между изображением «лицо мужчины» и изображением «фигура девушки» — поскольку наша система восприятия не способна воспринимать обе эти интерпретации одновременно.

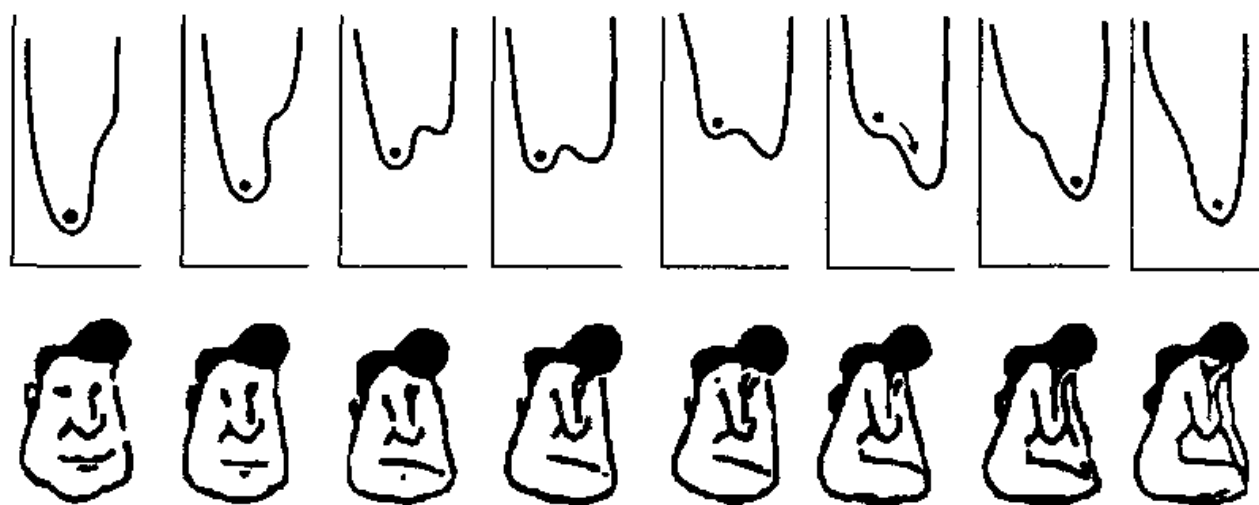


Рис. 20. Восприятие неоднозначных образов можно моделировать методами теории катастроф. (Объяснение в тексте.)

Такого рода неоднозначные образы привлекают внимание психологов давно, приблизительно с 1832 года, когда немецким психологом Неккером был изобретен первый такой образ («куб Неккера»), и с того времени особенности восприятия такого рода неоднозначных изображений были исследованы очень детально. Между тем, долгое время сами психологи относили неоднозначные образы к разряду курьезных явлений. Лишь сравнительно недавно стало понятно, что по существу всякий образ, всякое изображение или словесное выражение, взятые вне контекста, вне связи с окружением, являются неоднозначными.

Работа нашего сознания во многом связана с разрешением неоднозначности — визуальной и смысловой. Любое изображение, любая фраза, взятые вне контекста, являются неоднозначным, и для разрешения этих неоднозначностей мозгом привлекается дополнительная информация, как извне, из окружения (контекста) данного образа, так и из системы памяти самого мозга: личного опыта, накопленных знаний и т. п. В первых математических моделях, описывающих закономер-

ности восприятия неоднозначных образов, привлекались методы теории катастроф, и эти методы позволяют описать наиболее существенные качественные свойства таких процессов. Резкие переходы между двумя интерпретациями неоднозначного образа описываются элементарной катастрофой «сборка»:

$$x^3 - bx - a = 0,$$

где a и b представляют собой управляющие параметры, а x есть переменная состояния. Параметр a в данной модели количественно описывает степень смещения неоднозначного образа к предельным случаям, то есть к однозначным интерпретациям: «лицо мужчины» или «фигура девушки». Такую количественную характеристику для любых двух различных образов можно сделать, используя современные компьютерные технологии.

Чтобы построить математическую модель, описывающую восприятие двусмысленных ситуаций, необходимо, в первую очередь, уметь измерять «смысл» («семантику») ситуации. Ч. Осгудом еще в 1958 году была проанализирована сама проблема измерения смысла и предложена достаточно универсальная процедура построения семантического пространства.

Построение смыслового пространства осуществляется с помощью введения противоположных по смыслу прилагательных («хороший — плохой», «умный — глупый» и т. п.) в качестве размерностей (шкал) этого пространства, причем каждая шкала имеет семь градаций (-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3). Проведенные Осгудом и его сотрудниками обширные исследования показали, что в огромном большинстве случаев размерность семантического пространства может быть сведена к небольшому числу (3 — 7) измерений (факторов).

Для коротких лаконичных шуток, анекдотов, эпиграмм, в которых используются двусмысленные выражения, семантическое пространство обычно редуцируется до одномерного случая. В этом случае семантическое пространство может быть описано всего одним оценочным фактором типа «хороший — плохой», «умный — глупый», «высокий социальный статус — низкий социальный статус» и т. д.

Параметр b модели количественно описывает число деталей (степень детальности описания неоднозначного образа).

Переменная состояния x представляет собой количественную шкалу от +10 («выглядит, безусловно, как лицо мужчины») до -10 («выглядит, безусловно, как фигурка девушки»).

Для этой модели мы можем формально написать потенциальную функцию $F(x, a, b) = -1/4x^4 + 1/2bx^2 + ax$ и описывать поведение переменной x как фазовый переход. Однако здесь нужно сделать весьма существенное замечание. Если в физике потенциальная функция выводится из фундаментальных физических законов (например, закона Кулона), то в математических моделях психологии и в других «неточных науках» существование такой потенциальной функции по существу постулируется, и в дальнейшем она рассматривается как функционал, который следует минимизировать (функция Ляпунова).

В книге Дж. Кальоти «От восприятия к мысли» (ее английский оригинал вышел под названием «Dynamics of Ambiguity» — «Динамика неоднозначности») подробно обсуждаются закономерности динамика восприятия неоднозначных фигур, которые во многих отношениях сходны с явлениями самоорганизации в диссипативных структурах за порогом неустойчивого, критического состояния, а также с общими квантово-механическими процессами наблюдения в атомно-молекулярных структурах. Во всех этих процессах имеет место динамическое чередование (инверсия) двух стационарных состояний, в которых находится система. Такие процессы хорошо описываются моделью, первоначально предложенной для описания динамики электрона в молекуле водорода или атома азота в молекуле аммиака.

