

**СОВРЕМЕННЫЕ  
ПРОБЛЕМЫ  
ФИЗИКИ**

**А.А. ВЕДЕНОВ**

**М**ОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЭЛЕМЕНТОВ  
МЫШЛЕНИЯ

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ

---

А.А. ВЕДЕНОВ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МЫШЛЕНИЯ

*Серия выпускается под общим руководством  
редакционной коллегии журнала  
"Успехи физических наук"*



ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
1988

ББК 32.813

В26

УДК 519.71

В е д е н о в А.А. **Моделирование элементов мышления.** – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат.лит., 1988. – (Соврем. пробл. физики). – 160 с.

Рассматривается моделирование основных элементов мышления человека – распознавания объектов внешнего мира и обучения. Описаны модели, созданные самой природой – они возникли у простейших организмов в процессе эволюции; модели математические и физические; модели, реализованные в различных системах "искусственного интеллекта". Обсуждаются сенсомоторные системы и их моделирование и вопросы, связанные с моделированием мышления: поток сознания, поиск аналогии, вспоминание и др.

Для физиков, математиков, биологов, интересующихся проблемами естественного и искусственного интеллекта.

Табл. 5. Ил. 47. Библиогр. 118 назв.

Р е ц е н з е н т

член-корреспондент АН СССР *М.В. Волькенштейн*

В *1704020000-009* 106-88  
053(02)-88

© Издательство "Наука".  
Главная редакция  
физико-математической  
литературы, 1988

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	5
Введение . . . . .	7
<b>Глава 1. Распознавание образов и обучение у простых организмов</b>	10
§ 1. Одноклеточные организмы . . . . .	11
1. Фототаксис и хемотаксис бактерий (11). 2. Рефлекс и обучение (18). 3. Категоризация и пластиичность "памяти" у бактерий (20).	
§ 2. Организмы с небольшим числом нейронов . . . . .	22
1. Нейрон (22). 2. Моллюски (26).	
§ 3. Сообщества беспозвоночных. Насекомые . . . . .	32
1. Муравьи (32). 2. Нервная система насекомых (34).	
<b>Глава 2. Моделирование нейронных ансамблей . . . . .</b>	36
§ 4. Голографические модели памяти . . . . .	37
1. Голография (37). 2. Распределенная память (39). 3. Нейронные ансамбли (39).	
§ 5. Модель нейронной сети . . . . .	40
1. Динамическая система в термостате (40). 2. Пример процедуры распознавания и обучения (43).	
§ 6. Распознавание образов и обучение . . . . .	45
1. Распознавание как "релаксация стимула" (45). 2. Распознавание образов при конечной температуре термостата (48). 3. Выработка прототипа (53). 4. Самоорганизация нейронных сетей (56). 5. Модель выработки ассоциаций (58).	
<b>Глава 3. Сенсомоторные системы и их моделирование . . . . .</b>	61
§ 7. Зрение . . . . .	62
1. Элементы зрительного распознавания (62). 2. Зрительная система человека и модели (64).	
§ 8. Слух . . . . .	71
1. Слуховое распознавание (71). 2. Слух человека (72). 3. Моделирование распознавания речи (75).	
§ 9. Осязание . . . . .	81
1. Тактильные системы животных (81). 2. Осязание у человека (85). 3. Моделирование осязания (87).	
§ 10. Моторика . . . . .	88
1. Движения руки (88). 2. Механическая рука (89). 3. Речь (90).	

§ 11. Взаимодействие сенсорной и моторной систем . . . . .	91
1. Афазия (91). 2. Моделирование взаимодействия сенсорных и моторных систем (95).	
<b>Глава 4. Элементы мышления . . . . .</b>	<b>97</b>
§ 12. Мысление . . . . .	97
1. Поток сознания (97). 2. Пример моделирования "логического вывода" (100). 3. Выявление темы при блуждании в системе образов памяти (101). 4. Поиск аналогии (103). 5. "Сценарии" (109). 6. Вспоминание (111). 7. Использование классификации и целостных "картины" для облегчения вспоминания или поиска аналогии (113).	
§ 13. Понимание . . . . .	116
1. Поверхностное и глубокое понимание (116). 2. Новичок и специалист. Инструкции и алгоритмы (118).	
§ 14. Структура памяти . . . . .	121
1. Иерархия памяти (121). 2. Линнеевская схема (124).	
§ 15. Цели мышления . . . . .	127
1. Социальные стереотипы (127). 2. "Ханойская башня". Пример решения задачи путем присвоения образу цели низкой энергии (129).	
<b>Глава 5. Модели мира . . . . .</b>	<b>134</b>
§ 16. Наука о Земле . . . . .	136
1. Модели климата. (136). 2. Рост растений (137). 3. Экономика (141). 4. Моделирование исторического процесса (142).	
§ 17. Естественные науки. . . . .	143
1. Естественная история. Эволюция (143). 2. Строение вещества. Макрокосм (144). 3. Математика (144).	
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>146</b>
<b>Приложение 1 . . . . .</b>	<b>147</b>
<b>Приложение 2 . . . . .</b>	<b>148</b>
<b>Приложение 3 . . . . .</b>	<b>151</b>
<b>Приложение 4 . . . . .</b>	<b>152</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>154</b>
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>158</b>

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Что происходит, когда я закрываю глаза и представляю себе, например, яблоко? Как узор нервных импульсов в мозгу человека складывается в образ, мысль? Каковы общие для всех людей элементы процесса мышления и каковы различия, определяющие не-повторимую индивидуальность мышления каждого человека? Можно ли описать эти процессы с помощью математики?

Три события последних десятилетий определили резкое возрастание интереса к этим вопросам и активизировали научные исследования в этой области. Это нейрофизиологические исследования на животных (и сопутствующие исследования их поведения), реализация голограммии и бурное развитие ЭВМ. Нейрофизиологические исследования моллюсков, насекомых и высших животных позволили изучить действие простейших нейронных сетей или их частей; есть основания полагать, что многие подсистемы нервной сети мозга человека действуют сходным образом. Голограммия явила собой пример реализации записи и считывания информации в большой системе светочувствительных нелинейных элементов: возможно, в системе нейронов запись и считывание информации подчиняются близким закономерностям. Наконец, появление с развитием ЭВМ экспертных систем, банков и баз данных дало большой материал по имитации процесса решения ряда задач человеком, а осознание ограниченности фон-неймановских машин усилило интерес к параллельной обработке информации на ЭВМ, а в этой связи и к параллельной обработке информации в нейронных системах мозга.

В рамках представлений о процессе мышления как об активности нейронных ансамблей один из вариантов "голографической модели памяти" (получивший наименование "brain state in a box") был в последние годы развит физиками, так что оказалось возможным применить ряд методов, результатов и представлений теоретической физики и математики (пределные точки и множества, хаос и порядок, иерархия структур) к моделированию процессов распознавания и обучения, а также к задаче структурирования знаний.

Конечно, пока не приходится говорить о возможности моделирования психики человека или процесса мышления в целом – сегодня "за кадром" модели остаются, например, эмоции, воля, желание, интерес. Однако оказывается, что в рамках рассматриваемых математических моделей можно выявлять аналогии таких актов и свойств мышления, как понимание, обобщение, интуиция, планирование, принятие решений и др.

В заключение я хочу принести глубокую благодарность за плодотворные дискуссии по вопросам, затронутым в монографии, А.А. Ежову, О.П. Иванову, А.М. Камчатнову, Е.Б. Левченко, И.Б. Степкиной, Л.И. Третьяковой, А.В. Чернавскому, А.Л. Чернякову.

Искренне признателен члену-корреспонденту АН СССР М.В. Волькенштейну и кандидату физико-математических наук В.М. Сергееву за доброжелательную критику и ряд конструктивных замечаний, которыми я с удовольствием воспользовался.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Основу мышления человека составляют три элемента – три "краеугольных камня": способность распознавать объекты и явления внешнего мира, способность к обучению, владение языком как средством общения с другими людьми.

Моделирование этих элементов мышления и рассматривается в предлагаемой книге. Слово "моделировать" по Далю означает исследовать "явления и процессы на моделях, чтобы по результатам опытов судить о процессах, протекающих в натуральных условиях", а слово "модель" означает "вспомогательный объект (или система), заменяющий изучаемый объект" [49] или же "образец в малом виде" [13].

Мы будем рассматривать несколько типов моделей. К одному типу принадлежат модели, созданные в процессе эволюции самой природой, а именно простые живые организмы – бактерии, простейшие моллюски, насекомые. У этих организмов в зачаточном виде имеются либо все, либо некоторые из перечисленных выше основных элементов мышления человека, и они могут распознавать различные явления и объекты внешнего мира, разделяя их, как и человек, на отдельные категории. Такие организмы обучаются новому, и это обучение накладывает необратимый отпечаток на их поведение: у некоторых из них, например у насекомых, имеется ряд сигналов для передачи сообщений другим членам сообщества, и прием различных сообщений вызывает у них различные поведенческие реакции. Изучая поведение простых организмов и исследуя физические и химические изменения как реакции на внешнее воздействие, происходящие в них при приеме информации из внешнего мира, можно получить сведения о перестройках их молекулярных структур и нервных сетей, вероятно, близких к аналогичным перестройкам в системе нервных клеток человека.

Совершенно иной тип моделей – это модели физические и математические. При построении и исследовании таких моделей важно учесть прежде всего то, чтобы в них присутствовали те же основные элементы, что и в мышлении: возможность распознавания предъявленных "стимулов" путем отнесения их к одной из нескольких категорий; возможность изменения самой этой "спо-

собности" к распознаванию при изменении "образов памяти" в результате "обучения" (т.е. неоднократного предъявления стимулов); возможность "структурить" образы памяти, создавая из них новые "темы".

Наконец, своеобразное моделирование элементов мышления – это создание и изучение так называемых систем искусственного интеллекта: экспертных систем, роботов, диалоговых систем и т.п. Во всех этих многочисленных в наше время системах, использующих большие и малые ЭВМ, составители программ так или иначе отражают свои знания и свое представление о том, как аналогичную работу выполнил бы человек. Такие системы часто носят эмпирический характер, не имеют какой-либо известной математической, физической или биологической аналогии, но тем не менее они имитируют элементы поведения человека, а принципы их работы, возможно, отражают некоторые механизмы мышления.

Во всех моделях, рассматриваемых в книге, присутствуют способность к распознаванию объектов внешнего мира путем их категоризации, т.е. отнесения к одному из образов, имеющихся в памяти, и способность к обучению.

В главе 1 рассказано, как эти свойства реализованы у простых организмов. Механизмы распознавания внешних стимулов, попадающих в "воронку" одного из образов памяти, оказываются различными у одноклеточных и многоклеточных организмов. Для одноклеточных – это перестройка надмолекулярных структур, т.е. структур, образованных молекулами клетки; эти структуры обладают определенной регулярностью и похожи на надмолекулярные структуры жидких кристаллов. При такой перестройке, возникающей, например, у бактерий при связывании с рецептором молекулы химического соединения, имеющегося в окружающем растворе, переключается направление вращения бактериального "мотора" и в результате меняется направление движения клетки. У простых многоклеточных организмов с их относительно несложной нейронной сетью распознавание близких стимулов при их попадании в одну из "воронок" вызывает определенную стереотипную реакцию в результате прохождения по нейронной сети серии волны нервных импульсов, запуска моторных нейронов и сокращения мышц, управляющих движением животного.

Наряду с распознаванием простые организмы обладают способностью к обучению, хотя и в зачаточном состоянии. Оно может быть обусловлено различными механизмами, но во всех случаях обладает свойством необратимости – приобретенные в результате обучения изменения в поведении могут сохраняться в течение долгого времени.

Глава 2 посвящена описанию физической модели нейронного ансамбля. Здесь рассматривается модель (имеющая некоторую

физиологическую основу) системы нейронов с двумя динамическими переменными — вектором состояния нейронов (описывающим их мгновенную активность) и матрицей памяти (характеризующей взаимодействие нейронов). Уравнения для этих двух связанных между собой динамических переменных по своему физическому смыслу соответствуют движению камня по глинистому склону под действием силы тяжести и трения: скользя по склону, камень оставляет на нем борозду, и если этот процесс повторяется, борозда с каждым разом становится все глубже и глубже. В нашем случае, однако, движение такого типа происходит в многомерном пространстве (его размерность равна числу нейронов в ансамбле).

С теоретической точки зрения модель очень "экономна" — оба уравнения (для движения камня и для углубления борозды) получаются по стандартной процедуре, принятой в теоретической физике, из единственного выражения для "обобщенной энергии" (взята с отрицательным знаком, она носит название функции Лагранжа). Движение камня соответствует процессу распознавания образов, углубление борозды — обучению.

В то же время рассматриваемая модель обладает свойствами, близкими к свойствам голограммии, — записи и воспроизведения информации с помощью когерентных волн.

В главе 3 рассматриваются сенсомоторные системы — органы чувств и органы движения простых организмов и человека, а также современные попытки моделирования этих органов и их функций в системах искусственного интеллекта.

Глава 4 содержит материал, посвященный собственно процессу мышления — потоку сознания, нахождению аналогий, пониманию, вспоминанию. Здесь обсуждается вопрос о структуре (профессионального) знания и о тех "движущих силах", которые направляют наше мышление.

Последняя глава 5 посвящена краткому описанию современных моделей мира, нынешних представлений о различных процессах в природе и обществе, что особенно актуально в связи с проблемой "глубинного" понимания, важного и для самого человека, и для систем искусственного интеллекта.

---

## ГЛАВА 1

### РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ И ОБУЧЕНИЕ У ПРОСТЫХ ОРГАНИЗМОВ

В этой главе рассказано, как свойство распознавания образов внешнего мира путем отнесения их к одной из имеющихся в памяти категорий и способность к обучению (хотя и в зачаточном виде) реализованы у простых организмов.

Самые простые из живых организмов – одноклеточные. К ним относятся бактерии и некоторые простейшие. Эти организмы, возникшие в процессе эволюции жизни на Земле около трех миллиардов лет назад, обладают развитым поведением, проявляющимся в их направленном движении в среде обитания как реакции на изменение условий внешнего мира. У этих организмов при определенных условиях проявляется также изменчивость поведения, в частности, появляются новые реакции в результате изменения условий в среде обитания.

Рассмотрев поведение одноклеточных организмов и интерпретацию этого поведения (способность к категоризации и к изменениям памяти) в § 1, мы перейдем (§ 2) к обсуждению поведения простейших многоклеточных организмов. При этом мы не будем рассматривать одннейронные нервные системы гидроидных полипов и актиний или двухнейронные нервные системы медуз, а перейдем сразу к организмам, поведение которых определяется уже довольно развитой и имеющей иерархическую структуру нервной системой, осуществляющей прием информации об окружающем организме и формирующей определенные двигательные реакции организма в ответ на полученную информацию. Наиболее простыми из таких организмов являются простейшие беспозвоночные; нервная система лучше всего изучена к настоящему времени у червей и моллюсков, и именно последних мы рассмотрим в качестве примера организмов с небольшим числом нейронов [29, 66].

Из четырех типов высших беспозвоночных только один – членистоногие – живет на суше; только один из пяти классов членистоногих – насекомые – образует популяции, состоящие не из отдельных особей, а из сообществ, в состав которых входят особи нескольких типов, выполняющие различные функции. О них пойдет речь в § 3.

## § 1. Одноклеточные организмы

**1. Фототаксис и хемотаксис бактерий.** Часть энергии (несколько процентов), вырабатываемой в световых процессах фотосинтеза на мембранах бактерий, используется бактериями для движения в питательной среде. Механизмы этого движения, возникшие и закрепившиеся в процессе эволюции жизни на Земле, позволяют бактериям, передвигаясь в воде, искать и находить места, освещенные более ярким светом и более богатые питательными веществами.

Рассмотрим вначале явление фототаксиса — моторной реакции, вызываемой светом. Наиболее характерное явление фототаксиса — изменение направления движения бактерии *Rhodospirillum rubrum* (*R. r.*) на обратное, которое возникает, если внезапно уменьшить интенсивность света, падающего на бактерию. В результате колония бактерий собирается в световом пятне, т.е. в месте, где интенсивность света наиболее высокая. Действительно, клетки при своем движении в направлении уменьшения интенсивности света чувствуют падение интенсивности во времени. Поэтому они возвращаются в область повышенной интенсивности света, меняя направление движения на обратное. Если же бактерия движется по направлению возрастания интенсивности света, то обращения направления движения не происходит.

Экспериментальные исследования показали, что между фотосинтезом и фототаксисом имеется близкая связь. Во-первых, для бактерий *R. r.* спектры действия света для фотосинтеза и фототаксиса весьма близки; во-вторых, световое насыщение фотосинтеза сопровождается аналогичным световым насыщением фототаксиса; наконец, в-третьих, было показано, что мутанты бактерий, не обладающие фототаксисом, не способны и к фотосинтезу.

Интересно отметить, что фототаксис фотосинтезирующих бактерий подчиняется закону Вебера — Фехнера (см. гл. 3), согласно которому реакция живого организма определяется относительным изменением какого-либо внешнего стимула. Для ряда фотосинтезирующих бактерий было экспериментально показано, что для возникновения реакции изменения направления движения бактерий необходимо двухпроцентное уменьшение интенсивности света; при этом исходная интенсивность света менялась в экспериментах в сотни раз.

Таким образом, мы видим, что фототаксис фотосинтезирующих бактерий представляет собой закрепленную в результате эволюции способность этих организмов передвигаться в поисках места, где интенсивность падающего света наибольшая, и следовательно, скорость фотосинтеза и скорость размножения бактерий будут также наибольшими. Генетические линии данного вида фотосинтезирующих бактерий, обладающие фототаксисом, получают преимущество

по сравнению с линиями, не обладающими этим признаком, и, размножаясь быстрее, имеют большую вероятность выживания.

Фотосинтезирующие бактерии обладают, кроме фототаксиса, еще одной похожей поведенческой реакцией, называемой хемотаксисом. Механизмы фототаксиса и хемотаксиса во многом близки: поскольку хемотаксис бактерий к настоящему времени изучен более полно, рассмотрим это явление более подробно.

Хемотаксис – это механический ответ живого существа на химический стимул, выражющийся в направленном перемещении организма.

Подвижные бактерии в растворах могут двигаться по направлению к области повышенной концентрации одних веществ (называемых атTRACTантами) и уходить от области повышенной концентрации других веществ (называемых репеллентами). В природе бактериальная клетка обнаруживает пространственные градиенты растворенных химических веществ путем "считывания и сравнения" концентрации веществ в растворе как функции времени – бактерия реагирует на изменения концентрации веществ, встречающихся на пути ее движения. В действительности бактерия чувствует временные изменения концентрации растворенного атTRACTанта или репеллента. В лабораторных исследованиях часто создают такие изменения их концентрации путем внезапного добавления или устранения этих химических веществ.

В отсутствие химических стимулов движение бактериальной клетки характеризуется периодами равномерного прямолинейного движения, прерываемого через случайные промежутки времени короткими периодами хаотического "дрожания". Прямолинейное движение создается при длительном вращении бактериального жгутика против часовой стрелки. Дрожание вызывается изменением направления вращения: от вращения против часовой стрелки к вращению по часовой стрелке.

На увеличение концентрации атTRACTанта бактерия отвечает уменьшением частоты дрожаний. Время между последовательными дрожаниями возрастает, длительность участка прямолинейного движения увеличивается, и бактерия движется в направлении увеличивающейся концентрации атTRACTанта \*). В лабораторных

\*) Так выглядит переход от прямолинейного движения к "дрожанию" у бактерии *E. coli*; у других бактерий реакция на атTRACTант иная – например, фотосинтезирующая бактерия *H. halobium* при изменении направления вращения жгутиков меняет и направление движения на противоположное; при воздействии атTRACTанта (например, при усилении желто-зеленого света) интервал времени между сменой направления вращения жгутиков (и, следовательно, сменой направления прямолинейного движения) увеличивается [112].

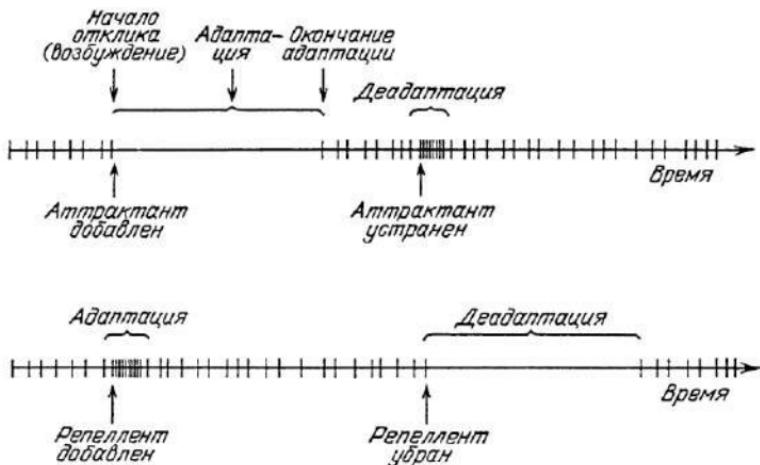


Рис. 1.1. Схема временного отклика бактерии на внешний стимул

опытах при однородном увеличении концентрации аттрактанта во всем объеме раствора время между двумя последовательными дрожаниями также возрастает, длительность периода плавного движения увеличивается. Однако по истечении определенного времени частота дрожания возвращается к прежнему значению, существовавшему до добавления аттрактанта, и бактерия становится нечувствительной к присутствию данного вещества. Само возникновение изменения поведения бактерий (изменение частоты дрожаний) называют сенсорным возбуждением, а последующую потерю чувствительности — сенсорной адаптацией. Процесс адаптации начинается в момент добавления аттрактанта и продолжается до своего полного завершения, т.е. до окончания отклика бактерии на химический стимул. Время между последовательными дрожаниями бактерии в отсутствие стимула — порядка секунд; за это время бактерия "проплывает" расстояние в несколько десятков микрометров. Время адаптации составляет несколько минут. Это иллюстрирует рис. 1.1, где каждая вертикальная черточка на временной шкале означает дрожание.

При устраниении аттрактанта чувствительность бактерии к нему быстро восстанавливается, бактерия вновь может реагировать на добавление этого вещества. Это восстановление чувствительности бактерии считают процессом, обратным адаптации, и называют дезадаптацией. Время дезадаптации составляет несколько секунд.

Добавление репеллента приводит к кратковременному увеличению частоты дрожания, а его устранение вызывает длительное уменьшение частоты дрожания.

В результате при наличии градиентов концентрации в растворе бактерия движется в сторону увеличения концентрации атTRACTанта и, перейдя из области с меньшей его концентрацией в область с большей концентрацией и совершая время от времени случайные дрожания, вновь начинает поиск направления, в котором концентрация атTRACTанта увеличивается. Следует отметить, что атTRACTантами являются, как правило, продукты питания бактерий, а репеллентами — продукты их жизнедеятельности.

Последовательность явлений, приводящих к такому поведению бактерий при наличии в среде атTRACTантов и репеллентов, в настоящее время представляют себе следующим образом [114]. Присутствующие в растворе атTRACTанты или репелленты связываются с хеморецепторами бактерий — белками, находящимися либо в мембране, либо вблизи нее, в поверхностном слое бактериальной клетки (в периплазме). При образовании комплекса атTRACTант — хеморецептор (или репеллент — хеморецептор) происходит конформационное изменение хеморецептора и окружающей его структуры, приводящее одновременно к двум явлениям.

Во-первых, конформационное изменение передается по мемbrane от рецептора к "мотору", вызывающему движение бактерии, и вследствие этого изменяется характер его вращения; во-вторых, согласно [114] конформационное изменение хеморецептора "обнажает" группу —  $\text{CO}-\text{O}^-$ , и становится возможным присоединение

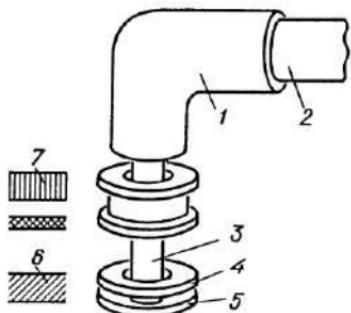


Рис. 1.2. Схема бактериального мотора

к ней метильной группы  $\text{CH}_3$ . Сигнал, приходящий от хеморецептора к мотору, воздействует на так называемый регулятор дрожания, вызывая изменение частоты дрожания бактерий. Метилирование группы —  $\text{CO}-\text{O}^-$  происходит медленно, в течение нескольких минут, и его результатом является возвращение конформации к исходной, что приводит к исчезновению сигнала, поступающего от хеморецептора к регулятору дрожаний, и восстановлению прежней скорости дрожания бактерий, т.е. к адаптации бактерии к атTRACTанту.

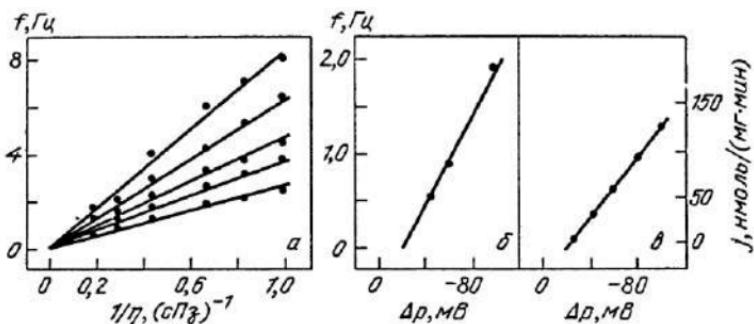


Рис. 1.3. Характеристики бактериального мотора

Прежде всего опишем структуру мотора бактериальной клетки. Он состоит из системы колец (дисков) 4 – 5, к одному из которых прикреплен стержень, а другие кольца соединены со стенками бактериальной клетки 6 – 7 (рис. 1.2). К стержню 3 прикреплен "крюк" 1, переходящий в длинную нить 2. Крюк и нить, выступающие из тела бактериальной клетки, погружены в окружающий раствор; вместе с кольцами и стержнем они составляют бактериальный жгутик. Обычно спираль жгутика является левовинтовой и при нормальном прямолинейном движении вращается против часовой стрелки.

У целого ряда бактерий имеются только два кольца в бактериальном моторе: *S*-кольцо, прикрепленное к стенке бактерии, и *M*-кольцо, отстоящее от первого на 3,5 нм, погруженное в цитоплазматическую мембрану и скрепленное со стержнем мотора.

Электронно-микроскопические исследования показали, что кольца состоят из 15 – 16 секторов. В живой бактериальной клетке часть энергии, получаемой при фотосинтезе или питании, используется для приведения в действие протонного "насоса", выкачивающего протоны из клетки во внешнюю среду и создающего таким образом в клетке пониженную концентрацию протонов. Предполагается, что возникающий в результате этой разности концентраций поток протонов между *S*- и *M*-кольцами приводит в движение бактериальный мотор. В экспериментах с бактерией, прикрепленной к стеклу (так что при работе мотора жгутик неподвижен, а тело бактерии вращается), было показано, что "ротор" мотора совершает относительно "статора" один оборот при прохождении примерно 300 протонов, причем направление вращения не зависит от направления потока протонов – из клетки в раствор или наоборот.

Характеристики бактериального мотора (жгутик закреплен, бактерия вращается, если в растворе есть источник углерода) приведены на рис. 1.3: *α* – зависимость частоты вращения *f* от обрат-

ной величины вязкости среды  $\eta$  при различных концентрациях питательных веществ в среде (различные прямые);  $b$  – зависимость частоты вращения  $f$  от протонно-движущей силы, равной  $\Delta p = \Delta\psi - 2,3T\Delta pH$  ( $\Delta\psi$  – разность электрических потенциалов внутри и вне клетки,  $\Delta pH$  – разность водородных показателей);  $c$  – зависимость потока протонов  $j$  в клетку, отнесенного к сухой массе клетки, от протонно-движущей силы  $\Delta p$ .

Независимость направления вращения мотора от направления потока протонов вместе с существованием секторной структуры колец позволила предположить [102], что бактериальный мотор действует по принципу верньера\*), поскольку полное число оборотов при вращении одного из верньерных дисков с 15 и 16 делениями составляет  $15 \times 16 = 240$ , так что если прохождение одного протона соответствует одному наименьшему возможному перемещению двух верньерных дисков, то полный оборот ротора относительно статора произойдет после перемещения 240 протонов, что сравнимо с экспериментальным значением (300 протонов).