В живописи можно найти немало примеров неоднозначных образов, аналогичных неоднозначному изображению «лицо мужчины — фигура девушки». В картине Сальвадора Дали «Невидимый бюст Вольтера» бюст Вольтера сконструирован из изображений нескольких человеческих фигур (рисунок 21). Неоднозначность некоторых архитектурных деталей (контрфорса, подоконников и т. д.) в картине Ван Гога «Церковь в Овере» можно сравнить с другой неоднозначной фигурой — лестницей Шредера.

Однако наиболее известный пример неоднозначности в живописи — это неоднозначная улыбка Моны Лизы на картине Леонардо да Винчи. Вот что пишет об особенностях ее восприятия известный теоретик искусства Эрнст Гомбрих в книге «История искусства»: «... по мере рассматривания картины выражение ее лица непрерывно меняется, как у живого человека. Даже в репродукции сохраняется это удивительное свойство, а воздействие луврского оригинала граничит с колдовскими чарами. Улыбка Моны Лизы кажется то насмешливой, то печальной». Леонардо сознательно стремился к этому эффекту и достиг его, используя изобретенный им метод «сфумато» — создание размытых контуров и сгущающихся теней. «Каждому, кто пытался



Рис. 21. Картина Сальвадора Дали «Невидимый бюст Вольтера».

нарисовать лицо, хотя бы схематично, должно быть известно, что физиономическое выражение зависит в первую очередь от уголков губ и глаз. И именно их Леонардо прикрыл мягкими тенями», что и придало ее улыбке столь загадочное и неоднозначное выражение.

Многие зрительные образы допускают многозначную смысловую интерпретацию. Возьмем в качестве примера картину Я. Вермеера «Дама за клавесином и джентльмен». Почему изображенная сцена семантически неоднозначна?

Несомненно, между женщиной и мужчиной на картине есть какая-то связь. Может быть, он ее муж или просто друг. Возможно, он наслаждается ее игрой на клавесине, или думает, что можно играть и лучше. А женщина — действительно ли она играет? Вполне вероятно, она просто стоит у инструмента, задумавшись над тем, что ей только что сказал мужчина: объявил о разводе, или, наоборот, предложил руку и сердце. Все эти и многие другие интерпретации этой картины вполне вероятны.



Рис. 22. Я. Вермеер. «Дама за клавесином и джентльмен».

Наряду с визуальной неоднозначностью, в искусстве (чаще всего в литературе) широко используется смысловая неоднозначность естественного языка. По свидетельству друзей, Нильс Бор в последние годы своей жизни много размышлял о природе этой неоднозначности. Им была даже предложена некая математическая аналогия этого явления с теорией многозначных функций (из теории функций комплексного переменного). Однако до сих пор не удалось создать достаточно со-

держательной математической модели неоднозначности в лингвистике, поэтому все дальнейшие соображения носят в основном качественный характер, хотя и намечают возможный путь исследований.

В детективах Агаты Кристи напряженное внимание читателя до самой развязки сюжета поддерживается тем, что многие фразы и действия персонажей допускают неоднозначную интерпретацию. Сама Агата Кристи так формулирует один из основных принципов своего творчества: *«Ведь вы знаете, что я не обманываю. Я просто говорю нечто такое, что можно истолковать двояко»*.

Итак, мы рассмотрели два различных типа неоднозначности: визуальную и смысловую, наиболее ярко проявляемую в двусмысленных комических высказываниях. Актерское искусство по своей природе также неоднозначно, и соответствующая бимодальность имеет смешанную структуру: визуальную и смысловую. Предлагаемые ниже рассуждения, как и в случае лингвистической смысловой неоднозначности, носят качественный характер.

Исходной фазой актерской бимодальности является изначальная психофизиологическая природа актера: его пол, возраст, внешние данные, голос, тип психики и т. д. Вторая фаза — это собственно его роль, ее психофизиологические характеристики. Ясно, что эти две фазы никогда не совпадают. Для актерского искусства можно выделить две полярные возможности:

1. Актер представляет собой яркую индивидуальность, имеет оригинальную внешность, уникальные психофизиологические данные. В этом случае актер обычно полностью подчиняет себе вторую фазу — роль. Обычно актеры именно такого типа наиболее популярны, их имена широко известны: Ален Делон, Арнольд Шварценеггер, Юрий Никулин и другие. Как правило, таких актеров довольно часто пародируют.

2. Актеры, в совершенстве владеющие искусством перевоплощения и не обладающие какими-либо яркими природными внешними данными. К актерам этого типа можно отнести Лоуренса Оливье, Алекса Гиннеса, Иннокентия Смоктуновского. Таких актеров очень трудно пародировать.

Лотман отмечает, что в кинематографе в большей степени, чем в театре, зритель видит не только роль, но и актера. Наблюдая игру известного актера, мы поочередно фокусируем наше внимание либо на облике самого актера, знакомого нам по другим фильмам, либо на характерных особенностях роли, которую играет этот актер. Именно такая осцилляция внимания есть причина того, что применительно к актерскому искусству мы используем слово «игра».

Игра является одной из органических потребностей психики человека и некоторых высших животных. Умение играть заключается в овладении некоторым «двуплановым» (по терминологии Ю. М. Лотмана) то есть бимодальным, поведением. Например, играющий ребенок помнит, что перед ним игрушечный тигр, и не боится. Но он также считает игрушечного тигра живым. В основе любой игры лежит колебательный, повторяющийся процесс (спортивная игра, игра на музыкальном инструменте, игра в карты и т. д.).

Хотя в научном творчестве мы стремимся разрешать неоднозначности (собственно, основная функция науки заключается как раз в том, чтобы описать окружающий нас мир наиболее точно и однозначно), в науке существуют парадоксы, которые, по-видимому, выполняют в научном творчестве ту же роль, что неоднозначные образы в художественном творчестве.

Поэзия, искусство в целом намеренно и целенаправленно создают неоднозначности, и в этом принципиальное отличие искусства от науки.

Все рассмотренные выше примеры позволяют сформулировать основной принцип композиционного построения художественных произведений:

Произведения искусства существуют вблизи неустойчивого, критического состояния.

Поскольку мозг человека для своего нормального функционирования должен находиться в критическом или надкритическом (творческом) состоянии, можно предположить, что назначение искусства заключается в том, чтобы поддерживать мозг в этих состояниях.

3.2. Для чего нужна музыка?

Музыка — неотъемлемая часть человеческой цивилизации. Музыкальную культуру можно обнаружить у всех народов на любом уровне их исторического развития. Недавние археологические исследования в Словении и Франции, где были найдены флейты из костей животных, изготовленные более 53000 лет назад, заставляют сделать вывод, что музыка предшествовала сельскохозяйственной культуре и, возможно, даже языку.

Однако, несмотря на такое древнее происхождение, до сих пор не ясны основные причины и цели возникновения музыки. Непонятно также, каким образом мозг взаимодействует с музыкой. Сейчас ясно, что

в мозгу отсутствует какая-либо специальная область (центр), отвечающая за восприятие и обработку музыки. Однако, как показывают исследования, травмы в правом полушарии мозга вызывают более глубокие нарушения в восприятии музыки, чем травмы в левом полушарии мозга. При этом обработка музыки мозгом захватывает не только неокортекс, но и эволюционно более древние, глубинные области мозга, связанные эмоциональным поведением, — лимбическую область.

Объяснение назначения музыки и ее эволюционного биологического смысла можно рассматривать как важный показатель уровня нашего понимания принципов функционирования мозга. В своей книге «Происхождение человека и половой отбор» Дарвин объяснил функции пения у птиц и некоторых млекопитающих как одно из проявлений полового отбора, когда пение включено в обряд ухаживания самцов для привлечения внимания самки. Чем неожиданнее и разнообразнее пение самца, тем больше это нравится самке. Этим же механизмом полового отбора Дарвин объяснял возникновение музыкальной культуры у человека.

Видимо, и в настоящее время музыка продолжает играть важную роль в процессе полового отбора у человека. Чтобы проверить эту гипотезу, случайным образом выбрали 1800 джазовых альбомов, 1500 альбомов рок-музыки и более 3800 произведений классической музыки и проанализировали пол и возраст авторов каждого музыкального произведения. Оказалось, что в любом музыкальном жанре мужчины создают музыкальных произведений приблизительно в десять раз больше, чем женщины. При этом пик творческой активности приходится на временной интервал около тридцати лет — наиболее репродуктивно активный возраст.

Дарвин из четырех основных инстинктов выделил только репродуктивное поведение в качестве основной причины звуковой коммуникации у животных и возникновения музыкальной культуры у человека. Можно предположить, однако, что и остальные три безусловных инстинкта (пищевое поведение, страх и агрессия) участвовали и продолжают участвовать в коммуникативном поведении животных и внесли свой вклад в возникновение современной музыкальной культуры.

В самом деле, мы не должны исключать распространенных у многих животных сигналов тревоги, связанных с опасностью (alarm call), и сигналов, связанных с добыванием и нахождением пищи (food call), как другие возможные биологические причины возникновения музыки (и, несомненно, языка) только на том основании, что эти сигналы меньше похожи на музыку, чем пение птиц.

В таблице приведены основные функции голосового поведения (криков) некоторых животных:

Таблица 4.

| Животное | Функции крика |
|-------------------|---------------------------------|
| красный попугай | сигналы тревоги, сигналы о пище |
| куры | сигналы тревоги, сигналы о пище |
| чибис | сигналы тревоги |
| шимпанзе | сигналы о пище |
| макака резус | сигналы о пище |
| макака | сигналы о пище |
| обезьяны | сигналы тревоги |
| лемур | сигналы тревоги |
| малазийская белка | сигналы тревоги |
| альпийский сурок | сигналы тревоги |

Сигналы тревоги у макак, живущих в африканской саванне, сообщают о типе хищника (леопард, ястреб, змея). Сигналы о пище у обезьян резусов одного из островов в Пуэрто-Рико сообщают о количестве и качестве найденной пищи, которая состоит из листьев, травы, фруктов, насекомых и т. д. Так же, как пение птиц и некоторых млекопитающих, сигналы тревоги и сигналы о пище имеют смысловое содержание, и именно поэтому их следует принимать во внимание как возможные биологические корни возникновения музыки у человека.

В процессе биологической эволюции человека имел место «пищевой отбор», который привел к существенному расширению структуры питания. Предки современного человека на определенном этапе биологической эволюции стали употреблять в пищу продукты, содержащие жирные кислоты, которых много, например, в рыбе и других продуктах моря, рек и озер. Без таких кислот было бы невозможно значительное увеличение размеров мозга. Несомненно, это расширение структуры питания сопровождалось и расширением диапазона звуков, связанных с пищевым поведением.

Биологическая эволюция человека сопровождалась также и «селекцией страха», когда смена климата и окружающей среды влекла за собой увеличение числа факторов угрозы для жизни. Следовательно, происходило также расширение диапазона сигналов тревоги. Имея в виду тесную связь эволюции музыкального поведения с основными инстинктами,

можно предположить, что эволюция музыки предшествовала эволюции языка, точнее, музыка стала основой для возникновения и эволюции языка.

Недавние исследования, использующие медицинскую томографию, показали, что нейрофизиологические субстраты, реализующие функции музыкального и языкового поведения, у современного человека, в значительной степени перекрываются.

3.2.1. Музыка и управление динамическим хаосом мозга

В исследованиях Н. Бирмауеа (N. Birbaumer) и др. было обнаружено, что восприятие музыки проявляется в уменьшении фрактальной размерности ЭЭГ-сигналов, то есть электрическая активность нейронных ансамблей становится более синхронной.

В работе Патель и Балабан (Patel, Balaban), опубликованной в журнале *Nature*, было показано, что при восприятии музыки степень когерентности паттернов, образуемых магнитными полями мозга, повышается. Когда же человек воспринимает шумовые акустические сигналы, когерентность паттернов низка. Известны редкие случаи провоцирования музыкой эпилепсии, которая, как мы знаем, проявляется в высокой степени синхронизации электрической активности нейронных ансамблей.

Эти экспериментальные данные позволяют сформулировать гипотезу, что музыка есть инструмент управления хаотической динамикой мозга и каждую музыкальную партитуру можно рассматривать как своеобразную программу управления хаотической динамикой электрической активности нейронных ансамблей. Можно предположить, что целью управления хаотической динамикой мозга является формирование такой структуры хаоса, которая была бы наиболее близка режиму синхронизации нейронных ансамблей мозга, обладающей интегративными когнитивными свойствами.

Исследования В. Бондаренко показали, что малоразмерный хаотический ЭЭГ-сигнал мозга наблюдается в том случае, когда частота внешней силы (синусоидальной или периодически повторяющихся импульсов) близка или совпадает с одной из основных частот (дельта, тета, альфа, бета) нейронной активности в отсутствие внешней силы.

Мы можем предположить поэтому, что воздействие музыки на мозг также происходит вблизи этих собственных частот или их гармоник, поскольку, чтобы подавить хаос, требуется значительно меньшая амплитуда внешнего воздействия вблизи резонансных частот, чем вдали от них.