Если принципы действия хеморецептора и бактериального мотора относительно ясны, то вопрос о передаче сигнала от хеморецептора к мотору (или регулятору дрожаний) остается наименее выясненным. Ряд экспериментальных данных указывает на то, что передача сигнала от рецептора к мотору не может осуществляться путем диффузии химического посредника внутри бактериальной клетки, в частности, потому, что время такой передачи было бы слишком большим. Это заставляет склониться к той точке зрения, что передача сигнала от рецептора к эффектору осуществляется в бактериях с помощью квазинервного механизма, путем передачи сигнала по мембране. В частности, одна из схем предполагает, что конформационные изменения в рецепторе при связывании с ним молекулы атTRACTанта или реPеллента, передающиеся по мембране, приводят к открыванию кальциевого канала, расположенного в непосредственной близости к мотору, в результате чего возникает поток ионов  $\text{Ca}^{2+}$  из раствора в клетку (внутри которой до поступления сигнала от хеморецептора с помощью кальциевого насоса, откачивающего ионы  $\text{Ca}^{2+}$  из клетки, поддерживаясь пониженная концентрация этих ионов). Повышение концентрации ионов  $\text{Ca}^{2+}$  вблизи мотора вызывает конформационное изменение регулятора дрожаний и приводит к изменению частоты дрожаний бактерий.

\* ) Верньер представляет собой круговой вариант общизвестного нониуса – приспособления для точного отсчета длины, имеющегося, например, на штангенциркуле.

Рассмотрим теперь взаимное влияние фототаксиса и хемотаксиса. Некоторые бактерии могут вырабатывать АТФ, используя либо падающий свет (в процессах фотофосфорилирования), либо кислород внешней среды (в процессах окислительного фосфорилирования). В темноте или на слабом свете у этих бактерий преобладают процессы окислительного фосфорилирования; при освещении включаются процессы фотофосфорилирования, и скорость поглощения кислорода из внешней среды (окислительное фосфорилирование) уменьшается (рис. 1.4; сплошная кривая) по сравнению

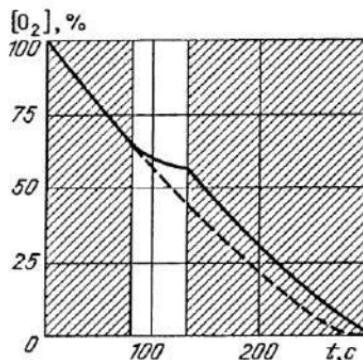


Рис. 1.4. Зависимость концентрации кислорода в растворе, содержащем бактерии *Halobacterium halobium*, от времени

со случаем без освещения (штриховая кривая). Светлая полоса на рисунке соответствует времени, в течение которого раствор был освещен. Такие бактерии, владеющие двумя способами удовлетворения энергетических потребностей, необходимых для их метаболизма, характеризуются следующим поведением.

Бактерии *R.r.* в темноте или на слабом свете, когда основным процессом, поставляющим энергию, является потребление кислорода (окислительное фосфорилирование), обладают положительным аэротаксисом — бактериальные клетки движутся преимущественно в направлении возрастания концентрации кислорода в среде и, в частности, собираются около пузырька кислорода, введенного в суспензию бактериальных клеток. Оказывается, что при освещении такой среды ярким светом однородной интенсивности положительный аэротаксис подавляется.

На свету, когда основным процессом, поставляющим энергию, является фотофосфорилирование, бактерии *R.r.* обладают свойством положительного фототаксиса — они собираются в области светового пятна. Если кювету с этими фотосинтезирующими бактериями интенсивно аэрировать, т.е. пропускать через нее кислород или воздух, то положительный фототаксис бактерий подавляется.

Таким образом, при рассмотрении этих двух примеров изменения поведения бактерии мы сталкиваемся с явлением ослабления поиска организмом некоторого положительного стимула при вклю-

чении другого положительного стимула. Такое существенное изменение поведения этих организмов связано, по-видимому, с "экономией" энергии, затрачиваемой на движение в среде (лишь несколько процентов энергии метаболизма).

**2. Рефлекс и обучение.** Если адаптация бактерий к химическим атTRACTантам и репеллентам экспериментально твердо установлена, то экспериментальные сведения о классическом условном рефлексе или обучении у бактерий в настоящее время отсутствуют. Имеющиеся сведения о неаддитивности отклика бактерий на воздействие двух различных атTRACTантов (или на воздействие атTRACTанта и репеллента) носят предварительный характер [94]. Кошленд [92] говорит о том, что если бактерии, не реагировавшие на определенное химическое вещество, растить в специально подобранный среде, то у них появляется способность реагировать на это вещество. Возможно, это явление следует относить к изменчивости бактерий. Для более сложных одноклеточных живых существ – простейших жгутиковых (*Euglena*) и ресничных (*Paramecium*) – имеются отдельные сообщения о существовании условных рефлексов [25, 89].

Обсуждая возможные механизмы условного рефлекса, обратимся к модели двух путей, идущих от различных рецепторов и соответствующих безусловному и условному стимулам (рис. 1.5), между которыми, при их одновременном включении, может возникать связь. Путь 1 от рецептора безусловного стимула  $R_1$ , является эффективным, и при прохождении сигнала по этому пути происходит то или иное переключение мотора  $M$ ; путь 2 от рецептора условного стимула  $R_2$  является неэффективным, и при прохождении

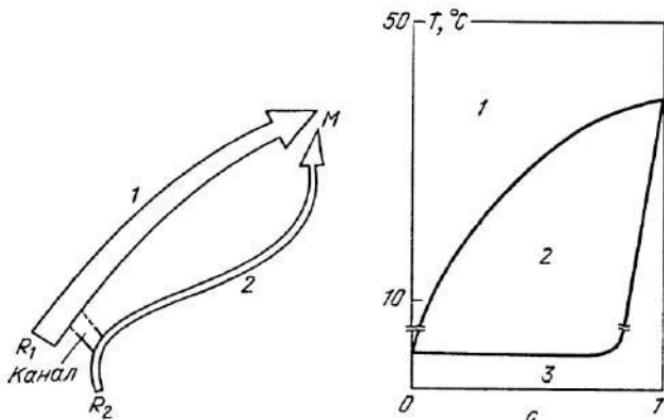


Рис. 1.5. Модель "прорастания" канала при возникновении условного рефлекса

Рис. 1.6. Фазовая диаграмма мембранны из смеси двух липидов: 1 – жидкий кристалл, 2 – жидкий кристалл + гель, 3 – гель

сигнала по этому пути переключения мотора не происходит. Если при повторяющемся одновременном воздействии условного и безусловного стимулов на их рецепторы между путями 1 и 2 "прорастает" канал, связывающий эти пути (например, так, что длина канала пропорциональна полной длительности одновременной работы обоих путей), то после определенного числа таких воздействий стимулов на их рецепторы канал соединит пути 1 и 2. После этого для условного стимула будет открыт эффективный путь 1, и возникнет условный рефлекс. Медленная релаксация в отсутствие подкрепления приведет к рассасыванию канала и утрате условного рефлекса. Описанная модель прорастающего канала предполагает наличие двух процессов, характеризующихся различными временными масштабами: быстрого процесса распространения возмущения (рост канала) и медленного процесса релаксации этого возмущения.

Самую грубую аналогию с физическим явлением подобного рода можно провести, рассматривая фазовые переходы первого рода в системе, находящейся в равновесии и содержащей обе фазы. Например, пропуская электрический ток через подсоленный лед при 0<sup>6</sup> С, расплавим некоторое количество этого льда. После прекращения импульса тока появившаяся вода не замерзает, если нет теплоотвода к стенкам сосуда, заключающего в себе образец. Повторное приложение импульсов тока будет плавить все большее и большее количество льда, увеличивая размеры образующегося жидкого канала.

Аналогичное фазовое превращение в лиотропных жидкостях системах, содержащих две равновесные фазы, вероятно, может служить более реальной моделью прорастания канала, соединяющего пути безусловного и условного стимулов в приведенной модели условного рефлекса \*).

Следует, конечно, заметить, что в подобных грубых схемах бактерии и одноклеточные простейшие организмы уподобляются элементарным "молекулярным" машинам. Однако в них отсутствуют элементы обратных связей и не может возникнуть явление (или состояние) типа сознания, которое, согласно [64], "возникает в результате фазного повторного хода сигналов, происходящего

\* ) В связи с этим можно упомянуть о фазовом переходе, вызываемом как изменением температуры, так и изменением концентрации ионов Ca<sup>2+</sup>, между жидким кристаллом и гелем в мембране из смеси двух липидов [99] (рис. 1.6, где с – доля одного из липидов). Накопление ионов Ca<sup>2+</sup> может вызвать фазовый переход в мембране, тем самым изменить ее физические свойства и привести к необратимому изменению цепи сенсорной передачи. Само же накопление ионов Ca<sup>2+</sup> может возникнуть, например, в результате прохождения импульсов по путям сенсорной передачи [105].

в параллельных процессах, которые включают в себя ассоциации между заложенными в память формами сигналов и текущей сенсорной или внутренней входной сигнализацией".

**3. Категоризация и пластичность "памяти" у бактерий.** В поведении бактерий в зачаточном виде проявляются два свойства, которые, как мы узнаем из следующих глав, являются определяющими для процессов, связанных с мышлением человека, — способность к категоризации объектов и явлений внешнего мира и способность памяти к изменению в результате взаимодействия с внешним миром.

Все множество химических веществ, присутствующих в среде, где обитает бактерия, она "ощущает" несколькими десятками своих рецепторов. Соединяясь с рецепторами (белковыми молекулами, находящимися на поверхности бактерии), молекулы химических веществ производят конформационные изменения этих рецепторов и их ближайшего молекулярного окружения. В результате изменяется конформация всей молекулярной структуры, соединяющей данный рецептор с отстоящим от него на несколько микрометров регулятором направления вращения бактериального мотора. По-видимому, именно "волна структурного изменения", проходящая по телу бактерии от рецептора к мотору, вызывает изменение конформации регулятора вращения. Энергия этой волны теряется в процессе релаксации всей "передающей" молекулярной структуры — ее перестройки в такую структуру, которая включает в себя новое положение или новую конформацию регулятора вращения мотора.

При этом химические вещества среды, в которой находится в данный момент бактерия, соединяются с различными рецепторами на поверхности бактерии и производят изменение молекулярных структур, связывающих эти рецепторы с мотором, — но все это разнообразие структур, релаксируя в процессе прохождения волн структурного изменения от рецепторов к мотору, приходит лишь к двум конечным конформациям регулятора направления вращения, которые соответствуют вращению либо по часовой стрелке, либо против нее.

Таким образом, все "ощущения" химических веществ бактерия как бы делит на две категории: "положительные", когда разрешается вращение мотора только против часовой стрелки (и в результате бактерия плывет по направлению к месту повышенной концентрации "ощущаемого" вещества), и "отрицательные", когда не разрешается вращение мотора только против часовой стрелки, и в результате бактерия плывет в направлении от места повышенной концентрации "ощущаемого" ею вещества.

Таким образом, категоризация явлений внешнего мира у бактерий производится (по крайней мере) в два этапа: не слишком

сильно различающиеся молекулы различных химических веществ — атTRACTантов — могут соединяться с одним и тем же рецептором; соединяясь с рецептором, они вызовут несколько различающиеся конформационные изменения вблизи рецептора, но прохождение "волны структурного изменения" к мотору приведет во всех (результативных) случаях к одному и тому же исходу — фиксации регулятора вращений в положении, соответствующем вращению против часовой стрелки. Таким образом, объединение группы близких химических веществ на одном рецепторе и объединение волн структурных перестроек от различных рецепторов на одном регуляторе вращений — это два этапа единого процесса категоризации у бактерии: отнесение всех химических веществ, присутствующих в среде обитания, к одной из двух категорий — атTRACTантам или repellентам.

Можно сказать (конечно, весьма условно), что у бактерии имеются в памяти всего два "образа" — "образ атTRACTанта" и "образ repellента" — и что, взаимодействуя с внешним миром, бактерия "распознает" внешние химические стимулы и относит их к одному из имеющихся у нее в памяти этих двух образов. Распознав стимул (химическое вещество), бактерия ведет себя однозначно — плывет к атTRACTанту и уплывает от repellента.

Однако столь же условно можно сказать, что у бактерии имеется несколько десятков образов, соответствующих конформационным изменениям нескольких десятков типов рецепторов различных типов. Это означало бы, что все химические вещества разбиваются для бактерии на несколько десятков категорий (каждая категория соответствует одному рецептору), а они уже, объединяясь, разбиваются на две более крупные категории — атTRACTанты и repellенты.

Не забывая, что понятия, относящиеся к мышлению человека, следует применять к другим живым существам (в частности, к бактериям) очень осторожно, обсудим теперь пластичность "памяти" бактерий.

При выращивании культуры бактерий в среде, содержащей новое химическое вещество, мы видим, что бактерии начинают реагировать на вещества, к которым они раньше относились безразлично. Это появление способности бактерии реагировать на новое химическое вещество соответствует возникновению в ее "памяти" новой категории "образов", относящихся, естественно, к одной из двух более крупных категорий — атTRACTантам или repellентам.

В заключение этого параграфа отметим, что "сенсомоторная система" бактерии (рецепторы; молекулярные структуры, связывающие рецепторы с регулятором вращения и мотором; сам регулятор вращения и мотор), безусловно, связана с системами, осуществляющими метаболизм и воспроизведение бактерий: переработку питательных веществ, выработку энергии, поддержание

гомеостаза, репликацию внутриклеточных структур и деление клетки. Все эти системы, по-видимому, "модулируют" работу сенсомоторной системы, вызывая химические и структурные изменения элементов последней, как на разных этапах жизненного цикла бактериальной клетки, так и при изменениях во внешней среде и в самой клетке.

Такое взаимодействие различных сенсомоторных систем бактериальной клетки с другими системами ее жизнеобеспечения отдаленно напоминает взаимодействие мозга человека с его другими системами жизнеобеспечения и репродуктивной системой.

## § 2. Организмы с небольшим числом нейронов

**1. Нейрон [52].** Прежде чем переходить к системам нейронов, обсудим свойства отдельного нейрона — клетки, имеющей те же гены, то же общее строение и тот же метаболизм, что и другие клетки данного организма, но наряду с этим обладающие уникальными структурными особенностями и способностью генерировать нервные импульсы.

Отдельный нейрон в определенном смысле похож на рассмотренную в предыдущем параграфе бактерию — он воспринимает химический сигнал (но не от внешнего мира, а от других клеток) и реагирует на него повышением или понижением частоты ответов (но здесь ответ состоит не в переключении направления вращения мотора, а в генерации электрического импульса). Как и у бактерии, в этих процессах восприятия химических сигналов и генерации импульсов нейроном (передающихся другим нейронам) важную роль играют перестройки надмолекулярных структур в различных частях данной нервной клетки, а также волны структурных перестроек, сопровождающие

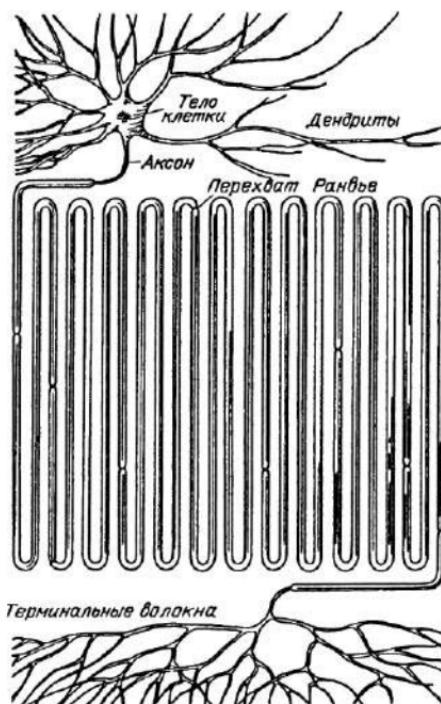


Рис. 1.7. Схема строения нейрона

передачу информации в пределах данного нейрона и от одного нейрона к другому. Процессы метаболизма (обеспечивающие, в частности, нервную клетку энергией) восстанавливают эти надмолекулярные структуры, перестраивающиеся в процессах передачи информации.

У большинства нейронов можно выделить три крупные области — тело нейрона, дендриты и аксон (рис. 1.7). Тело нейрона, имеющее обычно сферическую или пирамидальную форму, содержит ядро (определенное наследственность) и биохимический аппарат синтеза ферментов и других молекул, необходимых для жизнедеятельности клетки. Дендриты — тонкие трубчатые волокна, образующие ветвистое дерево вокруг тела нейрона, служат для приема сигналов от других нейронов. Аксон — длинная трубка, тянущаяся на большое расстояние (иногда больше метра), служит для передачи сигналов, вырабатываемых телом нейрона, другим нейронам; на конце, удаленном от тела нейрона, аксон делится на тысячи терминальных (концевых) волокон, контактирующих своими концами с дендритами других нейронов (бывают, правда, и другие контакты — аксона с аксоном, дендрита с дендритом, аксоном и телом нейрона).

Контакт терминального волокна аксона одного нейрона с дендритом другого называется синапсом. Синапс состоит из двух принадлежащих этим различным клеткам мембран, между которыми имеется зазор — синаптическая щель. Внутри терминального волокна вблизи мембранны находится медиатор — химическое вещество,участвующее в переносе сигнала от одной нервной клетки к другой. В покое, т.е. до прихода нервного импульса по аксону и его терминальному волокну, концентрация медиатора в синаптической щели очень мала. С приходом нервного импульса состав клетки меняется — открываются ионные каналы и ионы  $K^+$  замещаются ионами  $Na^+$ ; кроме того, выделяется некоторое количество ионов  $Ca^{++}$ . В результате равновесие нарушается. При этом медиатор выплескивается в синаптическую щель. Попадая на рецептор дендрита, медиатор вызывает структурную перестройку этого белка и его окружения, создает волну структурной перестройки и тем самым передает возбуждение с одного нейрона на другой. После того как первоначальный ионный состав в пресинаптическом конце терминального волокна в результате работы ионных насосов восстановится, а медиатор, попавший после прихода нервного импульса в синаптическую щель, разложится там специальным ферментом, система возвращается к исходному состоянию и ждет прихода следующего импульса.

Подобно тому как атTRACTАНты, попадающие на соответствующие рецепторы бактерии, уменьшают частоту переключений ее мотора, а репелленты увеличивают эту частоту, так и синапсы, передающие возбуждение на данный нейрон, либо увеличивают

его частоту генерации импульсов (возбуждающие синапсы), либо уменьшают ее (тормозные синапсы).

Нервный импульс, распространяющийся по аксону, представляет собой нелинейную волну сложных структурных перестроек белков, находящихся на его мемbrane (отделяющей внутренность аксона от внешней среды), и одновременно волну выравнивания концентраций ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  и  $\text{Ca}^{++}$  по обе стороны мембранны. Подобно тому как бактериальная клетка с помощью протонных насосов, используя часть энергии, получаемой ею при фотосинтезе или питании, выкачивает протоны наружу и создает разность концентраций ионов  $\text{H}^+$  по обе стороны своей мембранны, — так и нейрон тратит часть энергии на поддержание постоянного состава своей среды, заметно отличающейся от окружающей его жидкости. В наружной среде концентрация натрия на порядок больше, а концентрация калия на порядок меньше, чем в клетке. Эта разница концентраций поддерживается натрий-калиевым насосом, одновременно перекачивающим натрий из нейрона и калий — внутрь него. На каждые два иона калия этот насос перекачивает три иона натрия при производительности одного насоса порядка  $10^2$  ионов в секунду (при напряжении на насосе порядка 0,1 В).

Большую роль в процессах генерации и передачи нервных импульсов играют ионные каналы в мемbrane нейрона. Ионные каналы — это белковые молекулы, имеющие вид трубочек, частично встроенных в мембранны. Внешняя поверхность этих трубочек (длина их порядка 10 нм, внешний диаметр — несколько нанометров, внутренний — десятые доли нанометра) имеет гидрофобный характер, а внутренняя — гидрофильный, поэтому наиболее энергетически выгодное расположение этой белковой молекулы-трубочки такое, при котором она погружена в жирную (фосфолипидную) мембранны, а ее ось перпендикулярна плоскости мембранны; при этом внутренность трубочки (по крайней мере частично) заполнена водой.

Под действием внешнего электрического поля или при присоединении к ионным каналам небольших молекул внутренний диаметр трубочек (на всей длине канала или в некоторой его части) уменьшается и канал оказывается закрытым для проходящих сквозь него ионов.

Ионный канал отличается высокой избирательностью: пропускает ионы какого-то одного сорта в количестве, на порядок большем, чем других сортов.

Постоянная работа натрий-калиевого насоса и наличие в мемbrane открытых калиевых каналов приводят к тому, что внутренность нейрона имеет отрицательный потенциал, равный — 0,07 В, относительно внешней среды. Распространение нервного импульса сопровождается резкими изменениями проницаемости мембранны

аксона для ионов натрия и калия. При возникновении нервного импульса в той части аксона, которая прилегает к телу нейрона, разность потенциалов на мембране падает; перед областью уменьшения напряжения открываются мембранные каналы, пропускающие в клетку ионы натрия. Эти натриевые каналы открываются под действием большого электрического поля, возникающего при уменьшении напряжения в области формирования нервного

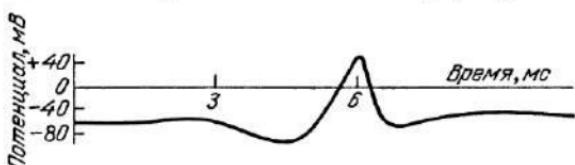


Рис. 1.8. Нервный импульс ("спайк")

импульса. Натриевые каналы остаются открытыми в течение нескольких миллисекунд, а затем возвращаются в нормальное закрытое состояние. Проникшие внутрь аксона ионы натрия изменяют знак внутреннего потенциала на положительный, и он становится порядка 0,04 В; далее открывается другая группа каналов, позволяющих выходить наружу ионам калия и кальция. В результате потенциал внутри аксона восстанавливается до первоначального — потенциала покоя, равного — 0,07 В. Пик потенциала длительностью в несколько миллисекунд и амплитудой 0,1 В ("спайк") носит название потенциала действия (рис. 1.8). Волна потенциала действия распространяется вдоль аксона со скоростью в несколько десятков метров в секунду.

В теле нейрона имеются каналы пяти типов, и генерация импульсов телом нейрона описывается более сложными закономерностями, чем у аксона. Например, если на аксон подается некоторый постоянный стимул, то генерируется лишь одиночный импульс в ответ на начало стимуляции. Тело нейрона в таком же случае генерирует целый ряд импульсов, и их частота определяется интенсивностью стимула (рис. 1.9).

Медиатор, высвобождающийся в синаптическую щель и связывающийся с рецепторами постсинаптической мембраны, вызывает изменение их конформации. Например, receptor медиатора ацетилхолина (в синапсе нейрона с клеткой мышцы), являющийся одновременно каналом для ионов натрия и калия, при связывании с молекулой медиатора открывается — и за то время, пока он открыт, пропускает десятки тысяч ионов. В результате происходит уменьшение разности потенциалов на мембране (т.е. сдвиг потенциала в положительную сторону), которое обычно способствует генерации нервных импульсов. Этот положительный сдвиг назы-

вают возбуждающим потенциалом, так что действие ацетилхолина в нервно-мышечных соединениях является возбуждающим. Если же медиатор открывает избирательный канал, например калиевый, и в результате калий выходит из клетки, увеличивая (по модулю) ее отрицательный потенциал, это изменение противодействует возникновению нервных импульсов, и такой сдвиг потенциала называют тормозным.

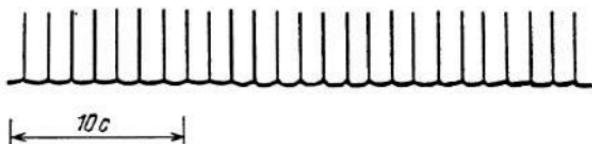


Рис. 1.9. Цуг нервных импульсов

В нервных системах один и тот же медиатор может оказывать на одни нейроны возбуждающее действие, а на другие – тормозящее. Обычно каждое данное синаптическое окончание выделяет медиатор только одного типа, причем в постсинаптической мембране обычно имеются каналы, управляемые этим медиатором.

Интенсивность стимула, действующего на нейрон, определяет частоту генерируемых импульсов. С помощью синапсов нейрон производит временное и пространственное суммирование сигналов от других нейронов; при этом нейрон, разряжающийся с высокой частотой, выделяет из своих синаптических окончаний больше медиатора, чем нейрон, разряжающийся с меньшей частотой, что приводит к открытию большего числа каналов и к возникновению большего постсинаптического потенциала. Итоговое изменение потенциала, получившееся в результате временного и пространственного суммирования синаптических сигналов, будет закодировано частотой нервных импульсов данного нейрона, передаваемых им по своему аксону и его терминальным волокнам другим нейронам нервной системы.

**2. Моллюски.** Рассмотрим морского моллюска аплинию в качестве примера организма с небольшим числом нейронов [28]. Это морская улитка (рис. 1.10), без раковины, живет один год, осенью откладывает яйца (более миллиона штук, в коконах по 15–20 яиц, связанных в виде длинного шнура). Через две недели из яйца появляется личинка, плавающая в воде, самостоятельно питающаяся и убегающая от врагов. Через месяц личинка превращается в молодую улитку, которая окончательно взрослеет через три месяца, достигая размера в несколько сантиметров.

Аплиния – травоядное животное, питается водорослями, по несколько часов в день может находиться вне воды.

Формы поведения аплизии очень разнообразны. Она ползает (днем больше, чем ночью), некоторые виды аплизий, кроме того, плавают. При встрече с хищниками, например с морской звездой, аплизия после прикосновения к врагу отдергивает прикоснувшуюся часть тела, поворачивается и уходит прочь с помощью волнообразных движений своей "ноги". Поедая водоросли, аплизия поводит головой, приближая ее к пище, затем открывает рот, схватывает кусочек растения, отрывает и проглатывает его. Если слегка прикоснуться к аплизии, она втягивает жабру, при сильном же воздействии она еще и выбрасывает облако темно-фиолетовой жидкости. Формы ее брачного поведения (аплизия – гермафродит) также разнообразны [61].

Поведение аплизии обеспечивается системой примерно 20 тыс. нейронов, объединенных в десяток нервных узлов-ганглиев, связанных между собой нервами. Органы, которые передают в центральную нервную систему информацию о внешнем мире, – это два глаза, два статоциста (орган, аналогичный внутреннему уху млекопитающих), орган, воспринимающий концентрацию соли во внешней среде (осфрадий), mechanoreцепторы. Таким образом, у аплизии имеются аналоги зрения, слуха, вкуса, осязания.

Многолетние исследования нейрофизиологов показали, что многие нейроны у каждого члена данного вида обладают одними и теми же, присущими данному нейрону, функциями, соединены всегда с одними и теми же нейронами, обладают одним и тем же для данного нейрона действием на соседний нейрон – возбуждающим или тормозящим. Такая инвариантность системы нейронов позволила провести работу по выявлению функции нейронов,

Рис. 1.10. Аплизия



связей между отдельными нейронами, установлению типов их взаимодействия и изменения этого взаимодействия при обучении.

То обстоятельство, что в ганглиях беспозвоночных животных были открыты идентифицируемые клетки, образующие между собой строго определенные связи, позволило составить схемы различных поведенческих нейронных цепей, ответственных за реакции избегания, защиты, за действия при питании, за внутреннюю активность органов и т.д.

Например, ритм биения сердца аплизии модулируется всего лишь четырьмя нейронами: две клетки возбуждают сердце (выде-

ляемый ими медиатор — серотонин), две — тормозят (их медиатор — ацетилхолин). Три другие клетки вызывают сокращение кровеносных сосудов и тем самым регулируют кровяное давление. Одна клетка "двойного действия" является командной клеткой для нейронной цепи, управляющей кровообращением: она участвует в ритме сердца и увеличивает объем выталкиваемой им крови путем активации главной возбуждающей сердце клетки и путем подавления клетки, тормозящей сердце, и клетки, вызывающей сужение крупных кровяных сосудов. Таким образом, одна нервная клетка заставляет сердце биться чаще и прокачивать больше крови.