Но в модели нейронной сети, предложенной В. Бондаренко, имеется только четыре собственные частоты, в то время как фортепиано содержит 84 клавиши, генерирующих 84 звука различной частоты. Чтобы разрешить это противоречие, нами была предложена нейросетевая модель музыкального лада, основанная на модели ассоциативной памяти Дж. Хопфилда.

3.2.2. Нейросетевая модель музыкального лада

В процессе развития музыки, в частности мелодии, некоторые звуки выделились из общей массы, приобрели свойства устойчивых, опорных звуков, с которых обычно начинается и заканчивается мелодия. Среди таких устойчивых звуков один звук обычно выделяется больше, чем другие. Такой устойчивый звук получил название тоники. Второй по устойчивости звук называется медиантой, и, наконец, третий по устойчивости звук называется доминантой.

Другие звуки, участвующие в образовании мелодии, являются неустойчивыми, и им свойственно состояние тяготения (притяжения) к устойчивым звукам. Физический смысл понятий «устойчивый звук», «неустойчивый звук», «тяготение» будет пояснен ниже.

Неустойчивые звуки располагаются между устойчивыми звуками, тяготея к ним. При этом интервалы между неустойчивыми и устойчивыми звуками являются диссонансными. Чем меньше интервал между устойчивым и неустойчивым звуком, тем сильнее тяготение.

Таким образом, взаимоотношение звуков по высоте в мелодии образует некоторую устойчивую структуру. Такую систему организующего взаимоотношения устойчивых и неустойчивых звуков в мелодии называют ладом, а сама музыка с такой системой организации звуков называется тональной музыкой. Все известные мелодии относятся к тональной музыке. В противоположность ей, музыка, в которой нет определенных организующих принципов для звуков различной высоты, называется атональной музыкой. Такая музыка возникла лишь в начале XX столетия.

В тональной музыке встречаются самые разнообразные лады, но все же наиболее широкое распространение получили мажорные и минорные лады. Мажорным называется лад, в котором интервалы между устойчивыми звуками образуют терции: между тоникой и медиантой находится большая терция (2т), а между доминантой и медиантой — малая терция (1,5т). Например, ноты до — ми — соль дают мажорное звучание. Отметим, что и большая, и малая терции являются консонансными интервалами. Консонансные интервалы соответствуют звукам с наибольшей

величиной корреляции составляющих их обертонов. В слуховом нерве консонансным интервалам отвечают наиболее гладкие и симметричные последовательности электрических импульсов.

Для того чтобы объяснить структуру и свойства музыкального лада, мы обратимся к модели ассоциативной памяти Дж. Хопфилда. Еще раз подчеркнем, что обращение к модели функциональной деятельности мозга для объяснения структуры музыкальной мелодии не только уместно, но и необходимо, поскольку музыка, как и все искусство в целом, должна функционировать в соответствии с законами функционирования психики. Наиболее наглядно структуру и функцию музыкального лада можно изобразить на потенциальной функции нейронной сети Хопфилда. Как уже говорилось в главе I, потенциальная функция нейронной сети представляет собой набор минимумов и максимумов, где каждому минимуму соответствует определенный хранящийся в памяти образ — прототип. Распознавание нового образа такой нейронной сетью описывается как тяготение этого образа к ближайшему минимуму, то есть к образу, с которым у него имеется наибольшее сходство.

Если воспользоваться этой моделью ассоциативной памяти, то естественно устойчивые звуки мелодии соотнести с минимумами соответствующей функции Хопфилда (образами-прототипами), а максимумам этой функции будут соответствовать неустойчивые звуки, которые будут тяготеть к ближайшему минимуму. В таком случае потенциальную функцию Ляпунова «МАЖОРНЫЙ ЛАД» мы можем изобразить следующим образом (см. рис. 23).

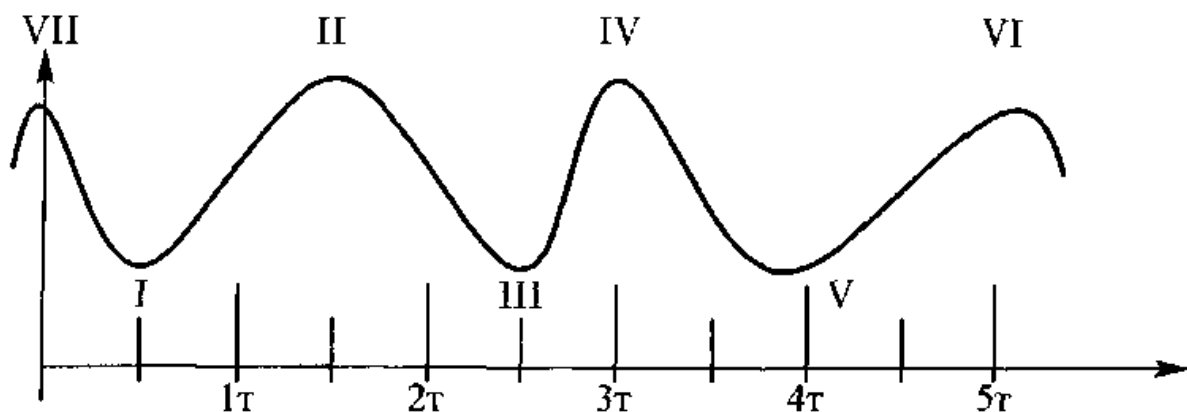


Рис. 23. Нейросетевая модель мажорного лада.

В такой модели структуры и функционирования музыкального лада, понятие «тяготение» одного звука к другому в мелодии приобретает простой физический (механический) смысл.

Как уже указывалось, тоника (I ступень) является главным опорным звуком, и потому наиболее устойчива. III и V ступени менее устойчивы.

II, IV, VI и VII ступени мажорного лада неустойчивы. Степень их неустойчивости (степень тяготения к устойчивому звуку) зависит от расстояния между неустойчивым и устойчивым звуками и от степени устойчивости звука, к которому направлено тяготение. Наиболее острое тяготение VII ступени к I, IV ступени к III и II к I.