Подобно клеткам двойного действия совокупность различных физиологических эффектов может быть произведена нейроэндокринными клетками — нейронами, выделяющими гормоны. У аплизии так называемые пазушные клетки, находящиеся на периферии брюшного ганглия, выделяют полипептидный гормон (36 аминокислот), возбуждающий одни нейроны брюшного ганглия и тормозящий другие, в результате чего у улитки возникает комплекс фиксированных действий, обеспечивающий у зрелой оплодотворенной аплизии откладку яиц. При этом, в частности, улитка прекращает двигаться и питаться, частота сердцебиения и дыхания у нее возрастает, аплиза вытягивает "шнур" с капсулами, содержащими яйца, и, выделяя клейкое вещество, прикрепляет закрученный ею в беспорядочный моток шнур к камню. В это время выделяемый пазушными клетками гормон возбуждает командную клетку двойного действия, управляющую ритмом сердца; ритм, как было

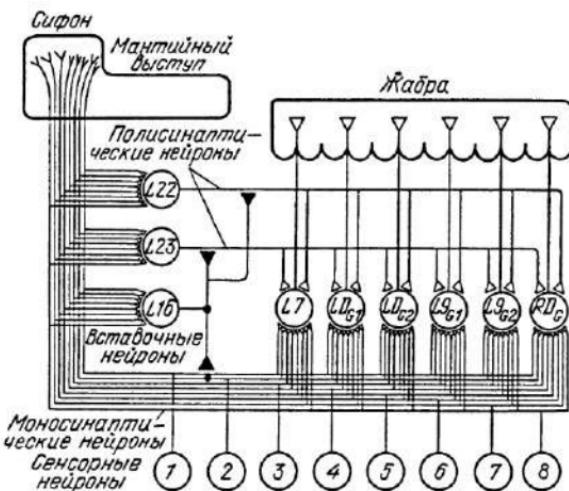


Рис. 1.11. Схема нейронной сети, ответственной за втягивание жабры у аплизии

описано, ускоряется и обеспечивает необходимый во время откладки яиц прилив крови.

Таким образом, своими органами чувств улитка распознает и относит к разным категориям целый ряд явлений и предметов окружающего ее внешнего мира. Ее реакции, сценарии из репертуара ее поведения определяются задачами ее жизнеобеспечения в соответствии с условиями окружающей ее среды.

Схема нейронной сети, обеспечивающей втягивание жабры у аплизии при легком прикосновении к сифону (желобу, образованному мантией, окружающей жабру), приведена на рис. 1.11. На схеме показана лишь часть (восемь из двадцати четырех) сенсорных нейронов, иннервирующих кожу сифона. Сенсорные нейроны образуют прямые связи с шестью идентифицированными мотонейронами жабры (ряд нейронов, начинающийся с  $L7$ ), с тормозной клеткой  $L16$  и двумя вставочными возбуждающими нейронами  $L22$  и  $L23$ , образующими синапсы с мотонейронами. Эта схема обеспечивает, кроме самого ответа аплизии на стимул (втягивание жабры при подаче внешнего прикосновения), еще и две формы обучения: привыкание (ослабление реакции в результате привыкания принято называть габитуацией) и сенситизацию (это противоположное явление — усиление ответа на стимул в результате действия другого, болевого или повреждающего стимула). В экспериментах [29] было обнаружено, что при габитуации ток ионов кальция в пресинаптическом окончании сенсорного нейрона (в синапсе с мотонейроном), возникающий при приходе нервного импульса и вызывающий выплескивание медиатора в синаптическую щель, постепенно уменьшается. Соответственно и медиатора выплескивается все меньше и меньше, уменьшается постсинаптический потенциал и падает сила реакции животного на стимул. Эта депрессия кальциевого тока в пресинаптическом окончании сохраняется в течение нескольких часов. Некоторые синаптические связи, которые стали неактивными в результате обучения, могут сохраняться в таком состоянии более недели.

При сенситизации аплизии стимуляция нейронов ведет к выделению нервными клетками медиатора серотонина, который активирует фермент аденилатциклазу в мемbrane окончания сенсорного нейрона. Из-за этого увеличивается количество так называемого "вторичного посредника", циклоаденозинмонофосфата, который увеличивает кальциевый ток, воздействуя, в частности, на кальциевый канал. С приходом каждого нового нервного импульса увеличивается кальциевый ток и количество выплескиваемого в синаптическую щель медиатора. В результате реакция животного на стимул (прикосновение к сифону) усиливается.

Более сложное явление в нервной системе моллюсков — взаимодействие стимулов, приходящих из внешнего мира по различным

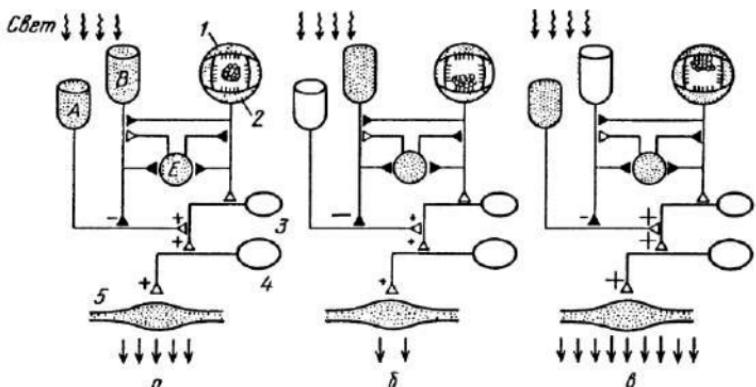


Рис. 1.12. Схема нейронной сети, ответственной за обучение гермиссенды реакции на сочетание света с вращением на центрифуге: головная (1) и хвостовая (2) волосковые клетки, промежуточный нейрон (3), мотонейрон (4), мышцы (5)

сенсорным каналам, — исследовалось у другой морской улитки, гермиссены. В естественных условиях в светлое время суток этот моллюск в поисках пищи (гидроидных кишечнополостных, скапливающихся в хорошо освещенных верхних слоях воды), обладая положительным фототаксисом, перемещается по направлению к свету. С другой стороны, если на море шторм (гермиссенда может погибнуть в бурно волнующихся верхних слоях воды), улитка, ощущая волнение моря своими статоцистами, замедляет движение к свету, опускается на дно и закрепляется на твердом грунте на глубине, где волнения нет. Эксперименты по передвижению улиток вдоль трубок, радиально расположенных на центрифуге, в центре которой помещался источник света [66], показали, что после обучения — одновременного вращения на центрифуге при включенном свете в центре — скорость движения улиток к свету на покоящейся центрифуге падала втрой. Такая выработанная реакция сохранялась на несколько недель (почти на всю жизнь моллюска) и не влияла на ответы животного на другие стимулы. Но эта выработанная при обучении ассоциация забывалась тем быстрее, чем чаще обученным улиткам впоследствии предъявляли свет в отсутствие вращения.

Упрощенная схема нервных путей, включающих зрительный и вестибулярный каналы улитки, приведена на рис. 1.12. Показаны нервные клетки зрительной системы и их аксоны, два типа фотопрерцепторных клеток (A и B), клетка оптического ганглия (E), волосковые клетки (1 и 2), промежуточные нейроны (3), моторные нейроны (4), мышцы (5).

При обучении схема связей (рис. 1.12 $a$ ) остается неизменной: фоторецептор типа  $B$  тормозит фоторецептор типа  $A$ , который при стимуляции светом возбуждает цепочку промежуточный нейрон — мотонейрон — мышца. Залп импульсов от волосковой клетки статоциста, возбуждающейся под действием центробежной силы (центростремительное ускорение в опытах достигало значений порядка ускорения свободного падения), тормозит фоторецепторы типа  $B$  (непосредственно и через клетку  $E$ ). После такого залпа волосковая клетка "замолкает", а клетка  $E$  активируется: в результате клетка  $B$  возбуждается. Такая цепочка событий происходит в нервной системе необученного животного; при обучении описанные эффекты усиливаются. Связи между нейронами зрительного и вестибулярного путей организованы у улитки таким образом, что когда животное ориентировано на центрифуге головой к центру, вращение возбуждает так называемые каудальные (хвостовые) волосковые клетки, и после повторения сочетания светового и центробежного воздействий возбудимость клетки  $B$  увеличивается и долгое время остается на новом уровне (рис. 1.12 $b$ ). В результате тормозное влияние на клетку типа  $A$  во время и после воздействия света усиливается, и поэтому движение к источнику света замедляется.

Если ориентировать улитку на центрифуге головой от центра, то вращение будет стимулировать другие, так называемые краниальные (головные) волосковые клетки (всего в каждом статоцисте по 13 волосковых клеток), результатом чего будет торможение клеток типа  $B$  (рис. 1.12 $c$ ). Эксперимент подтвердил, что это действительно так: моллюски ползли к свету быстрее.

Опыты показали, что при обучении гермиссенды в клетках типа  $B$  возрастает концентрация ионов кальция и одновременно изменяются ионные потоки через каналы клеточных мембран.

Таким образом, описанное ассоциативное обучение у этих улиток связано с необратимыми физическими изменениями мембран клеток.

Исследование обучения моллюсков позволило выдвинуть гипотезу [78] о том, что долговременная "память" у таких организмов связана с фиксацией перестройки нейронной сети (возникшей в результате обучения) с помощью белка, появляющегося при экспрессии некоторого дополнительного гена. Эти опыты, в частности, показали, что долговременная "память" у ализии связана с ростом синаптических контактов; тем самым была подтверждена проводившаяся часто аналогия между долговременной памятью и дифференцировкой клеток.

### § 3. Сообщества беспозвоночных. Насекомые

**1. Муравьи.** Рассмотрим в качестве примера семейство муравьев [46]. В гнезде муравьев (муравейнике) имеется одна или несколько бескрылых яйцекладущих самок ("цариц"), крылатые самцы и самки (летом они совершают брачный полет, после чего самцы погибают, а самки теряют крылья и приступают к образованию новых гнезд), множество бескрылых "рабочих", "солдаты", "фуражиры", "разведчики".

Гнездо – "город" муравьев – имеет сложное строение, основой его часто служит старый пень, в верхних камерах размещаются крылатые самцы и самки, под ними – камеры с куколками, камеры для личинок, камеры с яйцами.

С ростом семьи муравьев на территории кормового участка, примыкающего к "городу", сооружаются убежища для тлей (которых муравьи охраняют и питаются их выделениями – "медвяной росой"), сеть фуражировочных дорог, тоннели; различные участки закрепляются за постоянными группами фуражиров. У многих видов муравьев структура кормового участка при этом усложняется: появляются дополнительные гнезда, несущие разные функции – в одном выкармливается молодь, другое должно обеспечивать семью пищей.

Группа родственных семей может образовать колонию, а несколько колоний – федерацию с населением в несколько сотен миллионов особей, в которой охраняется уже не окологнездовая зона, а весь кормовой участок.

Понятно, что такое сложное устройство общественной жизни предполагает развитый обмен информацией между членами сообщества. Важное значение в жизни муравьев имеет их способность к подражанию. Согласно [46] при фуражировке, при преодолении препятствий, при прохождении лабиринта – при всех таких опытах с муравьями вначале с задачей справляется небольшая доля муравьев, принимающих участие в ее решении, но через некоторое время, благодаря подражательному поведению, задача решается уже всеми или почти всеми муравьями.

Подражательная деятельность имеет важное значение в мобилизации муравьев в естественных условиях на добычу пищи, на переселение, на борьбу с врагом.

Исследователи, изучающие поведение муравьев, выделяют следующие способы передачи ими информации:

- 1) реакция на визуально воспринимаемые характерные движения других муравьев;
- 2) выделение феромонов, действующих либо как сигналы тревоги, либо как следовые вещества;
- 3) звуковые (стридуляционные) сигналы;

4) тактильный (антеннальный) код – касание двух муравьев антеннами.

Например, разведчик, найдя на кормовом участке источник пищи, совершает так называемый комплекс маркирующих движений: петлеобразные пробежки вокруг найденной пищи, иногда стридулирует и выделяет следовые вещества. Если недалеко от разведчика находятся фуражиры, они в ответ на произведенный комплекс маркирующих движений включаются в процесс доставки пищи в гнездо. Возвращаясь затем в гнездо, разведчик, нашедший пищу, может оставлять либо непрерывный пахучий след, либо запаховые вехи. В гнезде разведчик передает захваченную им с собой добычу и совершает другой комплекс действий: он активирует фуражиров с помощью тактильных контактов, пробежки по камерам, совершает осциллирующие движения, стридулирует, выделяет феромоны. Этот последний комплекс действий разведчика в гнезде может вызвать как неспецифическую, так и специфическую активацию муравьев. К первой относится массовый выход из гнезда активных фуражиров и их переключение на поиск определенной пищи на своем поисковом участке, ко второй – состояние готовности к мобилизации на поиск пищи на участке, где разведчик ее обнаружил, у части муравьев. Мобилизация проявляется в следующих формах:

- 1) тандем: один из фуражиров, постоянно контактируя с разведчиком, следует за ним к найденной пище;
- 2) привод цепочки фуражиров, следующих за разведчиком, к найденной пище;
- 3) киноптическая мобилизация: активированные фуражиры смотрят, откуда разведчик приносит пищу, и идут в том же направлении;
- 4) активные фуражиры самостоятельно отыскивают пищу по следу, оставленному разведчиком.

При этом эффективность мобилизации, как показывают наблюдения, зависит от степени возбуждения разведчика, которая отражается в его поведении; возбужденный разведчик может находиться в одном из трех состояний: а) скорость его мала, стридуляции нет, оставляет жалом непрерывный след; б) скорость выше, стридулирует изредка, оставляет след из точек; в) высокая скорость, постоянная стридуляция, следа не оставляет. У некоторых видов муравьев обнаружена целая гамма стереотипов поведения в зависимости от величины порога реакции данного муравья на воздействие феромонов.

Таким образом, каждый муравей распознает целый ряд стереотипных форм поведения других муравьев, различает их и реагирует на них либо подражанием, либо какой-то другой формой стереотипного поведения из репертуара доступных ему сценариев.

Муравьям, следовательно, доступна категоризация и свойственно обучение не только при восприятии предметов и явлений окружающей их живой и неживой природы, но и при восприятии информации о поведении других членов сообщества, к которому они принадлежат.

**2. Нервная система насекомых.** Рассмотрев вкратце некоторые черты поведения представителей общественных насекомых — муравьев, перейдем к столь же краткому описанию особенностей нервной системы насекомых по сравнению с более простой, но похожей нервной системой моллюсков. Как и у моллюсков, у насекомых нервная система состоит из ряда ганглиев, которые связаны в цепочку, проходящую вдоль брюшной стороны тела, под пищеварительным трактом. Передняя часть нервного тяжа, "головной мозг", координирует работу всей нейронной системы при совершении сложных движений.

Для нервной системы насекомых характерно наличие сложных специализированных нейронных систем, обеспечивающих выполнение важных жизненных задач.

Одна из таких систем — зрительная — позволяет насекомым, имеющим фасеточный глаз, определять направление поляризации света от некоторого кусочка голубого неба, что дает им возможность ориентироваться относительно Солнца, даже если его не видно.

Другая система — так называемая церкальная — состоит из множества волосков, расположенных на поверхности тела насекомого; аксоны рецепторных нервных клеток этой системы оканчиваются в последнем заднем брюшном ганглии, где вся полученная информация подвергается предварительной обработке с помощью небольшого числа промежуточных нейронов, которые затем передают ее в различные ганглии. Эта система обеспечивает быстрое и координированное убегание насекомого при приближении к нему, например, хищной птицы. Резкие смещения воздуха и воздушные потоки, возникающие при приближении птицы, воздействуют на волоски, и церкальная система определяет пространственное положение источника смещений воздуха. Сверчки, например, быстро убегают от направленной нестационарной струи воздуха.

Еще одна специализированная нервная система позволяет самке сверчка находить самца, издающего призывный сигнал. Сверчки отличают эти специфические звуковые сигналы от звуков, издаваемых другими видами сверчков, и от искусственных звуков.

В головном мозгу самок сверчков обнаружены лейроны, реагирующие на призывную песню самцов: посылки из "слогов" (30 слогов в секунду) по четыре импульса, с одинаковой длительностью импульсов и промежутков между ними в слоге и с одинако-

ковой длительностью самих слогов и промежутков между слогами; несущая частота 5 кГц. Одни нейроны реагируют на посылки с частотой 30 Гц (ширина полосы  $\sim 10$  Гц), другие – на посылки с частотой, большей или равной 30 Гц, третья – на частоты, меньшие или равные 30 Гц [60]. Частотная зависимость активности нейронов первого типа похожа на частотную зависимость активности поисков – последняя также максимальна при частоте 30 Гц. Возможно, что эти нейроны включают механизмы, определяющие поиск (например, высвобождают какое-то химическое вещество, служащее сигналом к началу поиска).

Относительно механизма распознавания нейронной системой призывной песни высказываются три предположения. Одно из них состоит в том, что в нервной системе самки сверчка имеется эталонный генератор, с сигналом которого сравнивается приходящий извне сигнал призывной песни самца, причем включение эталонного генератора должно производиться этим пришедшим сигналом. По второй гипотезе воспринимаемый нервной системой самки сигнал идет одновременно по двум путям до одного и того же приемника, причем между моментами прихода сигнала к приемнику по этим двум путям имеется определенная задержка. В этом случае приемник может реагировать только на те сигналы, период которых равен задержке. Однако такое устройство реагировало бы и на сигналы с меньшим вдвое (втрое и т.д.) периодом, а этого на опыте не наблюдается. Наконец, согласно третьему предположению, распознавание песни является двухступенчатым процессом: приходящий сигнал возбуждает две группы нейронов – одну, если частота посылок выше некоторой частоты  $\omega_1$ , а другую – если частота посылок ниже частоты  $\omega_2 > \omega_1$ . Если обе группы возбуждены, то они совместно возбуждают третью группу нейронов, которая поэтому и реагирует на определенный интервал частот посылок призывной песни.

Как и у моллюсков, в нервной системе насекомых осуществляется взаимодействие нейронных подсистем, получающих информацию по различным сенсорным каналам. Поэтому при категоризации явлений внешнего мира у насекомых, как и при обучении моллюсков, должны возникать "ассоциации" различных "образов памяти". Предъявление стимулов, соответствующих этим сложным образам, будь то сигналы от окружающей живой и неживой природы или сигналы от других членов сообщества, вызовет у насекомого соответствующую стереотипную реакцию или комбинацию таких реакций.

---

## ГЛАВА 2

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ АНСАМБЛЕЙ

В предыдущей главе на примере бактерий и беспозвоночных показано, что живые организмы обладают способностью к распознаванию предметов и явлений внешнего мира (разбиения их на различные категории) и способностью к изменению памяти под влиянием изменений в окружающем организмах внешнем мире. Кроме того, у бактерий и многоклеточных организмов механизмы, обеспечивающие эти две способности, оказываются различными.

Нервная система высших животных и тем более человека неизмеримо сложнее, чем нервная система беспозвоночных. Однако и у животных, и у человека одним из главных ее свойств остается та же способность к распознаванию, категоризации явлений мира и к обучению.

У человека обработка информации, поступающей в мозг, осуществляется на нескольких уровнях. Элементарные процессы обработки происходят в мембранных структурах специализированных клеток — нейронов, взаимодействующих между собой и с другими клетками мозга посредством синаптических, а также других, например электрических, связей [27]. Более сложные процессы, в том числе отвечающие за выполнение таких функций мозга, как обучение, распознавание образов и др., являются результатом коллективного действия тех или иных групп ансамблей нейронов [27, 64].

Функции, выполняемые таким ансамблем (содержащим  $10^2 - 10^4$  клеток), определяются типом участвующих нейронов и характером связей между ними. "Средний нейрон" образует  $10^2 - 10^4$  связей с другими клетками мозга, от которых получает и (или) которым передает информацию, закодированную значением частоты следования нервных импульсов. Синаптические связи могут модифицироваться в процессе обработки поступающих в мозг сигналов. Этот процесс, как считается, обеспечивает запоминание части информации, поступающей в мозг. Таким образом, "долговременная память" нейронной сети оказывается рассредоточенной по большому числу межнейронных связей; извлечение информации, содер-

жащейся в ней, возможно лишь в процессах ассоциативного типа, т.е. путем предъявления стимула, который ансамбль нейронов должен распознать и сформировать в соответствии с ним определенную ответную реакцию. Кроме того, в мозгу человека реализуется, вероятнее всего, процесс параллельной обработки распределенной информации [24, 107].

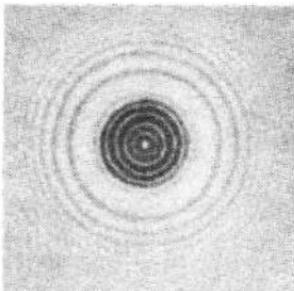
Известным примером такой физической ситуации является голограмма [53].

#### § 4. Голографические модели памяти

**1. Голография.** В начале 60-х годов нашего столетия, после реализации Лейтом и Упатниексом идеи Гabora о записи и хранении информации с помощью когерентных пучков света (или когерентных волн другого частотного диапазона или другой природы), примерно в одно и то же время в научной литературе появились сообщения, в которых предполагалось, что память человека может иметь механизмы, близкие к тем, которые лежат в основе голограммии.

Принцип голограммии можно понять, рассмотрев рассеяние плоской монохроматической волны на небольшом ("точечном") объекте. При рассеянии плоской волны ее амплитуда несколько уменьшается, а от объекта исходит сферическая волна (рис. 2.1). Интерферируя с прошедшей плоской волной на фотопластинке, сферическая волна дает на ней после проявления изображение точечного

Рис. 2.1. Зонная пластинка



объекта в виде системы чередующихся темных и светлых концентрических колец (это так называемая зонная пластинка). Если теперь осветить зонную пластинку плоской монохроматической волной, то она при рассеянии на системе колец снова даст сферическую волну: на экране будет видно изображение точечного объекта. Если закрыть часть зонной пластинки или поставить перед ней полупрозрачный матовый экран, изображение точки ухудшится, но не пропадет. Именно это свойство голограммы (которой в нашем случае и является зонная пластинка) – распределенная по всей пла-

стинке запись информации об объекте — и являлось привлекательным при обсуждении аналогии с памятью человека. Действительно, в нервной системе многоклеточных животных, как и в мозгу человека, представление объектов внешнего мира содержиться в активности многих нейронов, часто находящихся на большом расстоянии друг от друга, — память является распределенной.

Однако в аналогии между голограммой и памятью есть и другая сторона. Печернение колец зонной пластиинки пропорционально интенсивности падающего света и длительности выдержки фотопластиинки. И в этом отношении голограмма похожа на след внешнего мира в памяти: этот след тем заметнее, ярче, чем больше была интенсивность воздействия объекта внешнего мира на сенсорные системы и чем дольше длилось это воздействие.

Сделать голограмму самому, чтобы убедиться, насколько устойчиво изображение исходного объекта, получаемое при ее освещении монохроматической волной, непросто. Можно, однако, провести простой опыт и наблюдать явление, математическое описание которого аналогично математическому описанию голограммы. Для этого нужно осветить рассеянным светом две находящиеся одна за другой гребенки с различной частотой зубцов (рис. 2.2); на экране — листе бумаги, расположеннем на расстоянии

$$L_1 = L k_1 / (k_1 - k_2)$$

( $2\pi/k_1$ ,  $2\pi/k_2$  — периоды первой и второй гребенок,  $L$  — расстояние между ними) от второй гребенки, появится изображение — периодическая система темных и светлых полос с периодом  $2\pi/(k_1 - k_2)$ .

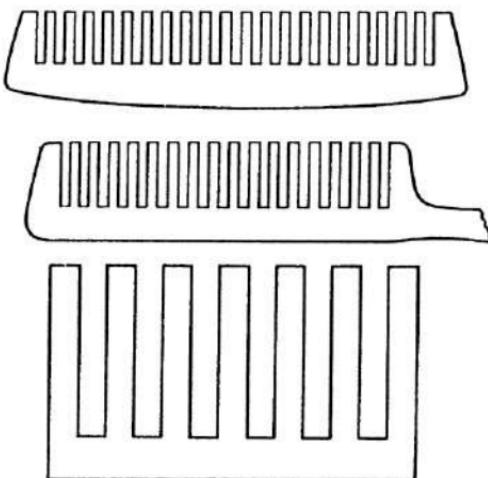


Рис. 2.2. Опыт с двумя гребенками

Если теперь вырезать новую "гребенку" из полос этого изображения (это "голограмма") и поставить под источник рассеянного света вместо одной из гребенок, то на новом листе бумаги мы сможем увидеть изображение убранной гребенки. Если мы будем портить "голограмму" (например, оторвем часть ее или срежем зубцы наискосок) или вводить "шум" (например, матовое стекло между гребенкой и "голограммой"), то мы увидим, что изображение гребенки ослабевает, но не искажается — на листе остается картина полос с периодом  $2\pi/k_1$  (или  $2\pi/k_2$ ).

**2. Распределенная память.** Лонгет-Хиггинс, исходя из аналогии с голографией, придумал устройство, названное им голофоном [119]. Голофон является примером распределенной памяти, работающей, так сказать, во времени, а не в пространстве. По существу голофон представляет собой набор узко настроенных фильтров, подсоединенных в параллель к общему входному каналу и связанных через усилители (с переменным коэффициентом усиления) с общим выходным каналом. Коэффициенты усиления этих усилителей и представляют собой "память" голофона. Сигнал, который нужно записать, проходит через голофон, и значение мощности, прошедшей через каждый из фильтров, фиксируется. Затем коэффициент усиления усилителя, связанного с каждым из фильтров, увеличивается пропорционально мощности, прошедшей через этот фильтр. В результате функция отклика голофона меняется так, что когда на вход подается лишь часть предварительно записанного сигнала, голофон на выходе приблизительно воспроизводит предварительно записанный сигнал. Аналогично записываются в голофон и следующие сигналы.

Принцип действия голофона, как и голографической записи изображения, состоит в изменении функции отклика на величину, пропорциональную автокорреляционной функции сигнала. Поскольку, по определению функции отклика, выходной сигнал равен свертке функции отклика с входным сигналом, полная процедура "вычисления", выполняемая голофоном, представляет собой комбинацию свертки и нахождения корреляционной функции.

Обзор некоторых других моделей голографической памяти приведен в [107, 119].

**3. Нейронные ансамбли.** При имитации поведения ансамбля нейронов в таких моделях обычно используют переменные, описывающие состояние нейронов ("вектор состояния"  $\sigma$ ), и переменные, описывающие связи между нейронами ("оператор памяти"  $V$ ), а также постулируются два уравнения, определяющие изменение  $\sigma$  и  $V$  со временем. Одно из этих уравнений представляет изменение  $\sigma$  под действием оператора  $V$  (выработка реакции на стимул), а второе — изменение матрицы  $V$ , квадратичное по  $\sigma$  (запомина-

ние). Отметим, что системы уравнений, имеющие аналогичную структуру, кроме голограмм, описывают также целый ряд других физических ситуаций, например явление модуляционной неустойчивости (коллапса) турбулентной плазмы [79] и некоторые явления в нелинейной оптике (в частности, обращение волнового фронта [41]).

В последнее время в ряде работ [6, 69, 83, 85, 98] было предложено моделировать нейронные ансамбли с помощью динамических уравнений подходящей нелинейной системы. При этом вектор состояния ансамбля нейронов представляет собой вектор в фазовом пространстве динамической системы, а "память" реализована как система аттракторов. Запоминание новой информации осуществляется путем усложнения по определенному алгоритму структуры аттракторов. Такой подход допускает простую механическую аналогию, если представлять себе вектор состояния как положение частицы, движущейся под действием силы тяжести и трения по некоторому рельефу (см. ниже).

В работе Андерсона и др. [69] рассматривался процесс перехода (релаксации) начального значения  $\sigma$  к одному из углов  $N$ -мерного куба ( $N$  – число нейронов в ансамбле), а Хопфилдом [83] в задаче о такой релаксации с заданной матрицей  $V$  было введено понятие энергии, т.е. функции состояния ансамбля, которая уменьшалась в процессе релаксации.

Описываемые таким образом нейронные ансамбли имеют ряд интересных свойств, которые могут быть интерпретированы как обучение, распознавание образов, выработка прототипа, забывание, бистабильность восприятия, феномен обращения и т.д.