В минорном ладе по сравнению с мажорным ладом большая и малая терции расположены зеркально симметрично. Например, звуки до – ми – бемоль – соль имеют минорное звучание. Потенциальную функцию Хопфилда «МИНОРНЫЙ ЛАД» можно изобразить следующим образом:

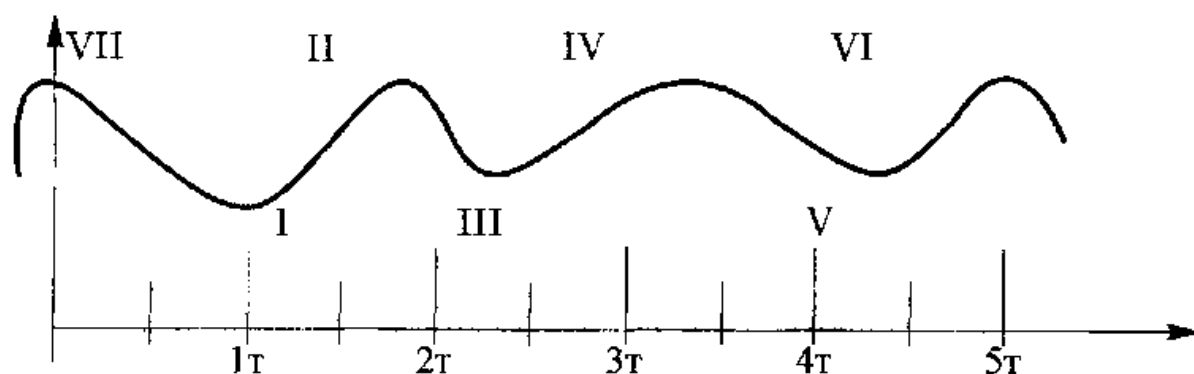


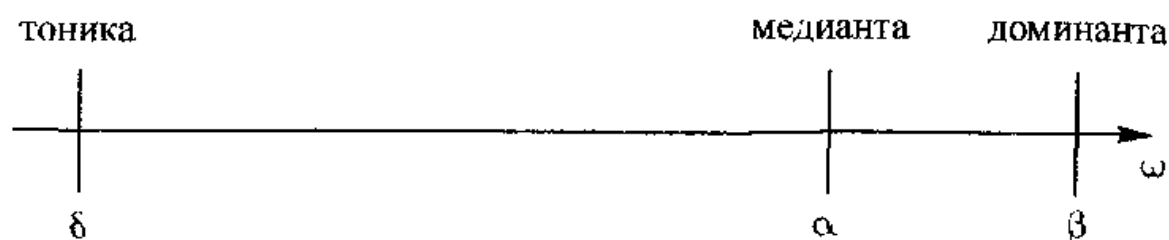
Рис. 24. Нейросетевая модель минорного лада в западноевропейской музыке.

Изображая потенциальный ландшафт музыкальных ладов для модели ассоциативной памяти Хопфилда, мы могли точно изобразить лишь расстояния между экстремумами этой функции, глубины же минимумов и высоты максимумов изображались нами условно. Как показывают исследования модели Хопфилда, величины этих экстремумов зависят, главным образом, от числа нейронов в нейронной сети и от числа и силы связей между нейронами: чем больше нейронов в сети, чем больше связей, и чем сильнее связаны нейроны между собой, тем более глубокие минимумы имеет соответствующая энергетическая функция.

В связи с этим можно высказать гипотезу, что вид потенциальной функции лада является чрезвычайно индивидуальным для каждого человека, и глубина ее минимумов отражает музыкальные способности (музыкальную одаренность) человека. Чем более одаренным к музыке является человек, тем глубже расположены минимумы в его потенциальной функции Хопфилда. И наоборот, человек со слабыми музыкаль-

ными способностями, имеет энергетический ландшафт с очень мелкими минимумами.

Можно предположить, что все виды мажорных тональностей как в западной музыке, так и в пентатонике, принадлежат бассейну одного и того же аттрактора, а все виды минорных тональностей принадлежат бассейну другого аттрактора. Поскольку музыка действует на нейронную сеть мозга как внешняя сила, резонансное действие трех устойчивых ступеней мажорного лада через слуховой нерв можно изобразить следующим образом (см. рис. 25).

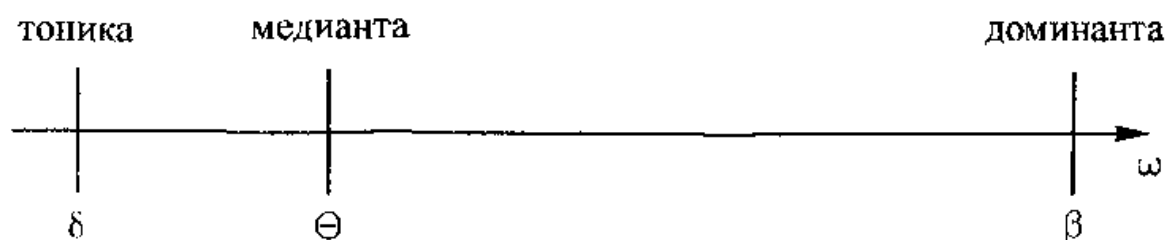


ω — частота импульсов в слуховом нерве

Рис. 25. Резонансное воздействие устойчивых ступеней мажорного лада.

Это означает, что в слуховом нерве частота импульсов, соответствующих тонике, медианте и доминанте, совпадает с частотами дельта-, альфа- и бета-ритмов.

Действие минорного лада на мозг можно изобразить аналогичным образом (см. рис. 26).

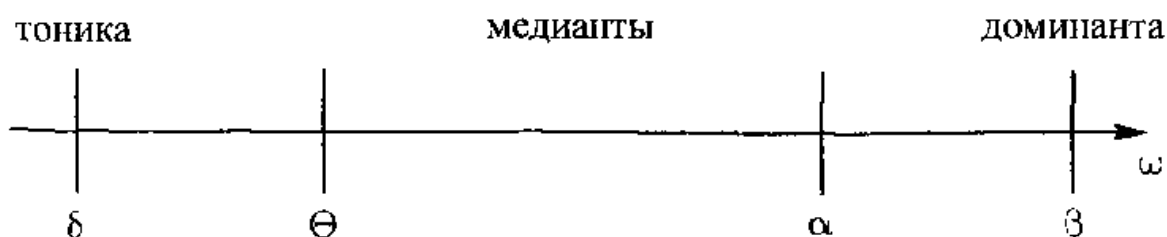


ω — частота импульсов в слуховом нерве

Рис. 26. Резонансное воздействие устойчивых ступеней минорного лада.

В этом случае в слуховом нерве частота импульсов, соответствующих тонике, медианте и доминанте, совпадает с частотами дельта-, тета- и бета-ритмов.

Суммарное действие музыкального произведения, состоящего из мажорных и минорных тональностей, можно представить так (см. рис. 27).



ω — частота импульсов в слуховом нерве

Рис. 27. Резонансное воздействие мажорного лада и минорного лада.

Таким образом, мы имеем четыре различные внешние силы с четырьмя разными частотами, действующие на четыре основные (резонансные) частоты нейронной сети.