## § 5. Модель нейронной сети

**1. Динамическая система в термостате.** Рассмотрим динамическую систему, элементы которой – "нейроны" – взаимодействуют между собой и с "термостатом". Состояние  $i$ -го нейрона в системе ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) описывается непрерывной переменной  $\sigma_i(t)$  ( $t$  – время), взаимодействие нейронов, которое для простоты предполагается парным, – матрицей с элементами  $V_{ij}$ . Рассмотрим величину

$$L = -E = \frac{1}{2} \lambda \sum_{i,j} V_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (1)$$

( $\lambda > 0$  – параметр) как лагранжиан взаимодействия системы, являющийся функционалом независимых переменных  $\sigma$  и  $V$ . Учитывая взаимодействие нейронов с термостатом, приводящее к появлению "сил трения" ( $\dot{\sigma}/\gamma_1, \dot{V}/\gamma_2$ ), из (1) получим динамичес-

кие уравнения для  $\sigma$  и  $V$ :

$$\frac{1}{\gamma_1} \frac{d\sigma_i}{dt} - f_i(\sigma) - \xi_i(t) = \frac{\partial L}{\partial \dot{\sigma}_i} = \lambda \sum_j V_{ij} \sigma_j, \quad (2)$$

$$\frac{1}{\gamma_2} \frac{dV_{ij}}{dt} - F_{ij}(V) - \xi_{ij}(t) = \frac{\partial L}{\partial \dot{V}_{ij}} = \frac{1}{2} \lambda \sigma_i \sigma_j. \quad (3)$$

Добавленные в эти уравнения нелинейные слагаемые  $f, F$  препятствуют неограниченному возрастанию модулей  $\sigma$  и  $V$ ; в рамках

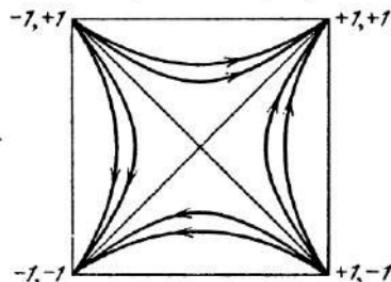


Рис. 2.3. Механическая модель рассматриваемого ансамбля нейронов

лагранжевой схемы они могут быть включены в (1) в виде потенциалов, быстро возрастающих вблизи  $|\sigma_i| = \sigma_0$ ,  $|V_{ij}| = V_0$ .

Величины  $\xi_i(t), \xi_{ij}(t)$  в (2), (3) представляют собой ланжевеновские источники шума. В первых сетях источниками шума являются дробовой шум, возникающий вследствие дискретного характера выделения нейромедиатора в синаптических окончаниях, а также несинаптические взаимодействия нейронов между собой [2, 68, 88, 98]. В простейшем случае шум можно охарактеризовать введением эффективной температуры термостата  $T$ ; при этом имеем

$$\langle \xi \rangle = \langle \xi^2 \rangle = 0, \quad \langle \xi^2 \rangle \propto \langle \xi^2 \rangle \propto T,$$

где угловые скобки обозначают усреднение по времени.

Рассмотрим механическую аналогию процессов, описываемых уравнениями (2), (3). В механике движение частицы под действием заданных сил удовлетворяет уравнениям Ньютона. Пусть материальная точка движется по рельефу, изображенному на рис. 2.3, и будем считать, что на нее действуют силы трения и сила тяжести. При скатывании с "горы" в одну из "низин" потенциальная энергия системы уменьшается, и в конце концов материальная точка останавливается из-за трения. Положение частицы в конечном состоянии (т.е. та из низин, в которой она останавливается) зависит как от формы рельефа, так и от начального состояния, из которого началось скатывание. Если координаты вершин квад-

рата, образованного вершинами и низинами, равны  $(\pm 1, \pm 1)$ , то конечное состояние механической системы, изображенной на рис. 2.3, будет соответствовать одной определенной паре чисел, например  $+1, +1$ . Уравнения Ньютона для рассматриваемой механической системы либо уравнения (2), (3), описывающие динамику двух взаимодействующих нейронов, можно, в принципе, решить сколь угодно точно (например, с помощью ЭВМ). Однако для ансамбля, состоящего из нескольких десятков или сотен нейронов, или в случае многомерного движения материальной точки эта задача становится практически неразрешимой. Поэтому, опуская промежуточные детали процесса движения (релаксации), рассмотрим лишь грубые изменения энергии, происходящие при изменении окончательного положения частицы. Эти точки можно себе представить как вершины  $N$ -мерного куба с координатами  $\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1$ . Роль потенциальной энергии точки в этом случае играет величина  $E = -L$ , введенная в (1), роль скатывающей силы — величина, стоящая в правой части (2) (скатывающая сила называется также "молекулярным полем").

Если масса материальной точки достаточно мала, то частица будет совершать так называемое "брюновское" движение, которое тем более интенсивно, чем выше температура системы. Физической причиной этого движения являются случайные толчки, непрерывно испытываемые материальной точкой со стороны других частиц системы. Среднее значение знакопеременной силы толчков равно нулю, а ее средний квадрат пропорционален температуре. В уравнениях (2), (3) эти толчки описываются слагаемыми  $\xi_i(t)$  и  $\xi_{ij}(t)$ .

Материальная точка, скатываясь по рельефу, несколько изменяет профиль склонов, например углубляет его. Этот процесс является механической моделью пластичности связей между нейронами, описываемой уравнением (3).

Динамика системы (2), (3) существенно зависит от ее предыстории. Исследуем сначала эволюцию  $\sigma$  и  $V$  в специальных условиях — в процессе, имеющем характер "обучения". Обучение заключается в том, что в (2) включается сильное внешнее поле, действующее в течение времени  $t_1$ , в результате чего вектор  $\sigma$  принимает стационарное значение  $\varphi^1$ , соответствующее "образу" с компонентами  $\pm \sigma_0$ . В результате обучения матрица  $V_{ij}$  в соответствии с (3) (считаем, что слагаемым  $\xi_{ij}$  в процессе обучения можно пренебречь) изменяется на величину  $\Delta V_{ij} = \frac{1}{2} \gamma_2 \lambda t_1 \varphi_i^1 \varphi_j^1$ . При этом мы предполагаем, что время обучения  $t_1$  значительно больше времени релаксации вектора  $\sigma$  к своему стационарному значению  $\varphi^1$ . Процедуру обучения можно повторить многократно, используя образы  $\varphi^s$ ,  $s = 1, 2, \dots, s_0$ . Считая для простоты, что до начала

обучения  $V = 0$ , после окончания процедуры получим

$$V_{ij} = \sum_{s=1}^{s_0} \mu^s \varphi_i^s \varphi_j^s, \quad (4)$$

где коэффициенты  $\mu^s$  зависят от длительности обучения.

2. Пример процедуры распознавания и обучения. В качестве примера рассмотрим аналогичную процедуру обучения, которая проводилась Андерсоном и Мозером [68]. Стимулами, предъявляемыми системе, были изображения заглавных печатных букв латинского алфавита. Эти изображения были закодированы в виде векторов из 117 элементов. Авторы попытались имитировать кодировку изображения, производимую первыми ступенями зрительной системы человека. Одна часть вектора, соответствующего некоторой букве, определялась возбуждением, производимым данным элементом изображения буквы, в той клетке матрицы  $9 \times 9$ , в которой находился данный элемент, и торможением соседних клеток этой матрицы. Таким образом, компоненты вектора с 1 по 81 соответствовали элементам матрицы  $9 \times 9$ . Остальные 36 элементов вектора для данной буквы определялись ориентацией ее линейных сегментов. Для этого внутренняя часть матрицы  $9 \times 9$ , а именно матрица  $7 \times 7$ , была разделена на девять перекрывающихся подобластей  $3 \times 3$ . Наличие и ориентация прямолинейного сегмента изображения буквы в этих девяти областях кодировались откликом ориентационно-селективной системы, дающей различные отклики на ориентацию сегмента под углами 0, 45, 90 и  $135^\circ$ . Итак, 81 элемент от точечного кодирования вместе с четырьмя возможными ориентациями сегмента в девяти областях давали 117 элементов вектора стимула для каждой данной буквы. На рис. 2.4 приведены примеры кодирования изображений букв.

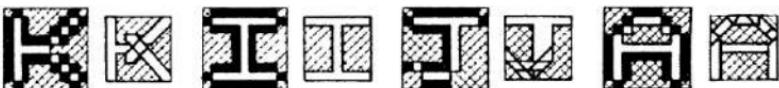


Рис. 2.4. Примеры кодирования изображений букв

Далее из значения каждого элемента вектора вычиталось среднее по всем элементам данного вектора (так что после этой процедуры сумма элементов каждого вектора оказывалась равной нулю) и векторы нормировались. Наконец, все векторы суммировались, тем самым находилось среднее значение всех векторов, и это среднее вычиталось из каждого вектора; полученные в итоге векторы и использовались для дальнейшего моделирования.

Таблица 2.1

## Результаты распознавания букв системой [107]

Число испытаний	Буквы, попадающие в одну категорию
1000	B, E, G, O A, I C, K, N, W, X D, M, Q, S, T, V, Y F, P, R
2000	B, E G, O, S, V N, W K, X Q, Y
3000	F, P G, S N, W
4000	F, P G, S N, W
5000	N, W
6000	N, W
7000	N, W
8000	N, W
9000	N, W
10 000	N, W

Векторы, которым обучалась система, предъявлялись в случайной последовательности. При каждом предъявлении проводилось семь итераций исходного вектора по формуле

$$\sigma_i(t+1) = \sigma_i(t) + \sum_j V_{ij} \sigma_j(t).$$

В результате вектор принимал значение  $\varphi_i$ , после чего матрица изменялась на величину

$$\Delta V_{ij} = \mu \varphi_i \varphi_j,$$

где  $\mu$  менялось в различных опытах от 0,0005 до 0,05 (в большей части опытов  $\mu$  принималось равным 0,05). Если некоторый элемент вектора в процессе роста достигал по модулю значения 0,3, соответствующее изменение матрицы полагалось равным нулю. Исходное значение матрицы выбиралось равным 0,001.

Вначале система "путала" многие буквы. Она объединяла различные буквы в "сгустки", попадая при предъявлении различных букв из данного "сгустка" в один и тот же угол 117-мерного куба. Однако с ростом числа испытаний эти сгустки разделялись (табл. 2.1) на все меньшие и меньшие, пока, наконец, после 5000

испытаний система не стала различать уже все буквы (лишь только  $N$  и  $W$  остались неразличимыми для системы даже при увеличении числа испытаний до 10000). Скорость категоризации по мере обучения увеличивалась, т.е. число итераций, необходимое для насыщения всех компонент вектора (когда они принимают предельное значение, равное 0,3), соответственно уменьшалось.

Из (2)–(4) следует, что в отсутствие внешнего поля характерные времена релаксации переменных  $\sigma$  ( $\tau_\sigma \approx 1/(\gamma_1 \lambda N s_0)$ ) и  $V$  ( $\tau_V \approx 1/(\gamma_2 \lambda s_0)$ ) существенно различаются:  $\tau_\sigma \ll \tau_V$ . Динамику системы при  $t$  порядка  $\tau_\sigma$  можно интерпретировать как "распознавание образов". Рассмотрим этот процесс более подробно.

## § 6. Распознавание образов и обучение

**1. Распознавание как "релаксация стимула".** Процесс распознавания состоит в том, что "исходный стимул" – вектор, выбранный в качестве начального условия, релаксирует в соответствии с уравнениями (2) к одному из устойчивых состояний. В частности, такими векторами могут быть "образы"  $\varphi^s$ .

Эволюция системы (2), (3) может быть исследована методом дискретного стохастического моделирования: либо с помощью процедуры Метрополиса и др. [90, 104, 113] (модель системы в термостате), либо с помощью алгоритма, предложенного Хопфилдом [83]. При этом вместо непрерывных переменных  $\sigma_i$  вводятся дискретные, принимающие значения  $\sigma_{i0} = \pm 1$ , а динамика системы задается с помощью вероятности изменения состояния нейрона на каждом шаге по времени либо в соответствии со знаком молекулярного поля  $I\sigma$ , либо в соответствии с изменением энергии системы (1), вызванным этим "переворотом", при заданной температуре термостата  $T$ .

Возможность замены непрерывных уравнений (2), (3) дискретными связана с тем, что особая точка  $\sigma_i = 0$  уравнения (2) в случае, когда  $V$  имеет вид (4), является отталкивающей. Покажем это, считая для простоты, что все  $\varphi^s$  ( $s = 1, 2, \dots, s_0$ ) ортогональны друг другу. Линеаризуя (2) при  $|\sigma_i| \ll \sigma_0$  и полагая  $\sigma_i \propto \exp \Gamma t$ , из (2) получим уравнение на собственные значения  $((\varphi^s \cdot \sigma) \equiv \sum_i \varphi_i^s \sigma_i)$

$$\Gamma \sigma = \gamma_1 \lambda \sum_s (\varphi^s \cdot \sigma) \varphi^s \mu^s.$$

Этому уравнению удовлетворяют, в частности, векторы  $\sigma^s = \varphi^s$  ( $(\varphi^s \cdot \varphi^{s'}) = \delta_{ss'}$ ) и собственные значения (инкременты)  $\Gamma^s = \gamma_1 \lambda \mu^s N > 0$ . Поэтому изображающая точка системы (2), (3) будет удаляться от начала координат в конфигурационном прост-

ранстве ( $\sigma_i = 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ ) и перейдет в область, где существенно нелинейное слагаемое в (2), т.е.  $|\sigma_i| \approx \sigma_0$ . Конечное состояние эволюции переменной  $\sigma_i$  определяется, по существу, видом силы взаимодействия, испытываемой  $i$ -м нейроном со стороны остальных — молекулярным полем  $(V\sigma)_i$ , где  $\sigma_i = \pm \sigma_0$  (далее положим  $\sigma_0 = 1$ ).

Хопфилд [83] предложил следующий рекуррентный алгоритм анализа динамики ансамбля нейронов. Вводя дискретное время и заменяя производную в (2) конечной разностью, вместо (2) полагаем

$$\sigma_i(k+1) = \begin{cases} \sigma_i(k), & i \neq i_k, \\ \operatorname{sign} \left[ \sum_{j \neq i} V_{ij} \sigma_j(k) - \theta_i \right], & i = i_k, \end{cases} \quad (5)$$

где  $i_k \leq N$  — номер нейрона, выбираемый случайным образом на каждом шаге времени,  $\sigma_i(k)$  — состояние  $i$ -го нейрона в момент времени  $t_k$ . В (5) введен также "порог возбуждения"  $i$ -го нейрона  $\theta_i$ , учитывающий различия в условиях возбуждения различных нейронов. Вместо переменных  $\sigma_i = \pm 1$  можно ввести также другие переменные  $\tilde{\sigma}_i = (1 + \sigma_i)/2$ , принимающие значения 0 или 1. Из (5) получаем

$$\tilde{\sigma}_i(k+1) = \begin{cases} \tilde{\sigma}_i(k), & i \neq i_k, \\ -1 + 2 \operatorname{sign} \left[ \sum_{j \neq i} V_{ij} \tilde{\sigma}_j(k) - \tilde{\theta}_i \right], & i = i_k, \end{cases} \quad (5a)$$

где  $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \sum_j V_{ij}$  — некоторые новые пороги возбуждения.

Уравнения (5) и (5a) были предложены в [83] для описания динамики изменения состояния ансамбля нейронов во времени. Можно, однако, представить (неупорядоченную) нейронную сеть, для которой эти уравнения описывают распространение волн возбуждения нейронов во времени и в пространстве. Действительно, рассмотрим прямоугольную решетку, в узлах которой расположены нейроны; столбцы решетки занумерованы индексом  $k = 1, 2, \dots, K$ , а строки — индексом  $i = 1, 2, \dots, N$ . В каждом столбце имеется "активный" нейрон, который суммирует с весами  $V_{ij}$  сигналы, поступающие от предыдущего столбца, и может изменять свое состояние в соответствии со знаком молекулярного поля. Состояние же остальных нейронов данного столбца совпадает с состоянием на предыдущем шаге по времени нейронов предыдущего столбца, находящихся в тех же строках. Возбуждение волн в такой сети происходит путем предъявления стимула на "входе", например в первых столбцах, а устойчивые состояния уравнений

Хопфилда представляют собой уединенные волны, распространяющиеся в сторону увеличения индекса  $k$  — "к выходу" из сети.

Пример последовательности состояний, которые проходит система нейронов при распознавании образов в модели Хопфилда, приведен на рис. 2.5 (показаны некоторые промежуточные состояния); левая картинка представляет собой "исходный стимул", а крайняя правая — "образ", записанный в памяти системы. При

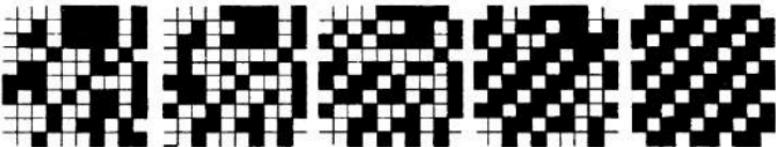


Рис. 2.5. Последовательность состояний системы нейронов в процессе релаксации исходного "стимула" (левая картинка) в "образ" (правая картинка), полученная при моделировании на ЭВМ уравнения (5).

такой релаксации энергия системы (1) уменьшается, достигая с течением времени одного из локальных минимумов. Считая, что матрица связей нейронов дается выражением (4), покажем, что в дискретной модели состояние с  $\sigma = \varphi^s$  реализует локальный минимум энергии и устойчиво, если число "образов"  $s_0$  невелико. Положим  $\sigma = \varphi^s + \delta^s$  и рассмотрим вариацию энергии (1) ( $\mu^r = 1, \theta_i = 0$ ):

$$E = -\frac{1}{2} \lambda \sum_{i,j} V_{ij} \sigma_i \sigma_j = -\frac{1}{2} \lambda \sum_{s, i, j} \mu^s \varphi_i^s \varphi_j^s \sigma_i \sigma_j \equiv \\ \equiv -\frac{1}{2} \lambda \sum_s \mu^s (\varphi^s \cdot \sigma)^2; \quad (1a)$$

$$\frac{1}{\lambda} \delta E = -N (\varphi^s \cdot \delta^s) - \sum_{r \neq s} (\varphi^r \cdot \varphi^s) (\varphi^r \cdot \delta^s) - \frac{1}{2} \sum_r (\varphi^r \cdot \delta^s)^2. \quad (6)$$

В случае, когда различные  $\varphi^s$  приближенно ортогональны друг другу, второе слагаемое в (6) мало по сравнению с первым, и для вариации  $\delta^s$ , соответствующей изменению одного из символов  $\pm 1$  в "образе"  $\varphi^s$  на противоположный, первое слагаемое равно  $2N$ , а третье равно  $-2s_0$ . Таким образом,  $\delta E > 0$ , т.е. "образ" устойчив при  $s_0 < N$ . Эта оценка качественно согласуется с результатами анализа ошибок "распознавания" с помощью матрицы (4), проведенного в [83, 84].

В процессе релаксации каждому начальному состоянию системы ("стимулу") сопоставляется один из векторов, определяющих устойчивые состояния динамической системы (2), (3), т.е. осуществляется операция категоризации. Аналогичный процесс явля-

ется важным элементом деятельности нервной системы, например зрительного тракта млекопитающих [27].

Устойчивыми состояниями уравнений Хопфилда могут быть также векторы, не совпадающие с  $\varphi^s$ , — "ложные образы" [73, 84]. Определенный класс таких векторов указан в [84] и может быть построен следующим образом. Пусть  $s_0 = 3$ ; положим

$$\varphi_i^* = \operatorname{sign} \sum_s \varphi_i^s, \quad p^s = (\varphi^* \cdot \varphi^s).$$

Тогда, как легко убедиться, знак  $i$ -й компоненты молекулярного

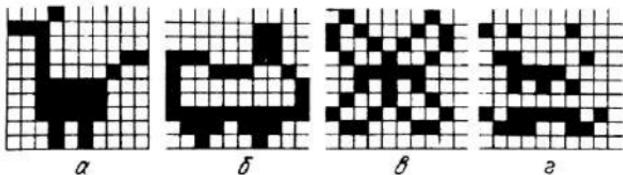


Рис. 2.6. Устойчивый "ложный образ" ( $\gamma$ ), возникающий при "распознавании" стимулов ансамблем нейронов, в матрице связей которого записаны "образы"  $\alpha, \beta, \gamma$

поля  $(V\sigma)_i$  совпадает со знаком  $\varphi_i^s$ , если  $p^s > 0$  и выполнены неравенства треугольника (достаточное условие):  $p^1 \leq p^2 + p^3$ ,  $p^2 \leq p^3 + p^1$ ,  $p^3 \leq p^1 + p^2$ . Следовательно,  $\varphi^*$  является устойчивой точкой алгоритма (5), не совпадающей с  $\varphi^s$ . В случае  $s_0 = 3$ , как можно показать, рассмотренный класс векторов, в построении которых наряду с "образами" используются также и "негативы"  $(-\varphi^s)$ , исчерпывает все "ложные образы". При большом числе "образов" в памяти системы число "ложных образов", вообще говоря, увеличивается. Например, для любого нечетного  $s_0$  вектор  $\varphi^*$ , определенный выше, является устойчивым "ложным образом" (5), если сумма любых  $p^s$ , содержащая  $k = [s_0/2] + 1$  слагаемых, не меньше суммы остальных значений  $p^s$ :

$$p^{s_1} + p^{s_2} + \dots + p^{s_k} \geq p^{s_{k+1}} + \dots + p^{s_{s_0}}, \quad (7)$$

где  $s_1, s_2, \dots, s_k$  — различные, произвольно выбранные числа ( $\leq s_0$ ). Отметим, что при  $s_0 \ll N$  появление "ложных образов" рассматриваемого вида может быть не связано с потерей устойчивости  $\varphi^s$ .

На рис. 2.6 приведен пример, показывающий возникновение "ложного образа" в системе с  $N = 100$  нейронов,  $s_0 = 3$ . Изображенный на рис. 2.6г вектор удовлетворяет условию (7).

**2. Распознавание образов при конечной температуре термостата.** Процесс синаптической передачи нервного возбуждения между двумя нейронами является стохастическим процессом пуассоновского типа [2, 27], поскольку в силу дискретного характера выде-

ления медиатора ионные токи в постсинаптической мембране и падение напряжения на ней испытывают флуктуации типа дробового шума. Поэтому можно предположить, что нейроны с некоторой вероятностью могут изменять свое состояние противоположно направлению молекулярного поля — усредненной характеристики взаимодействия нейронов в сети. В динамических уравнениях (2), (3) флуктуации потенциала учитываются ланжевеновскими случайными силами  $\xi_i(t)$ ,  $\xi_{ij}(t)$ . При моделировании процесса распознавания на ЭВМ конечную температуру термостата можно учесть методом, аналогичным [104]. В последнее время этот метод был применен для оптимизации функционалов типа энергии (1), возникающих в задаче конструирования электронных схем [90, 113].

Флуктуационная динамика системы нейронов в методе Метрополиса и др. [104] описывается следующим алгоритмом:

$$\sigma_i(k+1) = \begin{cases} \sigma_i(k), & i \neq i_k, \\ \sigma_i(k), & i = i_k, P_k > Q_k, \\ -\sigma_i(k), & i = i_k, P_k \leq Q_k, \end{cases} \quad (8)$$

где  $i_k$  и  $P_k$  — случайные числа;  $1 \leq i_k \leq N$ ,  $0 \leq P_k \leq 1$ ;  $Q_k = \exp(-\Delta E_k/T)$ ;  $\Delta E_k = E(\dots, -\sigma_{i_k}, \dots) - E(\dots, \sigma_{i_k}, \dots)$  — изменение энергии при "перевороте спина" с номером  $i_k$ .

При эволюции системы от выбранного начального состояния согласно (8) энергия системы (1) в среднем за большое число шагов по времени уменьшается до тех пор, пока не будет достигнуто равновесное состояние, аналогичное термодинамическому (так как с большей вероятностью происходят изменения состояния нейронов, при которых  $\Delta E < 0$ ). Однако на каждом отдельном шаге, в отличие от алгоритма Хопфилда, энергия системы может и возрастать.

Моделирование эволюционного процесса (8), проведенное на ЭВМ, показало, что при  $T = 0$  результаты распознавания образов согласно (8) и (5) совпадают. В частности, в случае трех "образов", изображенных на рис. 2.6a–в, записанных в память системы, устойчивым является "ложный образ", изображенный на рис. 2.6г. При конечной температуре термостата процесс распознавания образов по алгоритму (8) имеет две стадии. На первой из них происходит сравнительно быстрая релаксация стимула к состоянию, близкому к одному из "образов". При небольшой температуре скорость этой стадии близка к скорости алгоритма Хопфилда (фактическое время расчетов на ЭВМ может быть в несколько раз меньше, чем по алгоритму (5)). Вторая стадия состоит в относительно медленном процессе "диффузии" системы от одного "образа" к другому. Скорость этого процесса определяется температурой термостата, а также существенно зависит от конкретной

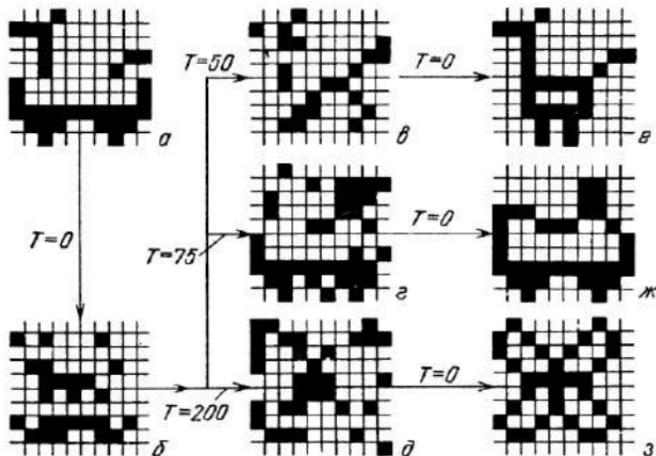


Рис. 2.7. Пример последовательности изменения состояния нейронной сети при изменении температуры термостата: *а* – "исходный стимул", *б* – "ложный образ", *в*, *ж*, *з* – "образы", записанные в памяти системы

структурой памяти. В качестве примера на рис. 2.7 приведена последовательность состояний, которые проходит ансамбль нейронов в процессе диффузии по "образам". В качестве "образов" в этом примере взяты те же векторы, что и на рис. 2.6. При  $T = 0$  "стимул" (рис. 2.7*а*) релаксирует к "ложному образу" (рис. 2.7*б*). При нагреве до определенной температуры это устойчивое состояние может переходить в другой "образ" (рис. 2.7*в*–*з*). Таким образом, конечное состояние, в которое релаксирует стимул, зависит от "тепловой истории" системы. Эта ситуация аналогична явлению "закалки" сплавов (когда вследствие быстрого охлаждения сплавы сохраняют термодинамически невыгодную, однако устойчивую структуру) и в определенном смысле противоположна случаю "отжига" (процесса достижения полного термодинамического равновесия), рассмотренного применительно к задаче минимизации функционала типа энергии в [90, 113].

Как видно из рис. 2.7*в*–*д*, "включение" температуры приводит к размытию устойчивых "образов" системы. При нагреве до температуры  $T$  система (в том числе и механическая) может с вероятностью  $w = \Gamma \exp(-E/T)$  находиться в состоянии с энергией  $E$  (для материальной точки в поле тяжести приведенная формула совпадает с барометрической формулой Больцмана для газов);  $\Gamma = N! [m!(N-m)!]$  – число способов, которым в ансамбле из  $N$  нейронов могут осуществляться состояния, отличающиеся от  $\varphi^1$  в  $m$  позициях. Наибольшая вероятность реализуется для состояний, в которых величина  $F = E - T \ln \Gamma$ , называемая свободной

энергий, достигает максимума. Чтобы оценить степень размытия при заданной температуре, рассмотрим случай  $s_0 = 1$ . Свободная энергия системы для заданного вектора  $\sigma$  определяется выражением

$$F = -\frac{1}{2}(N - 2m)^2 - TS(m), \quad (9)$$

где  $m$  – число символов  $+1$  или  $-1$ , различающих векторы  $\sigma$  и  $\varphi^1$  (хеммингово расстояние),  $S(m)$  – энтропия состояния:

$$S(m) = \ln \frac{N!}{m!(N-m)!} \approx N \left[ \left(1 - \frac{m}{N}\right) \ln \frac{N}{N-m} + \frac{m}{N} \ln \frac{N}{m} \right]. \quad (10)$$

Минимизируя (9) с учетом (10) по  $m$ , при  $m \ll N$  получаем оценку

$$m = N \exp(-2N/T),$$

справедливую при  $T \ll N$ .