Обсудим возможный механизм резонансного воздействия устойчивых ступеней лада на собственные частоты мозга, поскольку диапазон этих частот (2–15 Гц) расположен ниже частот звуков, издаваемых музыкальными инструментами (около 20 Гц и выше). Мы полагаем, что такой механизм может быть связан с одной из разновидностей недавно открытого нелинейного явления — стохастического резонанса.

Это явление объясняет происхождение некоторых перцептивных иллюзий, когда мы можем услышать звуки на частотах, на которых в действительности не колеблются звучащие объекты.

Рассмотрим простейший случай, когда сложный звук может быть представлен суммой двух синусоид первой и второй гармоник частоты f_0

$$f_1 = 2f_0$$

$$f_2 = 3f_0$$

Суммирование этих двух синусоид дает сложный звук на частоте f_0 на которой реально нет колебаний (Рис. 28).

Если к этому сложному колебанию добавить шум, который всегда присутствует в нейронных сетях, то, вследствие наличия порога восприятия, из этого сложного сигнала будут детектироваться сигналы только на частотах близких к f_0 (Рис. 29).

Поскольку частоты устойчивых ступеней лада всегда находятся между собой в целочисленных кратных соотношениях, возможно с по-

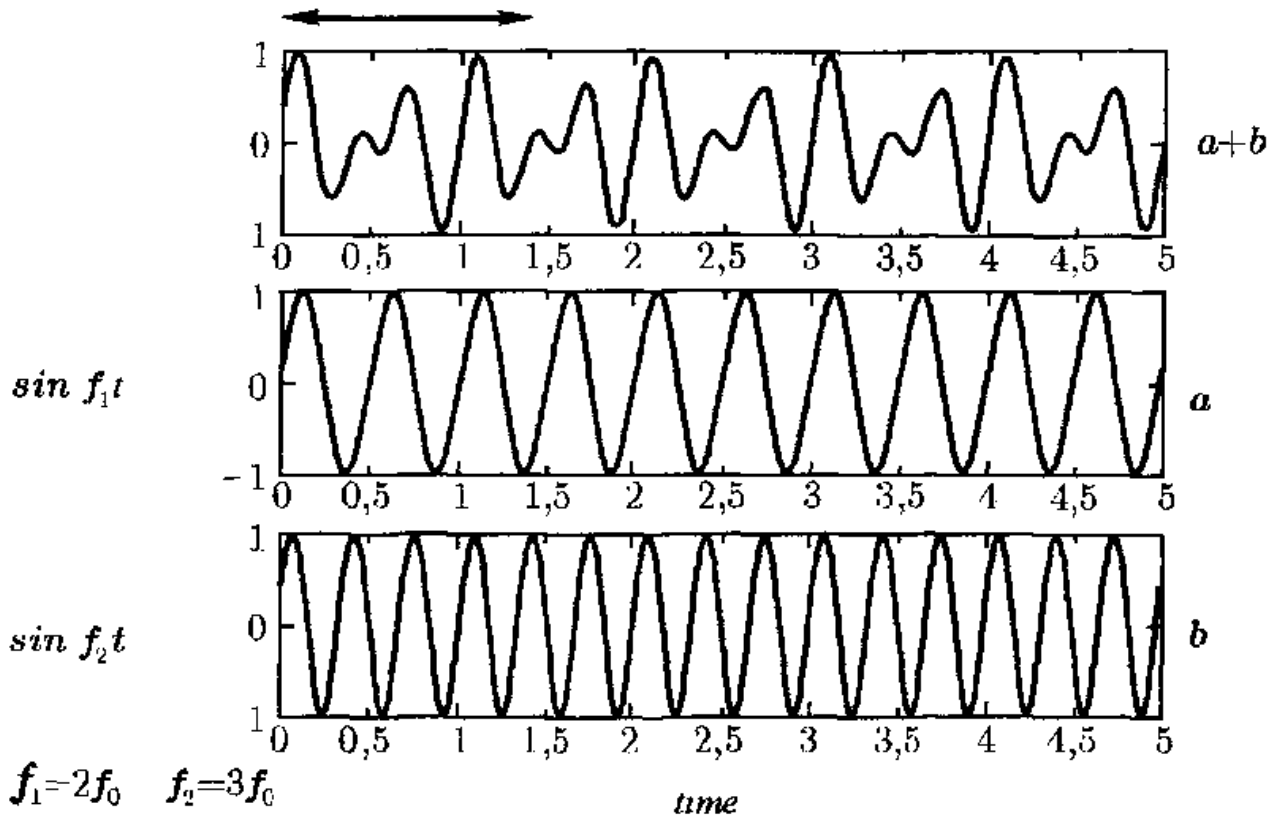


Рис. 28. Суммирование двух синусоидальных сигналов с частотами $2f_0$ и $3f_0$ дает в результате сложный сигнал, в котором присутствует частота f_0 .

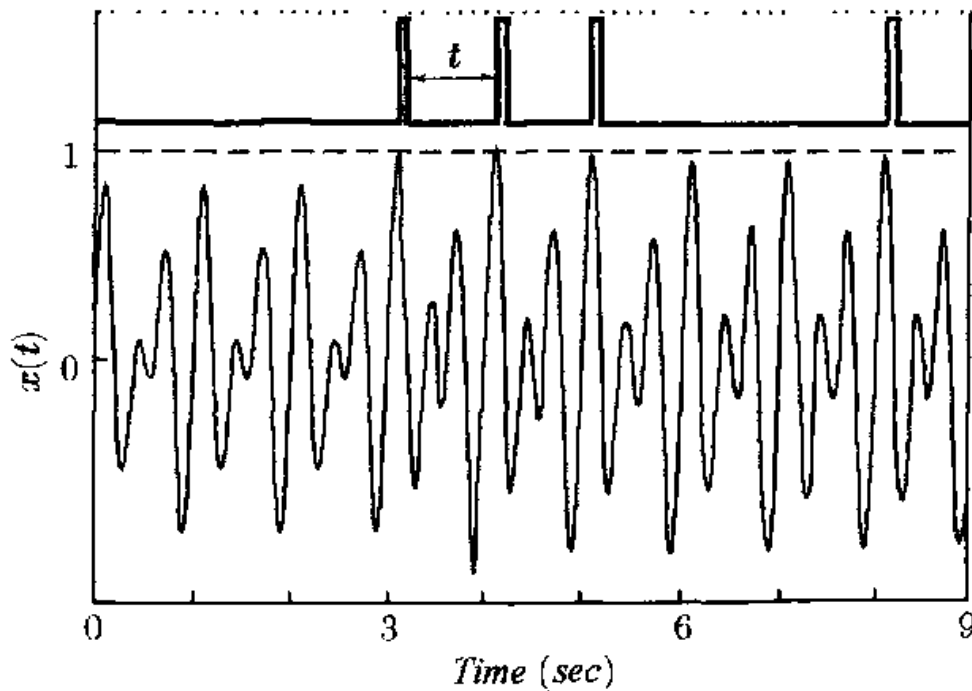


Рис. 29. Добавление шума к сложному сигналу делает его частоту менее регулярной из-за наличия порога восприятия (пунктирная горизонтальная линия).

мощью этого механизма можно объяснить их резонансное воздействие на собственные частоты мозга.

3.2.3. Музыка и инстинктивное поведение

Предложенный механизм воздействия музыки может продуцировать физиологическую активность, связанную с врожденными рефлексам. Такая связь музыки с инстинктивным поведением действительно имеет место.

Музыка и половой инстинкт. Пение птиц и звуки, издаваемые некоторыми животными (гibbon, кит), связаны, главным образом, именно с репродуктивным поведением. Недавно было обнаружено, что прослушивание классической музыки вызывает изменение уровня тестостерона в крови.

Музыка и пищевой инстинкт. Веселая, возбуждающая музыка усиливает деятельность пищеварения, и поэтому все пиры обычно сопровождают такой музыкой. Известно, что английский поэт Байрон страдал расстройством пищеварения, и ему удалось в значительной степени вылечить этот недуг благодаря тому, что во время приема пищи ему играл оркестр.

Наиболее убедительным доказательством воздействия музыки на области мозга, связанные с инстинктивным поведением стали эксперименты, проведенные Робертом Заторро (Robert Zatorro) и Анны Блад (Anne Blood) в 2001 году. Испытуемыми были студенты-музыканты из университета Мак Гилл в Монреале (Канада). Эти студенты сами выбрали произведения классической музыки, которые их глубоко эмоционально затрагивали и указали те места в выбранных произведениях, где эмоциональный отклик был наиболее интенсивным.

При прослушивании именно этого места музыкального произведения у соответствующего испытуемого производилась позитронно-эмиссионная томография (PET) мозга. Кроме того, для каждого испытуемого проводилось контрольное сканирование мозга, давая прослушать шум, тишину и контрольное музыкальное произведение.

Эти эксперименты показали, что в эмоциональный отклик на музыкальное произведение вовлечены отделы мозга, которые в других исследованиях были связаны с приятными эмоциями и даже чувством эйфории в ответ на удовольствие от пищи, секса и на употребление кокаина, а также с эмоциональной реакцией страха. Это дорсальная область среднего мозга, вентральный стриатум, таламус, гиппокамп, амигдала и другие.

3.2.4. Почему мажорный лад вызывает радость, а минорный лад — грусть?

Соответствие между устойчивыми ступенями мажорного лада и основными безусловными инстинктами можно схематически представить следующим образом:

Мажорный лад

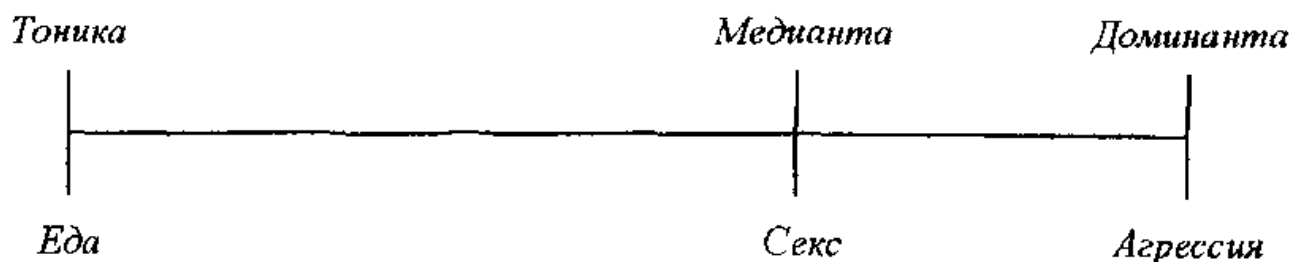


Рис. 30. Схема воздействия устойчивых ступеней мажорного лада на безусловные рефлексы.

Для минорного лада соответствующая схема выглядит следующим образом:

Минорный лад



Рис. 31. Схема воздействия устойчивых ступеней минорного лада на безусловные рефлексы.

Таким образом, основное различие в резонансном воздействии устойчивых ступеней мажорного лада и минорного лада сводится к воздействию медианты. Если в мажорном ладе воздействие медианты вызывает положительные эмоции, то в минорном ладе медианта вызывает негативные эмоциональные переживания.

Безусловные рефлексы есть основная причина эмоциональных переживаний. Это базовые эмоции, аналогичные трем базовым цветам (красный, синий, зеленый) из которых, путем пропорционального перемешивания, можно получить любые другие цвета.

Можно предположить, что музыка, благодаря метроритмической (временной) организации, также смешивает в определенных пропорциях базовые эмоции, вызываемые резонансным воздействием устойчивых ступеней лада, создавая в каждом музыкальном произведении свою собственную палитру эмоциональных переживаний.

3.2.5. О функции музыкального ритма

Биологические корни музыкального ритма следует искать в явлении синхронного поведения самцов некоторых насекомых и животных (мерцание светлячков, стрекотание сверчков, покачивание клешнями крабов и т. д.). Биологический смысл такого ритмического и синхронного поведения является привлечение самки в данное сообщество и служит сигналом для других сообществ самцов о силе и численности данного сообщества.

Музыкальный ритм в человеческом обществе служит инструментом социальной организации.

У древних племен, когда еще отсутствовала письменность, ритмическое пение и танец были самыми распространенными формами религиозных и общественных собраний. Звук барабана, хлопанье в ладони, ритмические танцы вокруг костра могли длиться часами, сопровождая разнообразные обряды и ритуалы. Несомненно, что такое ритмическое поведение доставляет удовольствие его участникам, формирует чувство сопричастности к данному племени или данной группе.

В дальнейшем ритмическая музыка (военные и спортивные марши, например) также использовались как технология формирования кооперативного социального поведения.

Список литературы

Введение

О синергетике как новом научном мировоззрении можно прочитать в следующих книгах:

Дж. Кальоти. *От восприятия к мысли.* — М.: Мир, 1998.

И. Пригожин. *Конец определенности.* — Ижевск: 1999.

Г. Хакен. *Синергетика.* — М.: 1980.

Г. Хакен. *Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах.* — М.: 1985.

Г. Хакен. *Информация и самоорганизация.* — М.: 1990.