Когда  $s_0 = 1$ , энергия системы (1) достигает минимума при совпадении  $\sigma$  с "образом", т.е. при  $\sigma = \varphi^1$ , либо с его "негативом": при  $\sigma = -\varphi^1$ . При конечной температуре возможен флюктуационный переход между состояниями, близкими к "образу" и его "негативу". Если  $T \ll N$ , то такой переход требует преодоления энергетического барьера  $\Delta F$ :

$$\Delta F \approx F(m=N/2) - F(m=0) = -NT \ln 2 + N^2/2. \quad (11)$$

Вероятность такого перехода можно оценить из выражения, аналогичного выражению для вероятности образования зародыша при фазовом переходе:

$$w \approx N \exp(-\Delta F/T) = N 2^N \exp(-N^2/2T). \quad (12)$$

Из (12) видно, что при низкой температуре вероятность перехода оказывается малой, однако с повышением  $T$  барьер уменьшается, а при достижении критической температуры  $T_{kp}$  и выше ( $T \geq T_{kp} \approx N$ ) обращается в нуль. При этом происходит свободная "диффузия" ансамбля нейронов между различными состояниями.

С увеличением числа "образов"  $s_0$  ситуация существенно усложняется. Рассмотрим случай  $s_0 = 2$ . Пусть векторы "образов"  $\varphi^1$  и  $\varphi^2$  имеют  $N_1$  совпадающих компонент и  $N_2$  несовпадающих;  $N_1 + N_2 = N$ . Энергия произвольного состояния системы нейронов  $\sigma$  дается выражением

$$\begin{aligned} E &= -\frac{1}{2}[(N_1 - 2m_1 + N_2 - 2m_2)^2 + (N_1 - 2m_1 - N_2 + 2m_2)^2] = \\ &= -[(N_1 - 2m_1)^2 + (N_2 - 2m_2)^2], \end{aligned} \quad (13)$$

где  $m_1$  – число отличий  $\sigma$  и  $\varphi^1$  в первой группе компонент, а  $m_2$  –

во второй. Энтропия такого состояния равна

$$S(m_1, m_2) = (N_1 - m_1) \ln \frac{N_1}{N_1 - m_1} + m_1 \ln \frac{N_1}{m_1} + \\ + (N_2 - m_2) \ln \frac{N_2}{N_2 - m_2} + m_2 \ln \frac{N_2}{m_2}. \quad (14)$$

Из (13), (14) получаем выражение для свободной энергии системы в виде суммы двух независимых слагаемых:

$$F = F(m_1, N_1) + F(m_2, N_2); \quad (15)$$

$$F(m_i, N_i) = -(N_i - 2m_i)^2 - T \left[ (N_i - m_i) \ln \frac{N_i}{N_i - m_i} + \right. \\ \left. + m_i \ln \frac{N_i}{m_i} \right].$$

Эти выражения определяют две характерные температуры:

$$T_{kp1} = N_1 / \ln 2 \equiv T_{kp}(1+p), \quad T_{kp2} = N_2 / \ln 2 \equiv T_{kp}(1-p),$$

где  $p = (N_1 - N_2)/N$ . Если  $N_1$  и  $N_2$  не равны друг другу (например,  $N_2 > N_1$ ), то при повышении температуры характер динамики системы может испытывать два резких превращения. При  $T < T_{kp1}$  система находится в состоянии, близком к одному из векторов  $\varphi^1, \varphi^2$  или их "негативам" (и релаксирует к одному из этих состояний в процессе распознавания образов). При  $T > T_{kp1}$  возникают случайные блуждания между  $\varphi^1$  и  $\varphi^2$ , при этом группа из  $N_2$  компонент  $\sigma$  близка к совпадающим компонентам векторов  $\varphi^1$  и  $\varphi^2$ . Наконец, при  $T > T_{kp2}$  начинаются блуждания между "образами" и их "негативами".

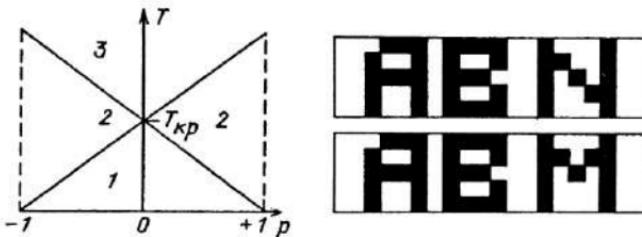


Рис. 2.8. Фазовая диаграмма системы нейронов, в памяти которой записаны два "образа". Цифрами обозначены области, в которых система находится в состоянии, близком к  $p = 1$  или  $-1$  (1), "блуждает" между "образами" (2), свободно "блуждает" по всем состояниям (3).

Рис. 2.9. Пример пары "образов", между которыми при моделировании на ЭВМ в определенном интервале температур наблюдалась "блуждания". При низкой температуре "блуждания" заморожены, а при высокой происходят свободно

Фазовая диаграмма системы в переменных  $T, p$  приведена на рис. 2.8. Низкотемпературная область отвечает упорядоченному, "криSTALLИЧЕСКОМУ" состоянию, высокотемпературная — "жидкому", а промежуточные области можно назвать "жидКОКристаллическими", поскольку для промежуточных областей имеет место ситуация, характерная для жидкокристаллического состояния, когда одна часть степеней свободы системы является заторможенной, а другая часть находится в "расплавленном" состоянии. На рис. 2.9 приведен пример пары образов, для которых при моделировании на ЭВМ в определенном интервале температур наблюдалось "промежуточное" состояние — случайные перескоки элемента " $M$ " в " $N$ " и обратно. При низкой температуре перескоки заторможены, а при повышении температуры диффузия по различным состояниям системы происходит свободно.

**3. Выработка прототипа.** При увеличении числа "образов", записываемых в память системы, минимумы энергии (1), отвечающие различным  $\varphi^s$ , могут сливаться. Рассмотрим группу "образов"  $\varphi^s (s = 1, \dots, s_0)$ , получающихся при небольших случайных искажениях  $\delta^s$  некоторого вектора  $\varphi^0$  (при этом группа не содержит

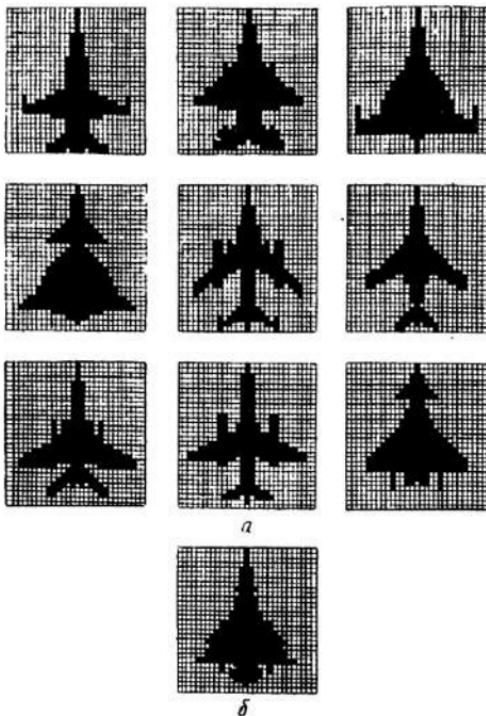


Рис. 2.10. Пример возникновения "прототипа" (б) в системе нейронов, в память которой записаны девять "образов" (а)

самого исходного вектора);  $\varphi^s = \varphi^0 + \delta^s$ . Вариация  $\delta$  вектора  $\varphi^0$  приводит к изменению энергии, соответствующей этому вектору, на величину

$$\begin{aligned}\delta E = & -\frac{1}{2} \sum_s ((\varphi^0 + \delta^s) \cdot (\varphi^0 + \delta))^2 + \frac{1}{2} \sum_s ((\varphi^0 + \delta^s) \cdot \varphi^0)^2 = \\ & = -\frac{1}{2} \sum_s [2(N + (\varphi^0 \cdot \delta^s))(\varphi^0 \cdot \delta) + 2(N + (\varphi^0 \cdot \delta^s))(\delta^s \cdot \delta) + \\ & + (\varphi^0 \cdot \delta)^2 + (\delta^s \cdot \delta)^2 + 2(\varphi^0 \cdot \delta)(\delta^s \cdot \delta)].\end{aligned}\quad (16)$$

При  $2m = -(\varphi^0 \cdot \delta^s) \ll N$ ,  $s_0 \gg 1$  и случайном искажении  $\delta^s$  исходного вектора  $\varphi^0$  при построении группы "образов" может выполняться неравенство  $\delta E \geq 0$ , и тогда исходный вектор будет отвечать минимуму энергии системы. В психологии образ, аналогичный  $\varphi^0$  (т.е. являющийся в определенном смысле "усреднением" некоторого числа образов и остающийся в памяти человека наряду с действительно предъявляемыми образами), получил название прототипа [24]. Пример образования "прототипа" при предъявлении группы образов приведен на рис. 2.10.

Вероятность появления прототипа при записи данной группы образов в матрицу  $V$  можно охарактеризовать относительной частотой появления вектора, отвечающего прототипу, в качестве устойчивой точки алгоритма (5) (или (5a)). На рис. 2.11 приведены гистограммы, показывающие относительную частоту появления в качестве устойчивых образов векторов, отличающихся от  $\varphi^0$   $m_0$ -компонентами, в зависимости от числа записываемых образов  $s_0$ . Из этого рисунка видно, что относительная частота появления прототипа мала при небольшом числе "образов"  $s_0$  и достигает примерно 75 % при  $s_0 > 0,2 N$ .

Вычислим вероятность того, что при записи  $s_0$  случайных векторов в матрицу  $V$ , отличающихся от  $\varphi^0$   $m_0$ -компонентами,  $\varphi^0$  будет

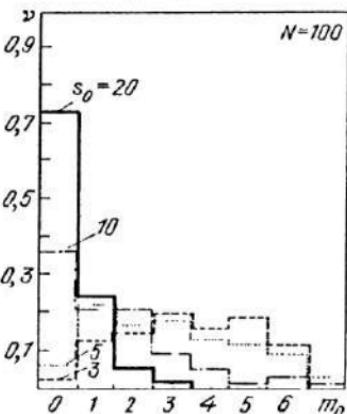


Рис. 2.11. Гистограммы, показывающие относительную частоту  $\nu$  появления устойчивых векторов алгоритма (5a), отличающихся от прототипа  $m_0$ -компонентами, в зависимости от числа  $s_0$  записанных "образов"

реализовывать минимум энергии системы, т.е. будет выполняться условие  $\delta E \geq 0$ . Из (16) получаем, что  $\delta E \geq 0$  при

$$x = \frac{1}{s_0} \sum_{s=1}^{s_0} (\delta \cdot \delta^s)^2 \leq 2, \quad N > 2m_0 \quad (17)$$

(предполагается, что  $N, m_0 \gg 1$ ). Распределение вероятности величины  $x$  дается функцией распределения

$$f(x) = \langle \delta(x_1 + x_2 + \dots + x_{s_0} - x) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dq}{2\pi} e^{-iqx} \prod_{s=1}^{s_0} \langle e^{iqx_s} \rangle, \quad (18)$$

где  $x = (\delta \cdot \delta^s)/s_0$ , а угловые скобки означают усреднение по векторам  $\delta^s$ , имеющим в  $m_0$ -позициях числа  $\pm 2$ , а в остальных позициях — нули. Вычисляя среднее в предположении, что  $+2$  и  $-2$  встречаются как значения  $\delta^s$  равновероятно:

$$\prod_{s=1}^{s_0} \langle e^{iqx_s} \rangle = \left( 1 - \frac{m_0}{N} + \frac{m_0}{N} \cos \frac{4q}{s_0} \right)^{s_0},$$

и подставляя его в (18), получим

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dq e^{-iqx} \left( 1 - \frac{m_0}{N} + \frac{m_0}{N} \cos \frac{4q}{s_0} \right)^{s_0}. \quad (19)$$

При  $s_0 \gg 1$  разложим косинус в ряд Тейлора и, ограничиваясь первыми двумя членами, получим приближенное выражение:

$$f(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \left( \frac{Ns_0}{8m_0} \right)^{1/2} \exp \left( -\frac{Ns_0 x^2}{32m_0} \right). \quad (20)$$

Вероятность того, что  $x \leq 2$ , дается интегралом вероятности

$$P(x \leq 2) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-u^2} du, \quad z = \sqrt{Ns_0/8m_0}. \quad (21)$$

Из выражения (21) видно, что вероятность возникновения прототипа тем больше, чем меньше  $m_0$  (при заданном отношении  $s_0/N$ ) или чем больше образов  $s_0$  (при заданном  $m_0/N$ ) использовалось для его формирования.

Возможность рассмотрения явления выработки прототипа как процесса статистического "усреднения" по ансамблю "образов" связана с видом матрицы связей между нейронами  $V$  (4), которая линейна по числу образов  $s_0$  в памяти. Отметим в этой связи, что матричным элементам  $V_{ij}$  (4) и энергии  $E$  (1) можно придать непосредственный вероятностный смысл, если воспользоваться понятием "фрустрации" ("разочарования") связей, впервые введенным для описания взаимодействующих спинов в неупорядоченных магнитных сплавах — спиновых стеклах [115]. Действительно, согласно (4) матричный элемент  $V_{ij}$  запишем в виде разности двух неот-

рицательных чисел:

$$V_{ij} = V_{ij}^+ - V_{ij}^- \equiv (v_{ij}^+ - v_{ij}^-)/s_0.$$

Здесь  $V_{ij}^+$  – число "образов"  $\varphi^s$ , для которых  $\varphi_i^s = \varphi_j^s$ , а  $V_{ij}^-$  – число "образов" с  $\varphi_i^s = -\varphi_j^s$ . Поскольку  $V_{ij}^+ + V_{ij}^- = s_0$ , то  $v_{ij}^+$  и  $v_{ij}^-$  имеют смысл вероятности соответственно корреляции и антикорреляции  $i$ -го и  $j$ -го нейронов в рассматриваемом ансамбле "образов" памяти. По аналогии с [115] связь  $ij$  между  $i$ -м и  $j$ -м нейронами в произвольном состоянии нейронной сети естественно назвать фрустрированной ("разочарованной"), если

$$(v_{ij}^+ - v_{ij}^-) \sigma_i \sigma_j < 0,$$

и нефрустрированной – при противоположном знаке неравенства. Тогда энергия системы (1) запишется в виде

$$E = \frac{1}{2} s_0 Q_F(\sigma),$$

где  $Q_F(\sigma)$  – разность между числом фрустрированных и нефрустрированных связей. Векторы, отвечающие минимуму энергии системы, соответствуют наибольшему числу нефрустрированных связей, т.е. наименьшей вероятности фрустрации нейронной сети. Исчезновение прототипа при "разобучении" см. в Приложении 1.

**4. Самоорганизация нейронных сетей.** Статистические свойства ансамбля "образов", которые участвуют в формировании нелинейной системой нейронов реакций на те или иные "стимулы", не являются произвольными, а определяются статистикой "стимулов", поступающих в систему на стадии "обучения" (см. § 5). С другой стороны, на процесс "запоминания" системой новых "образов" может оказывать существенное влияние информация, записанная в матрице  $V$  в предшествующие моменты времени.

Чтобы проиллюстрировать взаимообусловленность процессов "обучения" и "распознавания", рассмотрим следующий пример.

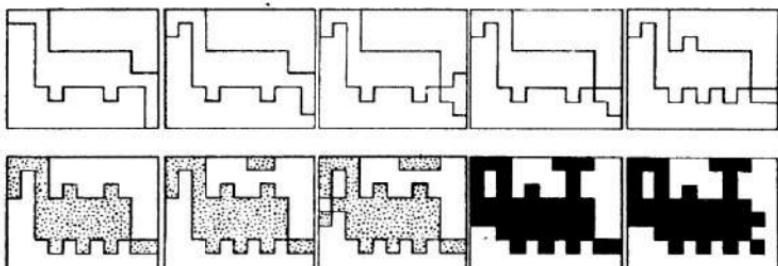


Рис. 2.12. Последовательность "стимулов", предъявлявшихся в качестве начального условия при моделировании на ЭВМ уравнений (5), (22)

Пусть в  $V$  записаны два таких "образа", хеммингово расстояние между которыми равно  $m$ , и пусть в качестве начального условия для системы (2), (3) выбираются элементы последовательности векторов (рис. 2.12), первый член которой совпадает с первым ("левым") образом, а последний — со вторым ("правым") образом. При моделировании (2), (3) на ЭВМ использовался алгоритм Хопфилда (5а) и дискретный аналог (3):

$$V_{ij}(l+1) = V_{ij}(l) + \epsilon \varphi_i(l) \varphi_j(l), \quad (22)$$

где  $V(l)$  — матрица связей между нейронами в  $l$ -м акте "распознавания",  $\varphi(l)$  — результат  $l$ -го процесса "распознавания":  $\varphi(l) = \varphi^1$  или  $\varphi^2$ . Как показали численные эксперименты, при определенных значениях параметра  $\epsilon$  в (22) средние стимулы последовательности могут восприниматься либо как искаженный левый, либо как искаженный правый "образы" в зависимости от порядка, в котором предъявляются стимулы, т.е. имеет место бистабильность восприятия. В отсутствие "дообучения" ( $\epsilon = 0$ ) смена устойчивого состояния происходит после предъявления 5-й картинки. При достаточно большой модификации матрицы ( $\epsilon = 0,025$ ) возникает гистерезис: смена "образов" при направлении от "ящера" к "паровозу" и наоборот происходит на 8-й и 3-й картинках соответственно.

Оценку ширины области гистерезиса  $x$  получим, полагая, что на границе этой области энергия (1), соответствующая взаимодействию стимула с левым "образом", увеличенная в  $1 + \epsilon(\frac{1}{2}m + \frac{1}{2}x)$  раз, равна исходной энергии, соответствующей взаимодействию стимула с правым "образом":

$$\left[1 + \epsilon\left(\frac{m}{2} + \frac{x}{2}\right)\right] \left[N - 2\left(\frac{m}{2} + \frac{x}{2}\right)\right]^2 = \left[N - 2\left(\frac{m}{2} - \frac{x}{2}\right)\right]^2.$$

Отсюда при  $x \ll N_1 = N - m$  находим ширину области гистерезиса:  $x = m / [(8/\epsilon N_1) - 1]$ . Если  $\epsilon \geq 4/N_1$ , область гистерезиса охватывает всю последовательность стимулов:  $x = m$ . В этом случае "запоминание" системой (согласно (3)) одного из "образов", получившегося в результате распознавания последовательности стимулов, приводит к невозможности получить в качестве устойчивого второй "образ" памяти, т.е. к эффективному "забыванию" последнего. Аналогичное явление в психологии человеческой памяти получило название "проактивного забывания" [24].

Моделирование на ЭВМ показало, что уменьшение числа деталей "образа" приводит к уменьшению ширины области гистерезиса. Отметим, что аналогичное явление наблюдается при исследовании гистерезиса зрительного восприятия [44, 120].

Если теперь стимулы предъявляются случайным образом (с частотой  $\Omega$ ), то изменение ширины области "притяжения", например

левого образа, описывается уравнением  $dx/dt = \epsilon \Omega(2x/m)$ , где  $m$  – хеммингово расстояние до ближайшего "образа". Таким образом, область притяжения экспоненциально растет со временем, что приводит к вытеснению одного "образа" другим.

Ограничение  $|V_{ij}| < V_0$ , возникающее из-за нелинейного слагаемого в (3), приводит к тому, что вновь записываемые "образы" уменьшают относительный вес старых, а также частично искажают их. Аналогичное явление в психологии носит название "ретроактивного забывания" [24], при этом новая информация вытесняет старую.

Рассмотренные примеры показывают, что процесс "запоминания" ансамблем нейронов новой информации существенно зависит от имеющихся в  $V$  старых "образов", от модификации матрицы связей в каждом акте "распознавания", а также от той последовательности "стимулов", которые предъявляются системе.

В несколько отличающихся моделях самоорганизация нейронных сетей изучалась в [72, 85], где "обучение" системы в процессе взаимодействия с внешними "стимулами" приводило к возникновению предельных циклов в динамике нейронов.

**5. Модель выработки ассоциаций.** Рассмотренная выше модель категоризации позволяет исследовать ряд процессов, аналогичных известным явлениям в психологии человеческой памяти: обучение, распознавание, ретроактивное и проактивное забывание, бистабильность восприятия, выработку прототипа. Выработка прототипа, по существу, представляет собой процесс формирования "абстрактного понятия", поскольку прототип не содержится среди стимулов, поступающих в систему нейронов на стадии обучения извне, и в то же время, будучи устойчивым состоянием системы, прототип может появляться в результате процесса распознавания наряду с "истинными образами".

Рассмотрим теперь модель выработки ассоциации. Предположим, что различные группы компонент вектора состояния ансамбля нейронов имеют самостоятельный смысл подобно тому, как его имеют отдельные слова в предложении. Обозначим эти группы через А, В, . . . . Пусть в память системы записаны следующие образы:

- |           |          |      |
|-----------|----------|------|
| 1) АМ NX; | 4) SMNT; |      |
| 2) ВМ NX; | 5) SMNU; | (23) |
| 3) СМ NX; | 6) SMNV. |      |

Если теперь в качестве "стимула" предъявлен вектор SMNY, то при определенных соотношениях между относительными весами различных групп в процессе релаксации система перейдет в устойчивое состояние, являющееся прототипом, SMNX. Этому приме-

ру можно дать следующую наглядную интерпретацию [67]. Если A, B, C, S обозначают имя (Платон, Сократ и др.), MN обозначает "человек", X – "смертен", U, V, T – добный, мудрый и др., то (23) можно записать в виде:

- |                             |                           |
|-----------------------------|---------------------------|
| 1) Платон-человек-смертен;  | 4) Сократ-человек-добный; |
| 2) Пифагор-человек-смертен; | 5) Сократ-человек-мудрый; |
| 3) Зенон-человек-смертен;   | 6) Сократ-человек-бедный, |

а устойчивое состояние представляет собой некоторое новое утверждение, не содержащееся среди обучающих стимулов:

Сократ-человек-смертен,

и представляющее собой некоторую ассоциацию. Процесс "блуждания" системы между близкими "образами" (см. рис. 2.9), записанными в памяти системы, может моделировать известное психологическое явление построения новых ассоциаций. Действительно, после окончания процесса распознавания "предъявленного стимула" система переходит в состояние, близкое к одному из "образов". Однако вследствие флуктуаций (при конечной температуре термостата) возможны случайные перескоки от "образа" к "образу", причем наиболее часто происходят "перескоки" между близкими "образами", которые образуют набор "ассоциаций", порожденных предъявлением "стимулом".

Последовательность "образов", которые проходит система в процессе "блуждания", зависит как от структуры памяти, так и от изменения температуры термостата (рис. 2.7). Действительно, если в системе записаны два приблизительно ортогональных "образа", то перескоки между ними возможны только при сравнительно высокой температуре  $T \geq T_{kp}$ . В то же время, если "образы" близки, т.е. отличаются в небольшом числе компонент  $N_1 \ll N$ , то флуктуационные перескоки возможны уже при  $T \sim N_1 \ll T_{kp}$ . Поэтому при добавлении в память системы к двум ортогональным "образам" других, не ортогональных первым, время перехода между ортогональными "образами" может уменьшиться. Это явление аналогично ускорению протекания химических реакций при добавлении в реагирующую смесь катализатора. При низкой температуре "образы", записанные в память системы, могут объединяться в группы, причем частоты перескоков между элементами одной группы намного больше, чем между "образами" различных групп. Таким образом, рассмотренная модель нейронной сети в термостате позволяет исследовать известное психологическое явление, когда предъявленный "стимул" порождает целую цепочку различных ассоциаций, связанных одна с другой.

Рассмотренная модель нейронного ансамбля позволяет исследовать такие свойства системы, как распознавание образов, обучение, забывание, выработка прототипа и др., которые аналогичны соответствующим явлениям, хорошо известным в психологии (см., например, [24]).

Заметим, что в рассмотренной модели\*) состояние отдельных нейронов описывалось с помощью дискретной переменной, а "память" была реализована как множество аттракторов в фазовом пространстве этой системы (ряд вершин  $N$ -мерного куба). Однако класс нелинейных динамических систем, в которых могут наблюдаться перечисленные выше явления, существенно шире: к нему относятся как многомерные динамические системы, рассматриваемые в нелинейной механике, если они обладают подходящей структурой фазового пространства, так и дискретные системы, подобные клеточным автоматам, имеющие, кроме устойчивых стационарных состояний, также циклы различной длины (см. в связи с этим § 12, п. "Сценарии"). Элементы памяти, по-видимому, могут быть реализованы и с помощью более сложных притягивающих множеств — аттракторов, обладающих внутренней информационной структурой.

Важной функцией, которую осуществляют такие ансамбли, является процесс категоризации, т.е. формирование в ответ на предъявленный стимул одной из ограниченного набора стереотипных реакций. Известно, что аналогичные явления происходят в нервных сетях при обработке первичной сенсорной, например зрительной, информации [27]. Применительно к "высшим" функциям мозга подтверждением рассматриваемой теории было бы экспериментальное обнаружение устойчивых "узоров" активности нейронных ансамблей [76], возникающих при определенных видах мыслительной деятельности.

---

\*) Дальнейшее исследование модели и ее обобщения см. в работах [16, 20, 109, 111, 115, 116].

---

## ГЛАВА 3

### СЕНСОМОТОРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Сенсорные и моторные системы находятся "на периферии" мышления человека: с помощью сенсорных систем (органов чувств) мы воспринимаем внешний мир, с помощью моторных систем (органов движения, органов речи) воздействуем на него.

Механизм категоризации явлений внешнего мира в живых организмах осуществляет "сужение" диапазона внешних стимулов, воспринимаемых организмом, при переходе к образам, записанным в его памяти. Это явление сужения диапазона воспринимаемых ощущений проявляется, в частности, довольно своеобразно в известном законе Вебера – Фехнера (так называемом основном психофизическом законе): "ощущение есть логарифм раздражения". В 1830 – 1834 гг. физиолог Вебер установил, что органы чувств человека (слух, осязание, зрение) воспринимают не абсолютное, а только относительное изменение внешнего воздействия (интенсивности звука, давления на кожу, яркости света). При этом само восприятие этого относительного изменения ощущается только в том случае, когда оно больше некоторого определенного порога, и не ощущается вообще, если оно меньше этого порога. Физик Фехнер в 1858 г. предложил следующую формулу для описания того факта, что человек ощущает лишь относительное изменение внешнего воздействия:

$$S = a \ln I + b,$$

где  $S$  – "интенсивность ощущения",  $I$  – "сила раздражителя",  $a, b$  – эмпирические постоянные.

Подобному же логарифмическому закону подчиняется, как известно, и восприятие высоты звука – одинаковые ноты двух соседних октав различаются по частоте вдвое.

Интересное проявление закономерности типа закона Вебера – Фехнера было обнаружено при исследовании зрительной коры приматов. Оказалось, что координаты точечного объекта внешнего мира и координаты "изображения" этого точечного объекта в первичной зрительной коре связаны соотношением

$$W/W_0 = \ln(Z/Z_0),$$

где  $W = U + iV$  – координаты на зрительной коре,  $Z = X + iY$  – координаты во внешнем мире (в плоскости, перпендикулярной оси зрения),  $W_0, Z_0$  – постоянные.

Таким образом, нервные пути в мозгу приматов (и, по-видимому, человека) проходят так, что при передаче изображения объектов внешнего мира с сетчатки глаза в первичную зрительную кору размеры большого и маленького изображений на сетчатке преобразуются неодинаково: в зрительной коре эти изображения становятся почти одинаковыми и лишь несколько смешены относительно друг друга. Предметы одинаковой формы, но различного размера в первичной зрительной коре воспринимаются как почти одинаковые. Это позволяет автоматически сужать широкий диапазон таких предметов и, по-видимому, облегчает их дальнейшую категоризацию мозгом.

Можно предположить, что нечто аналогичное происходит и при дальнейшей обработке информации (не только зрительной) мозгом. Связи между его различными подсистемами, производящими последовательную обработку сведений о явлениях внешнего мира, в процессе обучения (или в процессе эволюции), возможно, устанавливаются так, чтобы автоматически производить категоризацию этих явлений по какому-либо общему признаку, подобно тому как в приведенном примере облегчается сведение в одну категорию предметов различного размера, но одной формы.

## § 7. Зрение

**1. Элементы зрительного распознавания.** В гл. 1 мы рассмотрели явление фототаксиса у бактерий, обеспечивающее движение фотосинтезирующих бактерий к источнику света, необходимое для поддержания процесса фотосинтеза, являющегося у таких организмов источником энергии для жизнеобеспечения. Первичным приемником света у таких бактерий являются фоторецепторы, передающие сигнал моторной системе, обеспечивающей движение бактерии к источнику света.

В качестве примера более сложного организма, обладающего фототаксисом, можно рассмотреть движение к источнику света простейшего *Stentor*. В этом организме, имеющем ось симметрии, при освещении его точечным источником вырабатывается сигнал, пропорциональный отклонению направления на источник от направления оси симметрии организма. Выработанный сигнал включает моторную систему, обеспечивающую поворот оси организма в сторону источника и тем самым уменьшающую этот сигнал. После того как организм ориентировал свою ось симметрии на источник света, включается моторная система, обеспечивающая его движение к источнику. Таким образом, этому животному присуща способность

ность определять положение светового пятна (источника света) в пространстве.

В более сложных организмах системе зрения присуща уже способность более подробной "категоризации" различных светящихся (или, наоборот, темных) объектов. Например, у лягушки в зрительной системе мозга обнаружены нервные клетки, реагирующие на 1) края мелких неподвижных объектов в поле зрения;

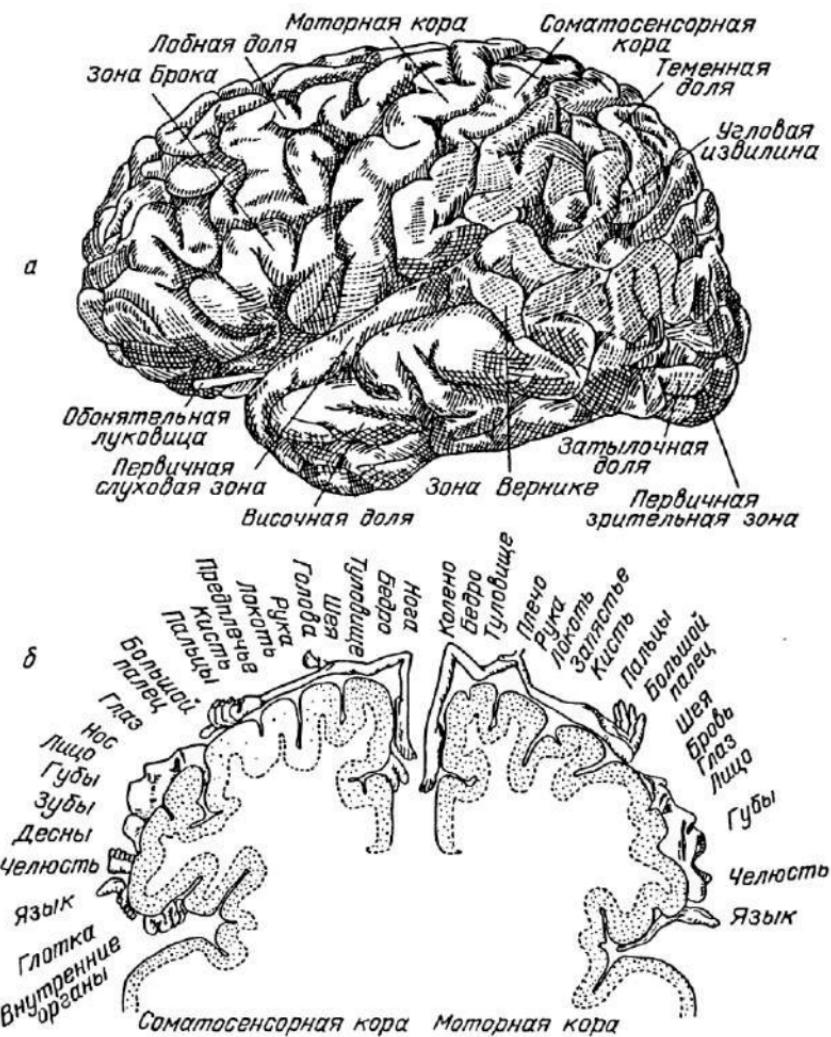


Рис. 3.1. Зоны мозга: а – левое полушарие, б – "карлик Пенфилда" – специализация соматосенсорной коры мозга (левое полушарие) и моторной коры (правое полушарие)

- 2) перемещающиеся к центру поля зрения маленькие темные пятна с закругленными границами (эти нейроны называют "датчиками букашек");
- 3) периодически появляющуюся в поле зрения и исчезающую из него границу освещенности;
- 4) снижение освещенности;
- 5) абсолютное значение освещенности.

В зрительной системе мозга обезьян также обнаружены специализированные клетки различных типов. Будучи расположены в различных частях коры головного мозга определенным упорядоченным образом, такие клетки могут реагировать на светлые кружки (на темном фоне) в определенном месте зрительного поля; на определенным образом ориентированные отрезки светлых линий, также находящихся в некоторой точке зрительного поля; на движущуюся линию; на сигналы от одного или другого глаза; на цвет и т.д. Все эти клетки обнаружены в зрительной коре головного мозга, в так называемом поле 17 (рис. 3.1).

**2. Зрительная система человека и модели.** В мозгу человека, а также и других животных (например, макак-резусов) имеются области, предназначенные для узнавания других людей по лицу. Эти области расположены на нижней стороне затылочных долей коры и простираются вперед к внутренней поверхности височных долей коры. При повреждении этих областей способность узнать конкретного человека по чертам лица при взгляде на него, по фотографии, скульптуре, рисунку или карикатуре может быть полностью утрачена. При этом, однако, больной может сохранить способность читать, называть видимые им предметы, может подробно описать видимое лицо и выбрать пару фотографий одного и того же лица, сделанную в фас и в профиль. Больной теряет не саму возможность установить идентичность знакомых людей, а лишь связь лица человека с его образом: он не может назвать человека, взглянув на него или его фотографию.

Таким образом, функцию распознавания человеческих лиц в мозгу человека выполняет, по-видимому, целая нейронная сеть. В связи с этим обстоятельством представляет большой интерес моделирование распознавания фотографий человеческих лиц с помощью ЭВМ, проведенное Кохоненом и сотрудниками [91] (рис. 3.2). В память ЭВМ вводились закодированные образы, соответствующие сотням фотографий различных людей. При последующем предъявлении машине одной из этих фотографий ЭВМ проводила сравнение предъявленной фотографии со всеми фотографиями, имеющимися в ее памяти, и выбирала наиболее близкую фотографию. Предъявлялись также фотографии, от которых был оторван кусок, фотографии, на которых была закрыта часть лица, и фотографии, искаженные специально наложенным

на изображение "шумом". В целом результаты этих исследований показали, что ЭВМ может с успехом распознавать одно из нескольких сотен различных лиц.

В связи с распознаванием человеческих лиц возникает вопрос об изменении человеческого лица с возрастом, а также об его изменениях при проявлении различных эмоций. Эти изменения обсуждались различными художниками, указавшими некоторые закономерности как в возрастных изменениях лица, так и в его изменениях при выражении ряда эмоций. Моделирование этих изменений с помощью ЭВМ проводилось Файном [56].

Развитие этого подхода к описанию изменения изображений человеческого лица Файн использует для моделирования на ЭВМ элементов творческой работы скульптура в форме диалога скульптора с машиной. Отмечая, что в каждый момент скульптур формирует какую-то ограниченную часть скульптуры и что этот процесс идет последовательными небольшими шагами (причем за каждый шаг скульптор изменяет поверхность на небольшую величину),



Рис. 3.2. Распознавание фотографий лиц с помощью ЭВМ: *а* – распознавание фотографий по предъявленной левой половине фотографии (1 – изображения в памяти ЭВМ – всего 100 изображений, 2 – результат распознавания); *б* – устранение "шума"; *в* – распознавание по части изображения

автор применяет подход, использованный им при моделировании возрастных или эмоциональных изменений лица, для расчета и конструирования с помощью ЭВМ изображения скульптуры на дисплее в ходе работы над ней художника. По заданному варианту изменения поверхности скульптуры ЭВМ строит ее "фотографию" либо стереоизображение, а скульптор либо отвергает, либо принимает и реализует рассмотренный вариант изменения поверхности.

Важным свойством человеческого зрения является стереоскопичность восприятия, которая является одним из средств нашей оценки как объемности предметов, так и определения расстояния до них. Поля зрения двух глаз частично перекрываются, и два глаза рассматривают один и тот же объект под несколько разными углами. Таким образом, при рассматривании предмета глаза немногого скошены, и их зрительные оси пересекаются в некоторой точке. Обычно говорят, что глаза фиксируют эту точку, т.е. проекция этой точки попадает в центр сетчатки каждого из глаз. Любая соседняя точка *A* в поле зрения будет при этом проецироваться на несколько различающиеся (по расстоянию от соответствующего центра) точки сетчатки двух глаз. Разность этих расстояний (диспертность) будет меняться с изменением расстояния точки *A* от плоскости, проходящей через фиксируемую точку и перпендикулярной направлению от глаз к фиксируемой точке. Таким образом, можно предположить, что в основе стереоскопического зрения лежит способность мозга автоматически производить обработку значения диспертности для каждой точки *A* и "вычислять" значение удаленности этой точки.

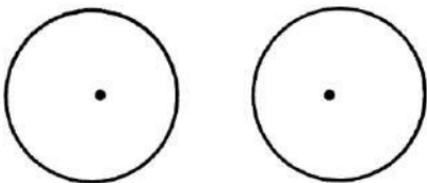


Рис. 3.3. Простая стереограмма "конус"

Рассматривая простейшую стереограмму (рис. 3.3), можно убедиться, что точка, изображенная на стереопаре вблизи центра круга, "поднимается" вверх над плоскостью круга тем выше, чем сильнее сдвинуты относительно центра эти точки на стереопаре (они приближены друг к другу; если же их удалить, то центральная точка "опустится" под плоскость круга). Наклоняя или поворачивая лист бумаги с изображением такой стереопары, можно наблюдать, как "поднявшаяся" точка "плавает" над плоскостью круга, перемещаясь относительно него. На языке рассматриваемой в этой книге модели можно сказать, что предъявленный нам стимул —

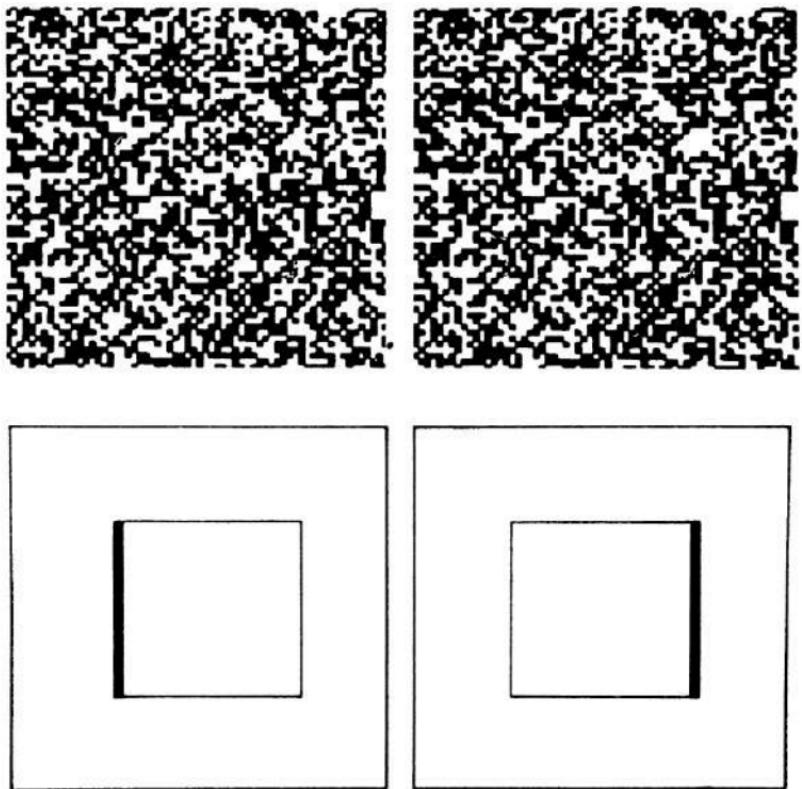


Рис. 3.4. Стереограмма Юлеша: на одной из картинок квадрат в центре (из случайно расположенных точек) сдвинут вправо, на другой – влево. При рассматривании стереограммы центральный квадрат "всплывает"

плоская картинка с двумя кругами и смещенными центрами этих кругов – при распознавании "попал в воронку" образа, соответствующего известному трехмерному объекту: прозрачному конусу с окрашенным периметром основания и окрашенной вершиной, стоящему на плоскости. При перемещении листа бумаги мы мысленно рассматриваем этот прозрачный конус, наклоняя и поворачивая его.

Схему нейронов, пересчитывающую в мозгу значение диспаритетности отдельной точки или даже пространственной кривой, представить себе относительно легко. Однако при рассмотрении более сложных объектов, таких, например, как стереограммы Юлеша [43] (рис. 3.4), возникает следующий вопрос: каким образом в мозгу происходит поиск и сопоставление таких элементов на двух изображениях (попадающих на сетчатку двух глаз), которые

соответствуют одному и тому же участку обозреваемой пространственной сцены? При этом, по-видимому, не требуется предварительного распознавания отдельных объектов или частей сцены.

Одним из подходов при попытке моделирования стереоскопического зрения (т.е. автоматического определения расстояния до различных объектов сцены, исходя из пары фотографий сцены, сделанных под различными углами) является выделение линий, соответствующих физическим изменениям поверхностей объектов этой сцены.

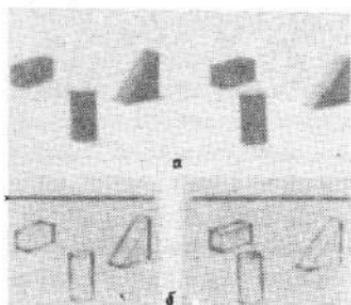


Рис. 3.5. Стереопара сцены (а) и ее "свертка" – выделение границ тел (б)

Информация о сцене зашифрована в массиве значений интенсивности света, отражаемого различными точками объектов освещенной сцены. У реальных физических поверхностей есть следующее свойство: в тех местах, где имеются какие-то их изменения, обычно заметны изменения степени почернения. Эти резкие переходы от одной степени почернения к другой обусловлены различной освещенностью, окраской, углом наклона (см. также [77]). Линии таких переходов между различными уровнями почернения могут служить объектами сопоставления двух изображений на сетчатках глаз для мозга и двух фотографий при попытке моделирования на ЭВМ. Пример пары стереограмм самой сцены и ее "свертки" (выделения границ поверхностей) приведен на рис. 3.5.

В качестве одного из способов преобразования используется свертка интенсивности изображения с фильтром, имеющим весовую функцию  $F$ , пропорциональную лапласиану от гауссовой функции:

$$F(x, y) = \left( \frac{x^2 + y^2}{\sigma^2} - 2 \right) \exp \left( -\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right).$$

Исходным пунктом для выбора такого способа выявления границ поверхностей является предположение о существовании аналогичной фильтрации изображения в глазу.

Физиологические данные, собранные на протяжении нескольких предыдущих десятилетий, дают основание считать, что в сет-

чатке глаза человека происходят явления, аналогичные вышеизложенной обработке массива интенсивностей поступающего светового сигнала. Выходные сигналы из сетчатки каждого глаза поступают в мозг примерно по миллиону нервных волокон, объединенных в зрительный нерв. Большая часть волокон зрительного нерва идет к двум так называемым латеральным коленчатым телам, расположенным в глубине мозга, а оттуда, после одного синаптического переключения, направляется непосредственно к первичной зрительной коре, в затылочную область мозга. Каждое нервное волокно, идущее от глаза к латеральному коленчатому телу, — это аксон нейрона, называемого ганглиозной клеткой сетчатки. На эту клетку поступают (через промежуточные нейроны) сигналы от целой группы фоторецепторов, образующих "рецептивное поле" данной ганглиозной клетки. Если свет падает на центр рецептивного поля, ганглиозная клетка возбуждается; если же свет падает только на кольцевую периферическую зону рецептивного поля, то ганглиозная клетка тормозится, возбуждение отсутствует. Таким образом, ганглиозные клетки (как и клетки коленчатого тела) лучше всего реагируют на круглые светлые пятна определенного размера в определенной части поля зрения. Такая концентрическая организация с возбуждающим центром ("on-центр") и тормозной периферией либо, наоборот, с тормозным центром ("off-центр") и возбуждающей периферией была обнаружена Куффлером в 1953 г.

В [43, 81] отмечается аналогия операции обработки изображения, проводимой ЭВМ, с обработкой, проводимой сетчаткой глаза. Свертка интенсивности изображения с функцией, пропорциональной лапласиану от гауссовой функции, соответствует вычитанию из уровня почернения каждого пикселя (элемента растрового изображения сцены) взвешенного среднего уровней почернения соседних пикселов, причем весовая функция описывается лапласианом от гауссовой функции. Таким образом обрабатывается каждый пиксель, и эта обработка похожа на обработку сетчаткой сигнала, проходящего на каждую ганглиозную клетку.

В результате такой обработки нулевые точки в преобразованном изображении будут соответствовать резким переходам почернения в исходном изображении.

После того как границы поверхностей выделены, задача о нахождении расстояния до объекта упрощается. На ЭВМ расстояние до некоторой точки на данной линии, присутствующей на обеих картинках преобразованной стереопары, определяется с помощью относительно простых алгоритмов, которые после отождествления линий на двух картинках сводятся к геометрическим вычислениям.

Что же касается мозга, то исследования зрительной коры кошек и макак показали, что некоторые нейроны дают сигналы, непосредственно характеризующие бинокулярную диспаритетность, — по-видимому, они входят в первые цепи, автоматически "вычисляющие" расстояние до объекта.

Со стереоскопической природой зрения человека (стереопсисом) связано и зрительное восприятие движения в глубину, к определенному объекту или от него [110]. Относительные скорости

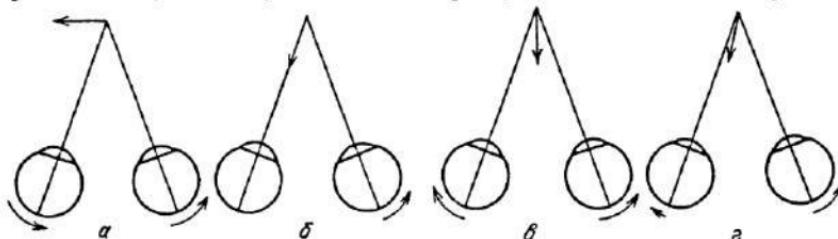


Рис. 3.6. Стереоскопическое восприятие движения в глубину

изображений объекта на сетчатке левого и правого глаз указывают на направление перемещения объекта в глубину. Если, например, левое и правое изображения движутся в одном направлении, то создается впечатление, что объект движется мимо наблюдателя (нет движения в глубину, рис. 3.6 $\alpha$ ); если движется только одно изображение, это соответствует движению объекта прямо в тот глаз, изображение в котором покоятся (рис. 3.6 $\beta$ ); если изображения движутся в разные стороны с одинаковой скоростью, это означает, что объект движется на наблюдателя (рис. 3.6 $\delta$ ); если левое изображение движется медленнее правого, объект движется ближе к левому глазу наблюдателя, чем к правому (рис. 3.6 $г$ ).

До сих пор мы рассматривали вопрос об "одностадийном" автоматическом распознавания зрительной системой образов внешнего мира и о моделировании этого процесса на примере распознавания человеческих лиц и стереоскопического определения глубины сцены.

Однако даже самые простые эксперименты по зрительному распознаванию человеком хорошо известных образов показывают, что такое распознавание проводится в несколько этапов (или, возможно, несколькими системами мозга). Например, в [87] испытуемым предъявлялись пары букв, и нужно было быстро определить, одинаковы они по смыслу или нет. Таким образом, правильный ответ при предъявлении "АБ" или "Аб" будет "различные", а при предъявлении "АА" или "Аа" — "одинаковые". В экспериментах оказалось, что время реакции (время от момента предъявления пары букв до ответа) при выяснении "иден-

тичности по смыслу" превышает примерно на 0,1 с время реакции при выяснении "физической идентичности". Эти результаты представляются понятными, поскольку физическая идентичность пары букв (например, "АА") может быть выяснена без "поиска" их наименования (смысла) просто по идентичности написания, т.е. по их "рисункам". В то же время при выяснении, одинаковы ли наименования букв "А" и "а" требуется найти в памяти и сравнить "картины", соответствующие наименованию "рисунков" "А" и "а".

Пример моделирования нейронных подсистем первых ступеней зрительной системы человека – распознавание образов букв и обучение ЭВМ этому распознаванию – был описан в § 5 гл. 2.

Попытки моделирования более "глубинных" этапов обработки зрительной информации связаны с проблемой понимания (см. § 13 гл. 4).

## § 8. Слух

**1. Слуховое распознавание.** Слух как один из каналов восприятия внешнего мира, в частности, восприятия животным сообщений от подобных ему животных, присущ не только человеку и другим позвоночным, но и беспозвоночным животным. Развитие слуха в процессе эволюции связано, по-видимому, с необходимостью приема сообщений от других представителей данного вида и обнаружения хищников на расстоянии в условиях, когда пользование другими сенсорными каналами затруднено (темнота, мутная вода, густая растительность) [63]. В ходе эволюции слух как часть системы коммуникации возник довольно поздно, лишь у ракообразных.

Электрофизиологические опыты показывают, что крабы, например, могут воспринимать различные звуки, распространяющиеся по воздуху или по грунту и несущие сигналы отпугивания, угрозы или предупреждения. Самка краба может принимать сигнал самца на расстоянии в несколько метров; крабы воспринимают крики береговых птиц.

У насекомых в ходе эволюции слух возникал неоднократно в разных отрядах этого класса животных, и в настоящее время известны три типа слуховых органов насекомых: у двукрылых – органы, детектирующие смещение в звуковой волне, у прямокрылых и бабочек – детекторы давления или его градиента, у большинства насекомых – подколенные органы слуха.

Различным видам поведения насекомых соответствуют различные специфические звуковые сигналы: например, на рис. 3.7 приведены осцилограммы акустических сигналов жука-лубоеда. Его самка откладывает яйца в стволе тигантской американской

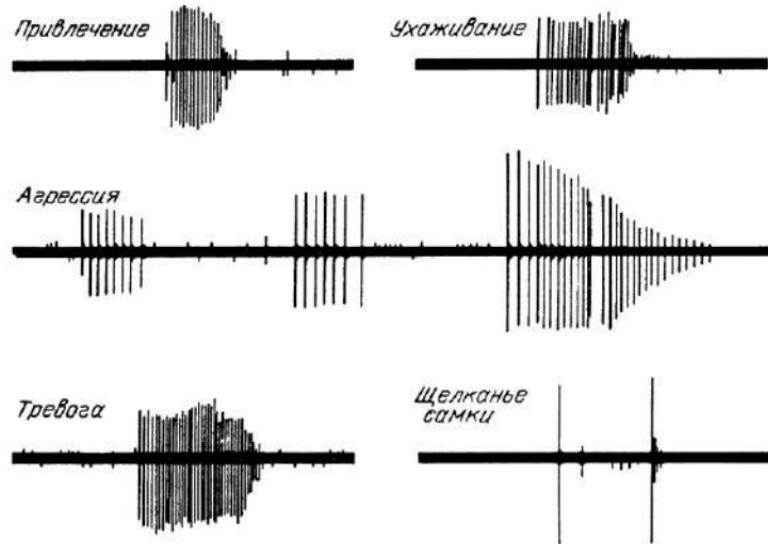


Рис. 3.7. Сигналы жука-лубоеда

пихты [45]. Привлекающую "песню" жук издает, приближаясь к входному отверстию хода, прогрызенного самкой в коре дерева, внутри которого она собирается отложить яйца. "Песня ухаживания" издается непосредственно перед спариванием. Сигнал агрессии издается при встрече двух жуков и в самом начале ухаживания за самкой. Сигнал тревоги жук издает, если взять его в руку. Самка издает щелкающий звук, прогрызая ход. Все сигналы жуки издают путем стрекотания (стридуляции) — трения кантом (парой тонких зубцов, расположенных у конца брюшка) о напильник (твёрдую пластинку с множеством мелких гребешков на поверхности, находящуюся на внутренней поверхности надкрылий).

Аналогично этому и у других насекомых каждому из сценариев (или частей сценария) его поведенческого "репертуара" соответствуют определенные звуковые сигналы. Таким образом, звуковые сигналы насекомых распределены по отдельным категориям, каждая из которых несет сообщение об определенном типе действий или "намерений" данного насекомого.

**2. Слух человека.** У человека звуковые колебания от внешнего источника, попадая в ухо, приводят в движение барабанную перепонку, которая перемещает последовательно соединенные между собой косточки среднего уха [32]. Внутренняя косточка — стремечко — упирается в овальное окошко — отверстие в основании так называемой улитки. Улитка представляет собой спираль (при-

мерно два с половиной витка), "намотанную" на поверхность конуса и идущую от его основания к вершине (рис. 3.8). Вдоль спирали улитки идут параллельно три канала, два из которых разделены базилярной мембраной. На ней по всей длине четырьмя рядами расположены волосковые клетки. Колебания овального окошка передаются жидкости, заполняющей канал, прилегающий к базилярной мембране, волоски отклоняются и волосковые клетки генерируют электрический сигнал. Этот сигнал по слуховому нерву передается в мозг — через два синаптических переключения (в нижнем двухолмии и медиальном коленчатом теле) сигнал попадает в первичную слуховую кору мозга (см. рис. 3.1).

Информацию, содержащуюся в звуковом сигнале, можно полностью описать одной функцией времени — например смещением овального окошка. Эта информация анализируется нервной системой. Когда, в частности, воспринимается человеческий голос, такой анализ позволяет нам понять произносимые слова и фразы.

Бинауральный эффект — способность человека и животных определять направление на источник звука — связан с анализом мозгом различий в информации (в частности, в амплитуде и фазе звука), приходящей в два уха (в горизонтальной плоскости человек определяет направление на источник звука с погрешностью примерно в  $3^\circ$ ). Такой анализ для не слишком высоких частот (примерно до 1500 Гц) может быть проведен путем нахождения разности времени прихода в два уха данной фазы звуковых колебаний.

Даже о первых этапах обработки звукового сигнала (например, речи или мелодии) слуховой системой известно мало. В прошлом столетии Гельмгольц предложил резонансную теорию слуха. Согласно этой теории звук подвергается разложению на спектральные компоненты (анализ Фурье) чисто физически — путем возбуждения резонансных колебаний отдельных участков базилярной мембранны улитки и локальной передачи этих колебаний волосковым клеткам. В 50-х годах нашего века Бекеши экспериментально показал, что когда основанию улитки передаются колебания, вызванные звуком определенной частоты, колебания наибольшей амплитуды возбуждаются только в том малом участке базилярной мембранны,

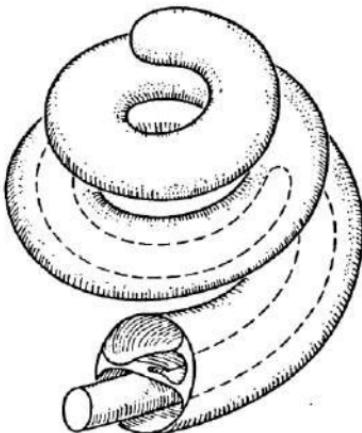


Рис. 3.8. "Улитка" внутреннего уха

резонансная частота которого соответствует частоте возбуждающего улитку звука. Таким образом, сложный звуковой сигнал, состоящий из многих различных синусоидальных колебаний разной частоты, с различными фазами этих частотных составляющих, действуя на основание улитки, вызывает сложное пространственное распределение вынужденных колебаний базилярной мембранны, причем колебания более высоких частот локализуются вблизи основания улитки, а низкочастотные колебания — у ее вершины. Приходящие в движение волоски генерируют в волосковых клетках сигналы, передаваемые в волокна слухового нерва. При этом передается информация как об амплитудах, так и о фазах колебаний базилярной мембранны в различные моменты времени и в различных точках мембранны по ходу улитки. Разрешение по времени фаз различных частот, как и при бинауральном эффекте, имеет порядок нескольких десятков микросекунд, несмотря на то, что предел скорости передачи импульсов одним нейроном составляет около 300 импульсов в секунду.