Д. С. Чернавский. *Синергетика и информация.* — М.: УРСС, 2004.

Глава 1

О критическом состоянии:

Ш. Ма. *Современная теория критических явлений.* — М.: Мир, 1980. *О синхронизации:*

А. Пиковский, М. Розенблюм, Ю. Куртс *Синхронизация: Фундаментальное нелинейное явление.* — М.: Техносфера, 2003.

О сетях:

R. Albert, A. Barabasi. *Statistical Mechanics of Complex Network.* *Rev. Mod. Phys.*// 74, 47, (2002).

D. Watts. *Six degrees.* — New York: W.W.Norton & Company, 2004.

О мозге как сложной системе в критическом состоянии:

A. M. Turing. *Computer machines and intelligence.* *Mind* 59, 236 (1957) *Bak Per How Nature Works.* — New York: Copernicus, 1996.

В. И. Крюков, Г. Н. Борисюк, Р. М. Борисюк, А. Б. Кириллов, Е. И. Коваленко. *Метаустойчивые и неустойчивые состояния в мозге*. — Пущино: 1986.

D. Chialvo *Critical Brain networks*. arXiv: cond-mat/0402538, v1, 21 Feb 2004.

V. Eguiluz, D. Chialvo, G. Cecchi, M. Baliki, and A. Apkarian, *Scale-Free Functional Networks*. *Physical Review Letters* 94, 018102 (14 January 2005).

О моделях распознавания образов:

Ya. Bar-Yam. *Dynamics of Complex Systems*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1997.

А. А. Веденов. *Моделирование элементов мышления*. — М.: 1988.

Д. С. Чернавский. *Синергетика и информация*. — М.: УРСС, 2004.

Хаотическая динамика мозга:

V. E. Bondarenko. *Analog Neural Network Model Produced Chaos Similar to the Human RRG*. *International Journal on Bifurcation and Chaos*. 1997, v.7, N.5, 1133—1140.

V. E. Bondarenko. *High-Dimensional Chaotic Neural Network under External Sinusoidal Force*. *Physics Letters, A* 236, 413—419.

V. E. Bondarenko. *Control and «anticontrol» of chaos in an analog neural network with time delay*. *Chaos, Solitons, and Fractals*, 13 (2002), 139—154.

J. A. S. Kelso A. Fuchs. *Self-organizing Dynamics of the Human Brain: Critical Instabilities and Silnikov Chaos*. *Chaos*, v.5, 1, 1995, 64—69.

Осцилляторные нейронные сети:

Г. И. Борисюк, Р. М. Борисюк, Я. Б. Казанович, Т. Б. Лузянина, Т. С. Турова, Г. С. Цымбалюк. *Осцилляторные нейронные сети. Математические результаты и приложения*. Математическое моделирование. 1992, 4 (1), 3—43.

Г. Н. Борисюк, Р. М. Борисюк, Я. Б. Казанович, Г. Р. Иваницкий. *Модели динамики нейронной активности при обработке информации мозгом — итоги «десятилетия»*. *Успехи Физических Наук*, т. 172, №10 (2002), 1189—1214.

W. Singer. *Neuronal representations, assemblies and temporal coherence. Progress in Brain Research* 95, (1993), 461-474.

F. Varela, J.-P. Lachaux, E. Rodriguez, J. Martinerie. *The Brainweb: Phase Synchronization and Large-Scale Integration. Nature Reviews: Neuroscience*, V. 2, April 2001, 22–239.

Глава 2

К. Лоренц. *Оборотная сторона зеркала.* — М.: Республика, 1998.

E. Basar. *Brain Function and Oscillations: Brain Oscillations, Principles and Approaches.* Vol. 1. New York.: Springer, 2000.

E. Basar, H. Haken (Editor). *Brain Function and Oscillations: Integrative Brain Function, Neurophysiology and Cognitive Processes.*// Vol. 2. New York: Springer, 2000.

Б. М. Ломов, Е. И. Сурков. *Антиципация в структуре деятельности.* — М.: 1980.

И. А. Евин. *Искусство и синергетика.* — М.: УРСС, 2004.

Глава 3

И. М. Догель. *Влияние музыки на человека и животных.* — Казань: типография Императорского университета, 1897.

И. А. Евин. *Синергетика мозга и синергетика искусства.* — Москва–Ижевск: РХД, 2003.

И. А. Евин. *Искусство и синергетика.* — М.: УРСС, 2004.

И. Р. Тарханов. *О влиянии музыки на человеческий организм.* Северный вестник, №1, 1893.

A. J. Blood and R. Zatorre. *Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotions.* PNAS, vol.98, no.20. 2001, pp.11818–11823

D. Chiavlo. *How we hear what is not there: A neural mechanism for the missing fundamental illusion.* Chaos, vol.13, no.4, pp.1226–1230.

F. Hajime. *Music and Testosterone.* In: *The Biological Foundations of Music.* Editor Robert Zatorre, 2000, 448–451.

Интересующие Вас книги нашего издательства можно заказать почтой или электронной почтой:

subscribe@rcd.ru

Внимание: дешевле и быстрее всего книги можно приобрести через наш Интернет-магазин:

http://shop.rcd.ru

Книги также можно приобрести:

1. Москва, ФТИАН, Нахимовский проспект, д. 36/1, к. 307,
тел.: 332-48-92 (почтовый адрес: Нахимовский проспект, д. 34)
2. Москва, ИМАШ, ул. Бардина, д. 4, корп. 3, к. 414, тел. 135-54-37
3. МГУ им. Ломоносова (ГЗ, 1 этаж)
4. Магазины:
Москва: «Дом научно-технической книги» (Ленинский пр., 40)
«Московский дом книги» (ул. Новый Арбат, 8)
«Библиоглобус» (м. Лубянка, ул. Мясницкая, 6)
Книжный магазин «ФИЗМАТКНИГА» (г. Долгопрудный,
Новый корпус МФТИ, 1 этаж, тел. 409-93-28)
С.-Пб.: «С.-Пб. дом книги» (Невский пр., 28)

Евин Игорь Алексеевич

СИНЕРГЕТИКА МОЗГА

Дизайнер М. В. Ботя

Технический редактор А. В. Ширококов

Компьютерный набор и верстка А. В. Тюлькин

Корректор З. Ю. Соболева

Подписано в печать 03.08.2005. Формат 60 × 84¹/₁₆

Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,28. Уч. изд. л. 6,34

Гарнитура Антикwa. Бумага офсетная №1. Заказ №52.

Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика»

426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.

http://rcd.ru E-mail: borisov@rcd.ru

ISBN 5-93972-424-8



9 785939 724241