Можно лишь предполагать, что дальнейшая обработка звукового сигнала, представляющего собой слово или фразу, происходит в мозгу подобно тому, как узнаются лица отдельных людей. Такой процесс категоризации звуков речи, накопление в памяти образов отдельных слов или даже фраз и распознавание предъявленных в речи собеседника слов-стимулов с помощью процесса релаксации стимула в "воронке", соответствующей некоторому образу, вероятно, действительно происходят в мозгу и могут быть рассмотрены в рамках нашего подхода. Само количество слов, знакомых человеку и, следовательно, записанных в его памяти, составляет несколько сот тысяч. Правда, число слов, реально используемых в повседневной жизни, может быть гораздо меньшим (см. § 12 гл. 4). Список слов, сохранившихся в различных языках со времен позднего неолита и, по-видимому, составляющих словарь первобытного человека, приведен в приложении I [39].

Однако подобно тому как в зрительной системе мозга человека имеются, наряду с нейронными системами, распознающими лица, еще и системы нейронов, реагирующие на некоторые довольно универсальные составляющие части различных изображений (края плоскостей с различной освещенностью, движущиеся отрезки прямых, простейшие геометрические элементы и т.п.), так и в слуховой системе могут содержаться подсистемы нейронов, распознающие некоторые универсальные составляющие части слов (т.е. автоматически реагирующие на них). Такими элементами, как показывают эксперименты [65], являются, в частности, фонемы. Фонемы — это единицы восприятия, которые в языке соответствуют согласным и гласным звукам. Эксперименты с младенцами в возрасте от одного до четырех месяцев показали, что у них

имеется (сохраняющаяся и у взрослых) врожденная способность к категоризации фонем. Оказалось, что независимо от того, в какой языковой среде рождаются дети, они обладают врожденной способностью различать глухие и звонкие согласные ("б" и "п", "д" и "т" и др.), различные гласные ("а" и "и", "а" и "о") и обнаруживают ряд других, более тонких различий между фонемами. Эти "готовые" механизмы различения фонем позволяют в дальнейшем ребенку распознавать варьирующиеся звуковые сигналы как ряды фонем, а затем — как слова и фразы.

3. Моделирование распознавания речи. В качестве примера моделирования процесса распознавания речи рассмотрим систему

Таблица 3.1

Пример диалога (по телефону) между человеком (USER) и системой AIRLINE

Machine: This is the Bell Laboratories flight information system. May I help you?  
User: I want one first-class seat on flight number three one to Denver on Sunday.  
Machine: I am sorry the flight is not available on Sunday.  
User: I would like to leave on Saturday.  
Machine: Flight number three one leaves New York at nine forty-five A.M. arrives in Denver at one ten P.M.  
User: What is the flight time?  
Machine: The flight time is five hours and twenty-five minutes.  
User: How many stops are there on the flight?  
Machine: This flight makes one stop.  
User: I want a nonstop flight.  
Machine: I am sorry there are no nine A.M. nonstop flights.  
User: I want to go at four P.M.  
Machine: Flight number one six leaves New York at four fifty P.M. arrives in Denver at seven P.M.  
User: What stops are there on the flight?  
Machine: This flight makes no stops.  
User: Is a meal served on the flight?  
Machine: Dinner is served.  
User: How much is the fare?  
Machine: The round-trip first-class is three hundred sixty dollars.  
User: What plane is on the flight?  
Machine: The aircraft is a Douglas DC ten.  
User: I prefer the Boeing seven four seven.  
Machine: The aircraft is a Douglas DC ten.  
User: Please repeat the departure time.  
Machine: The departure time is four fifty P.M.  
User: I will take flight number six five.  
Machine: I am sorry there is no flight six five to Denver.  
User: Please repeat the flight number.  
Machine: The flight number is one six.  
User: I want flight one six.  
Machine: Your reservation of flight number one six to Denver on Saturday is confirmed. Thank you.

Таблица 3.2

## Словарь системы AIRLINE

---

A	A.M.	AFTERNOON
AMERICAN	APRIL	ARE
AREA	ARRIVAL	ARRIVE
AT	AUGUST	B.A.C.
BOEING	BOSTON	BY
CARD	CASH	CHARGE
CHICAGO	CLASS	CLUB
COACH	CODE	CREDIT
D.C.	DECEMBER	DENVER
DEPART	DEPARTURE	DETROIT
DINERS	DO	DOES
DOUGLAS	EIGHT	ELEVEN
EVENING	EXPRESS	FARE
FEBRUARY	FIRST	FIVE
FLICHT	FLIGHTS	FOR
FOUR	FRIDAY	FROM
GO	HOME	HOW
I	IN	INFORMATION
IS	JANUARY	JULE
JUNE	LEAVE	LIKE
LOCKHEED	LOS-ANGELES	MAKE
MANY	MARCH	MASTER
MAY	MEAL	MIAMI
MONDAY	MORNING	MUCH
MY	NEED	NEW-YORK
NIGHT	NINE	NON-STOP
NOVEMBER	NUMBER	O'CLOCK
OCTOBER	OF	OFFICE
OH	ON	ONE
P.M.	PAY	PHILADELPHIA
PHONE	PLANE	PLEASE
PREFER	REPEAT	RESERVATION
RETURN	SATURDAY	SEAT
SEATS	SEATTLE	SEPTEMBER
SERVED	SEVEN	SIX
SOME	STOPS	SUNDAY
TAKE	TEN	THE
THEE	THERE	THREE
THURSDAY	TIME	TIMES
TO	TUESDAY	TWELVE
TWO	UH	WANT
WASHINGTON	WEDNESDAY	WHAT
WHEN	WILL	WOULD

---

AIRLINE компании Белл Систем, предназначенную для получения по телефону информации о полетах и развертывания авиабилетов [97, 108]. Пример разговора по телефону между человеком и ЭВМ приведен в табл. 3.1. Записав каждую фразу пользователя, ЭВМ подсчитывает число слов, которое нужно распознать, и делит всю фразу на "кадры" длительностью 15 мс. Кадры, приходящиеся на каждое данное слово, охватывают и часть кратких пауз между предшествующим и данным словами и между данным и следующим словами. Возможные кандидаты из полного списка образов слов, хранящихся в памяти ЭВМ, наиболее близкие к очередному слову из фразы пользователя, находятся путем сравнения этого слова со всеми образами слов в памяти. Далее выбираются только те кандидаты, которые грамматически возможны в данном месте фразы.

Таким образом, распознавание фразы в данной системе сводится к распознаванию отдельных слов и к отбору возможных кандидатов с помощью наложения довольно строгих ограничений сопоставлением с заданной грамматикой, которая сама определяется списком из 128 слов, заложенных в память ЭВМ, и несколькими схемами построения стандартных фраз, в которые, однако, могут входить все эти 128 слов в различных сочетаниях.

Список слов приведен в табл. 3.2, а часть диаграммы переходов между состояниями — на рис. 3.9.

Принципиальная трудность, встречающаяся при выполнении первого этапа распознавания фразы пользователя в системе такого типа — на этапе распознавания слова, — состоит в том, что применяемые при моделировании методы физического анализа звукового сигнала, соответствующего отдельному слову, по-видимому, не адекватны процессам, используемым мозгом при анализе речи. При моделировании часто используются спектрограммы слов — развертки во времени спектральной плотности мощности звукового сигнала, соответствующего слову (рис. 3.10). Оказывается, однако, что человеческая речь настолько изменчива, что такие спектрограммы не являются однозначными характеристиками слов: спектрограммы различных по смыслу, но акустически близких слов могут оказаться более близкими друг к другу, чем спектрограммы одного и того же слова, произнесенного при различных условиях различными лицами.

В этом отношении автоматические системы распознавания слов намного уступают человеку. Даже в наиболее мощных искусственных системах распознавания отдельных слов число ошибок быстро возрастает, если словарь увеличивается примерно до нескольких сотен слов. Ошибок становится еще больше, если слова произносятся неизвестными лицами (т.е. теми, чья речь не занесена в память машины). В то же время в экспериментах по

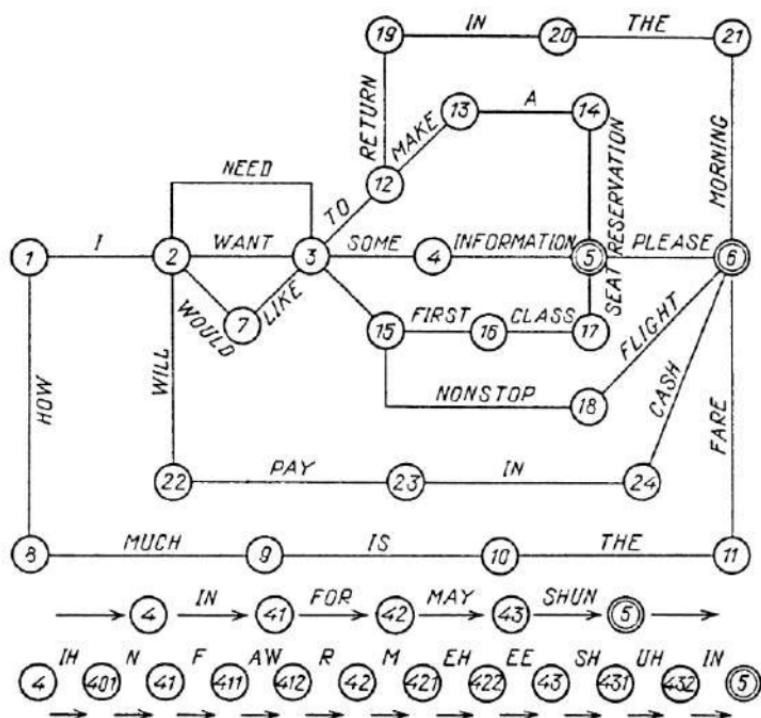


Рис. 3.9. Часть диаграммы состояний грамматики системы AIRLINE

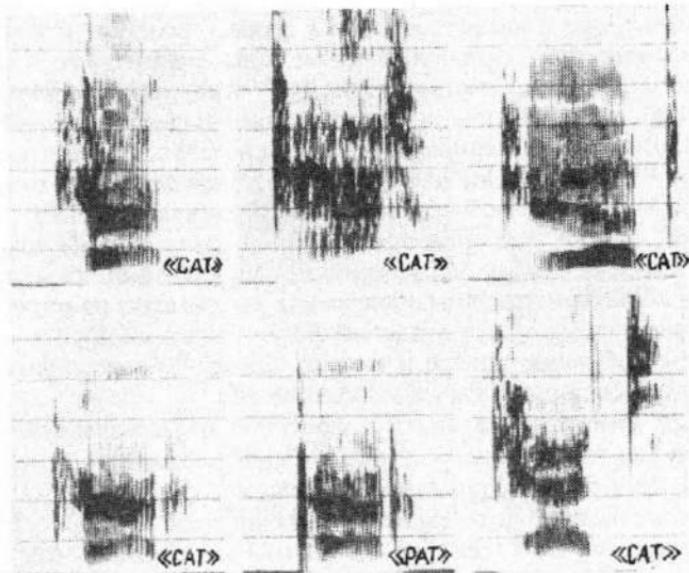


Рис. 3.10. Примеры спектрограммы речи человека

распознаванию слов человеком при объеме словаря в 26 тысяч слов, произнесенных лицами, не известными слушателю, слова идентифицировались с погрешностью меньше 3%. Способность человека к распознаванию слов удивительно устойчива относительно шумового фона; существующие искусственные системы распознавания и в этом отношении уступают человеку.

Различия в распознавании слитной речи человеком и ЭВМ становятся еще более очевидными. Люди обычно легче распознают слово в контексте, а для автоматической системы распознавание слитной речи оказывается задачей, гораздо более трудной, чем распознавание отдельных слов. В слитной речи отсутствуют явные границы между отдельными словами, и сравнение слова-стимула с образом памяти становится затруднительным.

Трудность с большим числом слов в языке пытаются обойти следующим образом. В английском языке, например, около 300 тысяч слов. Если же подсчитать число всевозможных слогов в английском языке, их окажется на порядок меньше — около 20 тысяч. В то же время в английском языке лишь 40 фонем. Однако если представить фразу как последовательность фонем, то при этом увеличивается число независимых элементов в каждой фразе — теперь это фонемы, а не слова или слоги, и, если вероятность распознавания каждого из этих элементов сколько-нибудь заметно отличается от единицы, вероятность одновременного правильного распознавания всей фразы экспоненциально падает с ростом в ней числа этих независимых элементов.

Одним из способов устранения этого нежелательного эффекта является введение ограничений на допустимые комбинации фонем, слогов или слов в фразе. В случае, когда составляющими элементами фразы являются слова, такие ограничения налагаются грамматикой, определяющей лингвистически допустимые последовательности слов в фразе. Простой способ применения грамматических структур состоит в использовании так называемой диаграммы состояний. Диаграмма состояний определяет все возможные фразы, которые может распознать машина. Каждый путь на диаграмме состояний от начальной точки к конечной представляет собой допустимую фразу. Производя распознавание слова, ЭВМ устанавливает вероятность каждого перехода на диаграмме. Вероятность каждого пути равна произведению вероятностей всех переходов, определяющих данный путь. Выбирается фраза, для которой вероятность пути наибольшая. При таком способе ошибки в распознавании фраз резко уменьшаются: система может выбрать слово с относительно низкой вероятностью в данном положении, с тем чтобы увеличить вероятность правильного выбора всей фразы.

Применение диаграммы состояний резко увеличивает эффективность распознавания слитной речи. Вместо сравнения каждого слова-стимула с каждым образом слова в памяти в этом случае стимул сравнивается лишь с теми словами-образами памяти, которые удовлетворяют требованиям, налагаемым диаграммой состояний. В каждом данном месте фразы сравнение производится лишь с ограниченной, небольшой частью словаря. Система, в которой используется распознавание с учетом ограничений, налагаемых синтаксисом, позволяет правильно находить фразы из более чем двадцати слов при словарном запасе чем 100 слов.

Примеры разбиения части фразы на отдельные элементы (сегментация) показаны на рис. 3.11. Чередование гласных и согласных в первой фразе "THE SPACE NEARBY" (рис. 3.11a) выявляет возможность довольно четкого разделения на различные характерные элементы. Что же касается второй фразы "THE AREA

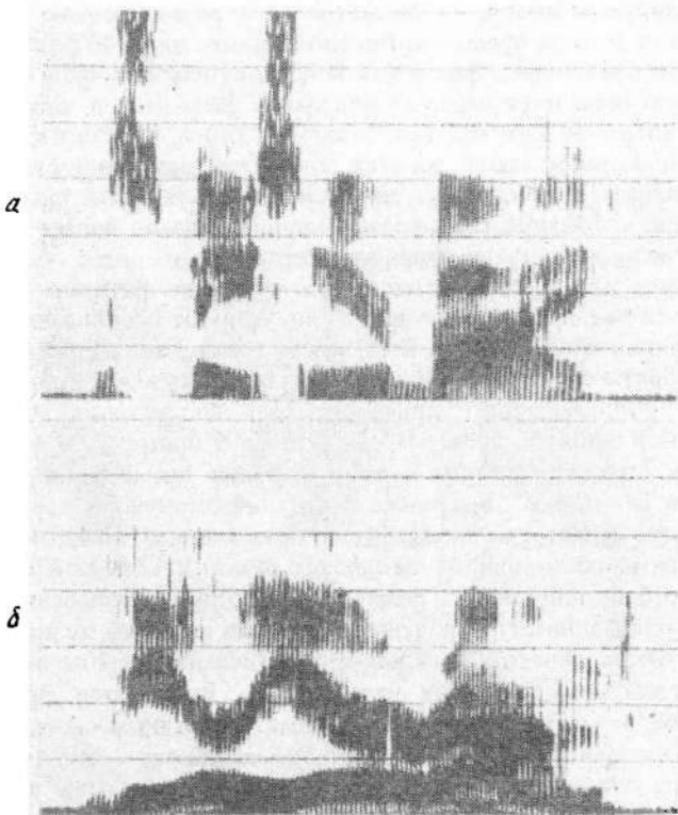


Рис. 3.11. Примеры сегментации речи

"AROUND" (рис. 3.11б), то здесь плавная последовательность смещающихся гласных затрудняет сегментацию.

Относительно надежная работа системы AIRLINE (скорость — около 210 слов в минуту, правильное распознавание фразы — примерно в 75% случаев в испытаниях с шестью лицами, каждый из которых произносил один и тот же набор тестовых фраз — 51 фразу) определяется, таким образом, ограниченным объемом словаря ЭВМ.

Ответ пользователю в системе AIRLINE предполагает "понимание" системой вопроса. Для решения этой задачи в системе используется так называемый семантический процессор, включающий "модель мира" (состояние которой меняется в процессе диалога между человеком и машиной) и модуль неизменной памяти. Модель мира содержит ряд понятий, каждое из которых может принимать различные значения. Среди этих понятий — "место назначения", "день вылета", "время вылета". В процессе конкретной беседы с человеком этим категориям могут быть присвоены значения "Бостон", "вторник", "17.00" или "Чикаго", "неизвестно", "неизвестно" и т.д. Семантический процессор определяет новое состояние, исходя из текущего состояния, из слов в фразе пользователя и из тех переходов в диаграмме состояний, которые были использованы при построении данной фразы.

## § 9. Осязание

**1. Тактильные системы животных.** Осязание (тактильная рецепция) широко распространено в мире живых организмов. Так, движущаяся в воде бактерия *Spirillum* при столкновении с препятствием меняет направление своего движения на обратное. Механорецепторные структуры, дающие сигнал о препятствии и вызывающие этим волну перестроек молекулярных структур в бактериальной клетке, локализованы в наружной стенке бактерии и распределены по ее поверхности относительно равномерно.

У простейших реакции на механические стимулы значительно более дифференцированы. У инфузорий слабое тактильное раздражение вызывает местную реакцию изменения направления биения ресничек на противоположное (около 2500 ресничек — тонких волосков, расположенных на поверхности инфузории, своим координированным ритмическим биением приводят клетку в движение; это биение происходит так, что инфузория одновременно с поступательным движением вращается вокруг своей длинной оси; биение ресничек хорошо координировано, так что инфузория может плыть назад и поворачиваться). Эта реакция быстро затухает при повторном раздражении. При большой интен-

сивности тактильного раздражения возникает направленная реакция избегания стимула, которая уже не затухает при повторном раздражении. При этом реакцию избегания можно вызвать раздражением любой части тела инфузории, и характер этой реакции зависит от места действия стимула и силы раздражения.

Некоторые амебы при непосредственном контакте захватывают движущуюся добычу и не реагируют на неподвижную

При механической стимуляции поверхности простейших в некоторой точке во все стороны от нее распространяется затухающая волна увеличения или уменьшения мембранный разности потенциалов. При достижении определенной амплитуды такой плавный отклик на механическое воздействие переходит в волну типа спайка, распространяющуюся по мембране без затухания и вызывающую изменение направления биения ресничек (у инфузории-туфельки) или сокращение тела (у простейшего *Stentor*). Считается, что первичные механорецепторные процессы приводят к высвобождению связанных ионов  $\text{Ca}^{++}$ , и в результате активируется сократительная система организма — комплексы актомиозиновых органелл. На примере простейшего *Tetrahymena* показано, что в явлениях раздражимости этих организмов важную роль играет нейромедиатор ацетилхолин и фибриллярная сеть, соединяющая основания ресничек, — по-видимому, это "квазинервная" система, проводящая спайковые импульсы.

В § 6 предыдущей главы мы уже говорили о специализированной тактильной системе насекомых — церкальной системе. Рассмотрим теперь более подробно другую специализированную тактильную систему насекомых — тактильную систему песчаного скорпиона, предназначенную для нахождения местоположения жертвы при егоочной охоте в пустыне [3].

Как только подходящая добыча (бабочка, роющий таракан, более мелкий скорпион) оказывается на расстоянии ближе 30 см от скорпиона, он приподнимается, вытягивает вперед и раздвигает клешни и замирает в ожидании сигнала — слабого сотрясения песка, вызываемого движением жертвы. Получив этот сигнал, скорпион быстро поворачивается с вытянутыми клешнями в направлении на добычу, передвигается ближе к ней на несколько сантиметров и вновь замирает, ожидая, когда жертва сделает следующее движение. Охота обычно включает от одного до пяти таких передвижений, продолжается несколько секунд и обычно заканчивается тем, что скорпион хватает жертву клешнями и парализует ядом, выделяющимся из жала на его хвосте.

Эксперименты показали, что скорпион определяет направление на жертву и расстояние до нее, используя информацию о волнах механических смещений в песке, возбуждаемых движущейся по

песку жертвой и принимаемых специальной тактильной системой скорпиона. В песке могут распространяться объемные волны сжатия (звук) и так называемые рэлеевские (поверхностные) волны. В волнах сжатия частицы песка колеблются вперед и назад по направлению распространения волны, а в рэлеевских волнах частицы движутся по эллипсу, большая полуось которого перпендикулярна поверхности песка, а малая параллельна направлению распространения волны. Смещения частиц песка в волнах этих двух типов воспринимаются двумя различными сенсорными системами на лапках скорпиона: так называемые тарзальные волоски на самой лапке касаются поверхности песка и воспринимают горизонтальное движение его частиц в волнах сжатия, а щелевидные сенсиллы (складки на хитиновой оболочке следующего сустава лапки), расположенные горизонтально, очень чувствительны к вертикальным перемещениям частиц песка в рэлеевских волнах.

И в звуковых, и в рэлеевских волнах частота колебаний равна скорости волны, деленной на длину волны. Эксперименты показали, что скорость звука (волн сжатия) в рыхлом песке (ближе к поверхности) составляет 120 м/с, в плотном — примерно 200 м/с. Скорость рэлеевских волн оказалась равной 40 — 50 м/с. И длинные, и короткие волны обоих типов сильно затухают и практически не распространяются в песке — длинные потому, что в них велики потери на трение из-за скольжения песчинок относительно друг друга, короткие — из-за отражения и рассеяния волн отдельными песчинками. Практически в песке распространяются только в интервале частот 0,1 — 5 кГц; они также сильно затухают при распространении, но амплитуда волн, возбуждаемых в песке жертвой, находящейся на расстоянии в несколько дециметров от скорпиона, еще достаточно велика, чтобы его mechanoreцепторы вызвали нервные импульсы в нейронной системе. При указанных скоростях распространения звуковой и рэлеевской волн частотам порядка нескольких килогерц соответствуют длины волн порядка нескольких сантиметров — это как раз такие расстояния, на которые разнесены mechanoreцепторы на разных ногах скорпиона и в то же время такие расстояния, на которых происходит заметное затухание волн, распространяющихся по песку.

Если посадить скорпиона на помост, разделенный посередине щелью, так, чтобы его правые и левые ноги можно было стимулировать колебаниями помоста независимо, то оказывается, что скорпион всегда поворачивается в сторону ног, первыми получившими импульс, даже если колебания помоста под ногами с другой стороны и сильнее. Таким образом, "бинауральная" тактильная реакция скорпиона, позволяющая ему определить направление

на жертву, основана не на сравнении интенсивностей сигнала о колебаниях почвы, полученных разными ногами, а на "вычислении" времени между моментами прихода сигнала к правым и левым ногам. Скорпион может улавливать, как показали опыты, разницу времени прихода сигнала вплоть до 200 мкс, но наиболее четко его реакция выражена при значении этой разницы, равном 1 – 2 мкс, которое соответствует времени прохода рэлеевской волны между правыми и левыми ногами.

То обстоятельство, что поворот скорпиона в сторону жертвы определяется именно сигналом от рэлеевской, а не от звуковой волны, было выяснено с помощью записи осцилограмм потенциалов, возникавших при колебаниях почвы на тонких проволочных зондах, введенных в лапки скорпиона: более ранний сигнал (от звуковых волн) был больше, более поздний (от рэлеевских волн) – меньше. Раздельное стимулирование рецепторов экспериментатором показало, что большие сигналы получаются, если раздражать тарзальные волоски; меньшие – если раздражать щелевидные сенсилизы. Таким образом, волоски реагируют на звуковые волны, а сенсилизы – на рэлеевские. Высказывается предположение [3], что та информация, которую несут волны сжатия (звук) и которая, по-видимому, не нужна для нахождения направления на жертву, используется скорпионом для определения расстояния до добычи. В частности, можно предположить, что скорпион "регистрирует" разницу во времени стимуляции волосков и сенсилизов: это время, помноженное на разность скоростей звуковой и рэлеевской волн, равно расстоянию до жертвы. Возможно также, что в нервной системе скорпиона анализируется разность амплитуд звуковых волн, пришедших к разным ногам, – для трехмерных звуковых волн эта разность будет больше, чем для двумерных рэлеевских (при слабом затухании волн амплитуда трехмерной волны падает с увеличением расстояния до источника  $R$  как  $1/R$ , а амплитуда двумерной – как  $1/\sqrt{R}$ , т.е. в первом случае разность сигналов, получаемых "ближними" и "дальными" ногами, будет больше).

Наиболее интересной, однако, представляется отмеченная в [3] смена "сценария" поведения скорпиона, наблюдаемая при охоте на роющего таракана. Когда таракан роет ход (под самой поверхностью песка) не более чем в полуметре от вышедшего на охоту скорпиона, последний совершает ряд обычных движений (ориентировка, передвижение, выжидание), приближаясь к месту, где в песке скрыт таракан, пока не окажется над жертвой. После этого скорпион начинает вести себя так, как будто преследует добычу – он совершает типичные для этого повороты и прыжки. Но через несколько секунд его поведение опять меняется – при-

подняв хвостовую часть тела, скорпион несколько раз ударяет клешнями по песку, пока не коснется таракана и не схватит его. Наконец скорпион выкапывает добычу (совершая те же движения, которые он совершает, когда днем зарывается в песок от жары).

Очевидно, в памяти скорпиона имеется целый ряд образов внешнего мира, правильное распознавание которых запускает нейронные системы, обеспечивающие выполнение целого ряда стереотипных действий и смену одного поведенческого "сценария" другим.

Отметим, что основной рецепторной системой, от которой это животное получает информацию и с которой связаны образы в его памяти, является не зрительная, слуховая или обонятельная, а лишь тактильная система.

Еще более сложной оказывается ситуация с одной из важных сенсорных систем насекомых — тактильной церкальной системой. В зависимости от физиологического состояния насекомого и внешнего окружения его реакции на одно и то же раздражение церкальной системы могут быть совершено различными — от реакции убегания до элементов брачного поведения (см. § 3, п. 2). Волосковые рецепторы этой системы возбуждаются и при движении насекомого, и при его чистке; в это время реакция убегания подавлена. Таким образом, в нервной системе насекомых происходит сложная обработка сигналов этой тактильной системы и ей, по-видимому, также соответствует сложная система образов и категорий внешнего мира.

2. Осязание у человека. Осязание у людей так же богато эмоционально окрашено, как зрение или слух, и оно существенно расширяет наше представление об окружающем мире, дополняя наши зрительные и слуховые впечатления. Но есть, к сожалению, случай, когда осязание остается практически единственным источником сведений о внешнем мире — у людей, рожденных слепоглухонемыми.

"При обслуживании слепоглухонемого взрослым ребенок постепенно начинает помогать взрослому: когда взрослый его одевает или раздевает, ребенок, например, поднимает ножку при одевании чулка, поднимает руки, когда с него снимают рубашку, и т.д.

... При обучении навыкам самообслуживания возникает как бы первое разделение труда — взрослый начинает какое-то действие, а ребенок его продолжает, взрослый надевает чулки на ступню, а ребенок натягивает их дальше. ... Вот эти начальные движения взрослого при обслуживании ребенка и являются первыми сигналами, побуждающими ребенка к активному действию. Это и есть первый "язык"... В деятельности по удовлетворению своих естеств

венных потребностей ребенок пользуется большим количеством предметов. Овладевая ими, он их познает, ощупывает. Первые жесты и являются изображением действий с этими предметами или повторением предметных действий в отсутствие самих предметов.

... Жест связан с образом предмета... Наряду с жестикуляторной речью огромное значение для ребенка имеет лепка. Слепоглухонемой ребенок обучается лепить из пластилина познанные им предметы окружающего мира. В лепке он может широко и подробно "рассказать" о своем внутреннем мире, об образах предметов, об их назначении и функциях. Благодаря лепке мы судим об адекватности образов, имеющихся у ребенка, окружающим его предметам.

... Следующий важнейший этап развития деятельности общения — развитие у слепоглухонемого ребенка словесной речи. Словесная речь формируется в дактильной (пальцевой) форме... Осуществляется этот период к словесной речи таким путем. Жесты, обозначающие хорошо знакомые и часто встречающиеся в быту предметы, заменяются дактильными словами. Для ребенка эти новые обозначения являются все теми же жестами, только новой, необычной конфигурации. Жестом ему показывают, что данный предмет можно обозначать по-другому. В дальнейшем ребенок обозначает предмет показанным ему новым жестом, даже не подозревая, что он уже владеет составленным из букв словом ... Смысловым контекстом первых слов является жестовая фраза...

Лишь после усвоения нескольких десятков слов, обозначающих конкретные предметы, ребенку даются отдельные дактильные буквы, которыми практически он уже владеет... После усвоения дактильного алфавита ребенку можно дать любое слово, соотнеся его с соответствующими жестами и предметами...

В процессе усвоения дактильного алфавита учащийся обучается как воспроизводить каждую пальцевую конфигурацию, так и свободно "считывать" ее с руки учителя.

После усвоения дактильного алфавита ребенкудается рельефно-точечное (брайлевское) обозначение букв. Для совершенствования... подбирается специальный словарь в два — три десятка слов, обозначающих хорошо известные ребенку предметы и действия с ними. Этот же словарь в дальнейшем используется для усвоения самого важного в словесном языке — грамматического строя.

"Обучение грамматическому строю речи начинается не с заучивания отдельных слов, словосочетаний и предложений, а с составления текста и составления системы текстов" [50].

... Ребенок, обученный по обрисованной методике, уверенно перешагивает барьер, поставленный для него слепоглухонемотой.

... Он обретает доступ ко всем сферам человеческого познания, эстетики и нравственности" [35].

Расширение знаний о внешнем мире, кроме непосредственно опыта, у слепоглухонемых, как и у зрячих, слышащих людей, во многом связано с чтением, сопровождающимся объяснениями учителей и беседами (с помощью дактильного языка) с другими людьми. "Спасение слепого, глухонемого и особенно слепоглухонемого — в чтении", — это слова необычного человека — О.И. Скородовой. В детстве после менингита она потеряла зрение и слух, но затем нашла в себе силы учиться и работать, стала кандидатом педагогических наук, автором многих статей, трех книг и оптимистических, жизнеутверждающих стихов.

Что касается людей, имеющих нормальное зрение и слух, то у них тактильные образы предметов и явлений внешнего мира сочетаются со зрительными и слуховыми образами, и осязанию, так же, как и зрению и слуху, присуще свойство распознавать эти явления и предметы, относя их к отдельным категориям, и свойство обучаться новым категориям при предъявлении ранее неизвестных стимулов.

**3. Моделирование осязания.** С помощью осязания человек получает представление о форме объекта, о некоторых свойствах его поверхности и о его положении в пространстве; в современных контактных сенсорных системах, используемых в промышленных роботах, предпринимаются попытки получить аналогичную информацию об объектах. Первичная информация, получаемая в таких системах, представляет собой набор значений сил, действующих на "руку" робота или на отдельные точки этой механической руки при известных положениях руки и этих выделенных точек; пространственное разрешение достигает 256 точек на квадратный сантиметр поверхности [71].

В качестве примера рассмотрим робота, предназначенного для стрижки овец [71]. Здесь как основа для траектории движения ножниц вдоль тела овцы при стрижке используется некоторая осредненная модель формы тела овцы. Эта исходная траектория по мере продвижения механических ножниц исправляется в соответствии с показаниями двух емкостных датчиков, установленных под ножницами, рядом с гребнем, причесывающим шерсть овец. Датчики определяют расстояние между ножницами и кожей овцы в пределах от 0 до 30 мм. Исправление стандартной траектории необходимо для учета оглонений формы тела овцы от стандартной и для учета изменений формы тела овцы при ее дыхании. Система дает возможность почти полностью избежать порезов овцы при стрижке, число порезов гораздо меньше, чем у профессионального стригала.

## § 10. Моторика

**1. Движения руки.** С помощью рук человек выполняет большую часть повседневной работы. Движения и более точные движения пальцев управляются мотонейронами спинного мозга, которые, в свою очередь, получают сигнал от так называемых клеток Беца – крупных нейронов моторной коры головного мозга.

Вблизи от моторной коры находится соматосенсорная кора (см. рис. 3.1). Зоны моторной коры и соматосенсорной коры, соответствующие передаче сигналов от мозга к руке и приему сигналов от руки мозгом, у человека очень велики и расположены близко друг от друга. При движении кисти руки мышечные proprioцепторы (так в начале нашего столетия английский физиолог Шерингтон назвал рецепторы, реагирующие на растяжение и удлинение мышц) посыпают нервные импульсы в соматосенсорную кору, передавая информацию о положении руки и пальцев.

В работе [62] описаны опыты с обезьянами, которых обучали точно передвигать рукоятку прибора, соединенного с панелью, регистрирующей световые сигналы о перемещении рукоятки. Поворотом рукоятки обезьяна могла перемещать зажженную экспериментатором лампу вправо или влево по панели и получала вознаграждение, когда подводила эту лампу к середине панели. Микроэлектрод, вживленный в область моторной коры обезьяны, связанную с точными манипуляциями, регистрировал активность нервных клеток моторной коры, участвующих в создании этих движений. Даже незначительное движение сопровождалось резким усилением активности моторной коры; при этом доля активных клеток моторной коры намного превышала долю возбужденных клеток в спинном мозге. Но, кроме того, было отмечено еще одно обстоятельство: в зону моторной коры, ответственную за точные движения кисти, поступали сигналы из соответствующего участка соматосенсорной коры, соединенной с моторной корой множеством связей. Таким образом, выходные сигналы моторной коры непрерывно регулировались соматосенсорной корой с помощью петли отрицательной обратной связи: моторная кора – proprioцепторы мышц кисти – соматосенсорная кора.

Иначе говоря, действительное положение кисти (информация о котором передавалась proprioцепторами в соматосенсорную кору) должно было совпадать с тем "образом положения кисти", который соответствовал цели – зажечь лампочку в середине панели и получить вознаграждение.

По-видимому, и в общем случае при целенаправленном движении руки (а также и при других целенаправленных движениях, например в различных видах спорта) в нашем сознании формируется

руется образ того конечного положения, которое должна принять рука для выполнения той цели, ради которой совершается движение. После того как такой образ в памяти (в результате удачных попыток) сформирован, движение начинается, и проприоцепторы руки "предъявляют" соматосенсорной коре стимул — картину истинного положения руки в данный момент движения. Отличие этого стимула от сформированного образа необходимого конечного положения руки может служить "силой", вызывающей продолжение движения. По мере приближения руки к нужному конечному положению различие между стимулом и образом памяти уменьшается, уменьшается и "сила", вызывающая дальнейшее продвижение руки, и в результате рука занимает нужное для выполнения цели положение. Как писал Джеймс, "меткий стрелок в конце концов думает только о точном положении цели, ... эквилибрист — только о конце шеста, кобенаниям которого он должен противодействовать" [15].

С приобретением опыта, в результате длительной тренировки "образы" многих положений руки и целые "сценарии", состоящие из отдельных кадров — образов, настолько хорошо запоминаются нами, что мы можем мысленно воспроизвести эти положения и движения (как последовательности положений), которые в этом случае на практике мы совершаем уже автоматически, "бессознательно", — пишем слова письма, режем хлеб и чистим картофель, плаваем и катаемся на велосипеде.

**2. Механическая рука.** Кинематика руки робота — наиболее разработанная к настоящему времени область робототехники [71].

Одна из подробно изученных чисто технических задач в этой области — это переход от декартовой системы координат, в которой удобно формулировать саму задачу для механической руки робота, "пространству соединений" (суставов механической руки), более естественному при конструировании руки и расчете необходимых положений, скоростей, ускорений, вращательных моментов и сил (создаваемых силовыми устройствами).

Что касается задач управления, то они оказываются различными для различных типов движений руки робота: свободных грубых движений в свободном пространстве; "осторожных" движений при приближении к поверхности; движений вдоль поверхности с изменяющимся рельефом.

Для простых концевых эффекторов механической руки (захваты — "челюсти", присоски, лопатки для размешивания, "стержневые" захваты, крюк) алгоритмы работы оказываются относительно простыми. Однако многие практические задачи (сборка деталей, соединение, завинчивание, фиксация) требуют некоторого

набора концевых эффекторов, так что возникает необходимость их быстрой смены на механической руке.

Трехпалые механические руки могут завинчивать болты или навинчивать гайки, схватывать полоски произвольной формы, создавать произвольную векторную силу на рабочем участке робота; сконструирована четырехпалья искусственная рука с запястьем.

Для роботов с двумя руками возникает задача об их координированном действии, например когда одна рука подает деталь, а другая производит необходимые операции; решена задача и о предотвращении столкновения двух рук — если грозит столкновение, одна из рук становится "главной" и продолжает движение, а другая меняет траекторию, чтобы избежать столкновения.

Во всех рассмотренных случаях "картина мира", образы нужных конечных положений руки, сценарий необходимых движений заранее закладываются в память ЭВМ, управляющей роботом.

3. Речь. Уже более ста лет известно, что по крайней мере две четко ограниченные области мозга человека ответственны за устную речь. В 1861 г. французский хирург и антрополог Брок<sup>а</sup> сообщил о больном, который "... полностью сохранил интеллект и утратил только речь". У этого больного оказался пораженным участок коры головного мозга в средней части лобной доли левого полушария; этот участок сейчас называют зоной Бро́ка (см. рис. 3.1). Бро́ка сделал и другое важное открытие: он показал, что в то время как повреждение этого участка ведет к расстройству речи, или афазии, при повреждении такого же участка в правом полушарии речь не страдает: 95% афазий, связанных с повреждением мозга, возникают в результате поражения именно левого полушария.

Зона Бро́ка граничит с той частью моторной коры мозга, которая управляет движениями лица, языка, челюстей и глотки. Когда при инсульте повреждается зона Бро́ка, почти всегда наблюдается и повреждение лицевой зоны левого полушария, и можно было бы предположить, что расстройство речи связано с частичным параличом мышц, обеспечивающих произнесение слов. Это, однако, не так: больные с афазией Бро́ка нередко прекрасно и легко поют, но речь их нарушена, и притом грамматически.

В 1974 г. Вернике описал другой вид афазии, который оказался связанным с областью коры головного мозга, находящейся также в левом полушарии, но не в лобной, а в височной ее доле. Эта область, которую в наше время называют зоной Вернике, лежит между первично слуховой корой и структурой коры, называемой угловой извилиной; эта структура, по-видимому, соединяет слуховой и зрительный центры коры. Позже было установ-

лено, что зоны Брука и Вернике соединяются между собой группой нервных волокон — так называемым дугообразным пучком.

Расстройства речи при поражении зоны Брука и зоны Вернике совершенно различны. При афазии Брука речь становится затрудненной и медленной, грамматический строй нарушен, речь приобретает "телефрафный стиль", но ответ на вопрос часто имеет смысл. При афазии Вернике речь фонетически и грамматически правильна, но слова часто оказываются неподходящими.

Анализируя эти дефекты, Вернике предложил следующую схему: основная структура высказывания создается в зоне Вернике, затем она по дугообразному пучку передается в зону Брука, где включает программу вокализации; эта программа передается в соседнюю зону лицевой моторной коры, активирующей мышцы звукового тракта. Результатом ошибок в "распознавании" высказывания (сформированного в зоне Вернике) системой нейронов из зоны Брука, по-видимому, являются некоторые из оговорок [38].

В системах синтеза речи, как правило, используются два подхода. В первом подходе кодируются и записываются в память ЭВМ слова, произнесенные человеком (требуется по меньшей мере два варианта одного слова — слово в конце фразы и это же слово в любом другом месте фразы), которые затем связываются в нужную последовательность, декодируются и воспроизводятся. Во втором подходе кодируются и записываются в память машины части слова (фонемы, пары фонем, более крупные фрагменты слова, например морфемы — приставка, корень, суффикс, окончание), которые комбинируются в необходимые сочетания и обеспечивают синтез речи при неограниченном слове [74].

## § 11. Взаимодействие сенсорной и моторной систем

**1. Афазия.** Взаимодействие сенсорной и моторной систем человека представляет особый интерес потому, что даже в тех случаях, когда между получением стимула по какому-либо из сенсорных каналов и моторным ответом и не включается процесс мышления, — даже и тогда сам процесс взаимодействия сенсорной и моторной систем содержит элементы мышления. В отличие от простого распознавания образов либо зрительной, либо слуховой, либо тактильной памяти здесь происходит сопоставление образов внешнего мира, запечатленных ранее в памяти при получении информации по этим различным сенсорным каналам.

Такое явление сопоставления образов зрительной, слуховой, тактильной и других видов памяти и представляет собой, по-видимому, "осознание" того явления или объекта внешнего мира,

информация о котором поступает по какому-либо одному каналу или одновременно по нескольким каналам.

Если, например, мы видим яблоко и осознаем это, то мы можем представить его вкус, запах, ощущение от прикосновения к нему, мы произносим про себя слово "яблоко" и представляем это слово написанным.

При этом зрительный образ памяти сопоставляется с вкусовым, обонятельным образами (полученными нами в свое время по этим сенсорным каналам) и с образами моторной памяти (произнесенное и написанное слова).

Явление осознания, являющееся необходимым элементом мышления, входит обязательно и в простейшие процессы взаимодействия сенсорной и моторной систем. Читаем ли мы книгу (вслух или про себя), пишем ли под диктовку письмо, объясняем ли ребенку, что изображено на картине, — во всех этих случаях наша первая система производит сопоставление образов памяти, записанных в различных нейронных ансамблях сенсорных и моторных систем.

Мы рассмотрим пример такого взаимодействия сенсорных и моторных систем, не обсуждая тех случаев, когда это взаимодействие происходит на чисто автоматическом, рефлекторном уровне, когда мы говорим: "непроизвольно вскрикнул", "бесознательно отдернул руку" и т.п.

Зона Вернике (см. предыдущий параграф) не только принимает участие в речеобразовании (передавая сформированную в ней структуру высказывания для правильного грамматического и интонационного оформления в зону Брука и для исполнения — в моторную лицевую кору), но также участвует в понимании произносимых слов устной речи, в чтении и письме. При восприятии устной речи звуковая информация после обработки во внутреннем ухе попадает в первичную звуковую кору, однако для понимания слова необходима дальнейшая обработка сигнала зоной Вернике. При чтении зрительный образ из первичной зрительной коры передается в угловую извилину, после обработки сигнала в которой он попадает в зону Вернике и вызывает появление словесного образа прочитанного "слова-иероглифа". Для написания услышанного слова нужно, чтобы сигнал от слуховой коры прошел к зоне Вернике и к угловой извилине; после обработки сигнала в этих зонах включается моторная кора, дающая сигналы о выполнении соответствующих команд мышцам руки.

В действительности взаимодействие различных зон мозга при всех этих актах, по-видимому, еще более полное: так, произнесенное собеседником слово может вызвать у нас зрительный образ этого слова ("картинку" или "иероглиф"); зрительные образы

возникают и при чтении; многие люди, читая, произносят про себя все или некоторые из прочитанных слов; внутренней речью и зрительными образами может сопровождаться написание письма.

Такая модель взаимодействующих зон, ответственных за выполнение различных задач, объясняет многие симптомы афазий — различных дефектов речи, возникающих, в частности, после инсульта — повреждения кровеносных сосудов головного мозга, часто имеющего локальный характер и приводящего в этом случае к недостаточному кровоснабжению и ухудшению работы какой-то из перечисленных зон. Нарушения в зоне Брука расстраивают речь больного, но меньше влияют на понимание. Наоборот, повреждение зоны Вернике приводит к разрушению возможности использования языка во всех аспектах. Если поврежден дугообразный пучок, соединяющий зоны Вернике и Брука (в результате чего они оказываются разъединенными), то речь остается плавной и хорошо артикулированной, но смысл ее искажается — зона Брука работает, но не получает информации из зоны Вернике; в то же время, поскольку сама зона Вернике не повреждена и тоже работает нормально, понимание слов устной и письменной речи оказывается почти нормальным.

Письмо нарушается при всех афазиях, при которых нарушается речь.

Повреждение угловой извилины разъединяет системы, принимающие участие в устной и в письменной речи. Больные с нарушениями в некоторых участках угловой извилины могут нормально говорить и понимать устную речь, но испытывают затруднения с письменной речью. Повреждения угловой извилины, по-видимому, прерывают связь между зрительной корой и зоной Вернике, и в результате понимание письменной речи страдает.

Ряд исследований больных показал, что возможно поражение отдельных когнитивных (познавательных) функций мозга: слуховой словесной рабочей памяти, системы обработки фонем, системы "перевода" графем в фонемы, системы смысловой обработки; некоторые больные значительно лучше узнавали неживые предметы, чем живые объекты или продукты питания.

В одном случае [82] трудности у больного возникали только тогда, когда дело касалось любой из двух близких категорий слов: овощи и фрукты. Больной не мог, например, назвать показанные ему персик и апельсин, морковь и капусту, не вспоминал он их названия также ни после ощупывания, и после перечисления ему признаков этих фруктов и овощей; он не мог правильно рассортировать картинки с изображением овощей и фруктов. Однако когда больному называли какой-нибудь фрукт или овощ, он находил картинку с его изображением, правильно отно-

сил его к фруктам либо овощам, верно описывал его размер, форму, и цвет. Больной правильно относил к фруктам или овощам напечатанные названия этих объектов. В то же время этот больной не испытывал аналогичных трудностей при назывании предметов, изображенных на картинках, если они относились к категориям иным, чем овощи и фрукты: например, он правильно назвал лишь 30 из 48 фруктов, лишь 37 из 59 овощей, но почти все (262 из 269) другие объекты на картинках — предметы домашнего обихода, геометрические фигуры, животные, части тела, транспортные средства, предметы питания (не включавшие фрукты и овощи).

Эти результаты показывают, что локальные нарушения мозга могут вызвать повреждение "подпространства" в иерархической системе знаний, имеющихся в памяти (см. ниже, гл. 4, §14), и что различные категории образов внешнего мира в памяти человека могут соответствовать возбуждению разных нейронных ансамблей, находящихся в разных областях мозга (см. в этой связи также [51], где обсуждаются вопросы взаимодействия правого и левого полушарий мозга).

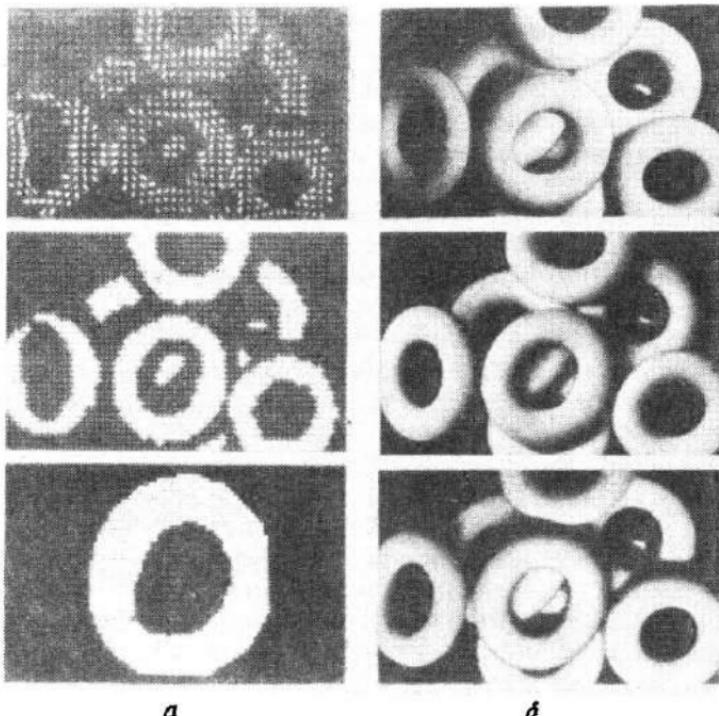


Рис. 3.12. "Игольчатая диаграмма" (a) груды тороидов (б)

**2. Моделирование взаимодействия сенсорных и моторных систем.** Моделирование взаимодействия сенсорных и моторных систем реализуется в различных роботах — пишущих машинках, печатающих под диктовку; промышленных специализированных роботах исполняющих устную команду человека; механических устройствах, читающих печатный текст, в сочетании с выходным синтезатором речи; "тактильные" роботы (например, робот для стрижки овец, см. § 9 данной главы); роботы с "искусственным зрением".

В качестве примера робота с "искусственным глазом" и "механической рукой" рассмотрим систему, предназначенную для того, чтобы вытащить определенную деталь из груды беспорядочно расположенных деталей нескольких различных типов [59]. В этой системе наряду с имитатором стереовидения, подобным описанному в § 7, используется еще одна "зрительная система", позволяющая распознавать нужную деталь среди других, определить ее координаты и ориентацию, выбрать те точки на детали, в которых рука должна захватить объект. В основе механизма этой зрительной системы лежит метод определения локальной ориентации нормали к поверхности каждого из объектов, "расматриваемых" искусственным глазом. Это направление нормали находится путем сравнения трех значений яркости данного рассматриваемого участка (при последовательном освещении тремя точечными источниками света, расположенными в разных местах) с яркостями различных точек шара, освещаемого этими же источниками. Находя равные яркости, мы определим тем самым координаты точки на шаре и, следовательно, направление нормали в этой точке, которое будет совпадать с искомым направлением нормали в нашем объекте.

"Игольчатая диаграмма" (рис. 3.12) дает направление нормалей к поверхностям объектов в различных точках поля зрения искусственного глаза. ЭВМ разделяет полученное изображение на элементы и выделяет один из них. Рука робота выводится в такое положение, когда она оказывается на некоторой высоте над выбранным объектом; затем рука начинает опускаться и останавливается в тот момент, когда инфракрасный луч, распространяющийся от одного из двух "пальцев" руки к другому, перекрывает объектом. Если необходимо, рука разворачивается, приспособливаясь к положению объекта, сжимает деталь и поднимает ее.

Если в груде имеются различные детали, ЭВМ, определив "игольчатую диаграмму" выбранного объекта, сравнивает ее с игольчатыми диаграммами всех деталей, хранящимися в памяти машины, и определяет тип выбранной детали. Это распознавание технически проводится не путем непосредственного сравнения игольчатых диаграмм, а с помощью вспомогательного приема —

сравнения так называемого "распространенного гауссова изображения" (РГИ) выбранной детали и РГИ всех деталей, имеющихся в памяти (РГИ объекта – эта сфера, каждой точке которой сопоставлено число, равное доле площади поверхности объекта с таким же направлением нормали, как и в данной точке сферы).

Если выбранная деталь оказалась подходящей, ЭВМ дает команду руке достать ее, если нет – глаз ищет следующую деталь.

Распознавание объекта (его различных характеристик: формы, положения в пространстве и т.п.), отнесение его к одной из известных категорий, приведение в действие моторной системы, включение обратной связи – характерные черты этого и других подобных ему устройств, моделирующих взаимодействие сенсорных и моторных систем человека.

---

---

## ГЛАВА 4

### ЭЛЕМЕНТЫ МЫШЛЕНИЯ

Мы уже говорили в предыдущей главе, что осознание какого-либо явления (или осознание восприятия объекта) внешнего мира состоит в распознавании этого объекта или явления ("релаксации" стимула, исходящего от этого объекта или явления и воспринимаемого органами чувств, к наиболее близкому образу памяти) и в сопоставлении различных образов памяти этого одного объекта, соответствующих различным сенсорным каналам.

Картина активности нейронных систем мозга, соответствующая одному образу памяти, сменяется второй, затем третьей картиной возбуждения нервных клеток — по мере того как наше внимание привлекают второй, третий объекты внешнего мира.

Однако такая смена "кадров" — картин нейронной активности может происходить и при "отключенных" сенсорных каналах: в этом случае мы имеем дело с процессом мышления. Описание процесса мышления — либо "случайной" смены образов памяти ("поток сознания"), либо смены образов, направленной к некоторой цели, — мы рассмотрим в § 12.

Насколько "глубок" отдельный образ памяти? И насколько глубоко наше понимание сути осознаваемого явления? Эти вопросы обсуждаются в § 13.

Далее, в § 14, рассматривается вопрос о структуре памяти — на примере той ее части, которая относится к профессиональному знанию, легче поддающемуся классификации.

Последний параграф этой главы посвящен обсуждению тех механизмов, которые направляют нашу мысль, обеспечивают поиск важных задач и, в конечном счете, то или иное их решение.

#### § 12. Мысление

**1. Поток сознания.** Многие психологи и в прошлом, и в наши дни, обсуждая вопрос о том, как "текет" мысль человека, считали (и считают), что процесс мышления есть последовательная смена в сознании одного образа другим, причем каждый последующий образ чем-то связан с предыдущим. Например, около 100 лет тому

назад Джеймс [15] говорил, что мысль подобна последовательным перелетам птицы с одного дерева на другое: мы можем долго "расматривать" мысленным взором каждый из образов ("птица, сидящая на ветке", или "устойчивые состояния" сознания), но нам никак не удается "рассмотреть" сам процесс смены образов ("полет птицы", или "транзитивные состояния"). В наше время Норман [40], анализируя свой ход мысли, описывает его как последовательную смену образов.

И Джеймс, и Норман (и многие другие) подчеркивают, что пара последовательных образов, сменяющих друг друга в процессе мышления, имеет некоторый общий элемент.

Надо заметить, что многие психологи отмечают различие между целенаправленным процессом мышления (например, при решении какой-либо задачи) и "случайным блужданием" мысли. Процесс целенаправленного мышления мы рассмотрим ниже, а сейчас обсудим, как можно было бы изучить в нашей модели процесс, аналогичный "бесцельному блужданию" мысли от образа к образу, — поток сознания.

Рассматривая блуждание между образами, мы будем считать, что сами образы являются сложными, т.е. что каждый образ состоит из нескольких частей, каждая из которых имеет самостоятельное значение и может быть независимо осознана. Предполагая, что образы, как и стимул, представляют собой строку из +1 или -1, мы будем считать, например, что образы имеют вид

ABM; ABN,

где каждый из символов A, B, M — первая, вторая и третья части строки из +1 и -1. При достаточно длинных строках и небольшом числе образов в памяти можно выбрать все символы A, B, M, N ортогональными. Тогда совпадающие части сложных образов ABM и ABN будут описываться совпадающими символами A, B, а несовпадающие части — несовпадающими символами M и N.

Процесс диффузии стимула между двумя потенциальными ямами, соответствующими двум образам, при различных значениях температуры, был рассмотрен в гл. 2, § 6. При низкой температуре стимул находится, как правило, вблизи одного из образов, изредка переходя в другой, и обратно.

Рассмотрим теперь систему из трех образов таких, что первый и второй, а также второй и третий образы имеют небольшую общую часть, а первый и третий не имеют общих элементов:

1) BBBC; 2) DDDC; 3) DAAA.

В настоящей главе при моделировании диффузии стимула между образами памяти мы постоянно будем пользоваться

Рис. 4.1. Последовательность смены трех модельных образов памяти

следующим приемом. Мы будем многократно повышать, а затем понижать температуру термостата, в котором находится наша модельная система нейронов. Если температура низка (в частности, равна нулю), то, как мы видели в гл. 2, стимул в результате процесса релаксации приближается к одному из образов памяти, а затем "сливается" с ним. При повышении температуры стимул "уходит" из потенциальной ямы, соответствующей образу, к которому он был близок, а если температура вновь понижается — опускается в потенциальную яму этого же либо другого образа.

Как правило, мы будем использовать циклическое скачкообразное повышение температуры до некоторого значения  $T_0$  с последующим экспоненциальным падением температуры до нуля:

$$T = T_0 \exp [-B(L - 1)],$$

где  $B$  — декремент затухания температуры (о способе его выбора будет сказано ниже), а  $L$  — номер шага во времени в цикле повышения и понижения температуры.

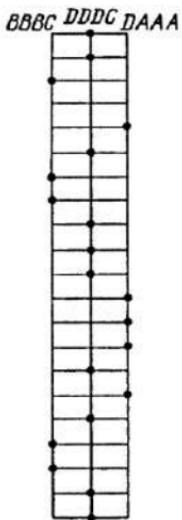
С помощью такого процесса мы попытаемся моделировать то "умственное усилие", которое, по-видимому, человек совершает, переходя от мысленного "созерцания" данного образа к созерцанию следующего. Заметим, что такой способ решения проблемы "Что делать со стимулом, попавшим в результат процесса релаксации в одну из вершин  $N$ -мерного куба?" [69] кажется вполне естественным в нашей модели лагранжевой системы нейронов, взаимодействующей с некоторым термостатом. Этот термостат может моделировать системы мозга, не входящие в ту, которая моделируется самой нашей системой нейронов.

Заметим, что прием повышения и понижения температуры в последнее время широко и успешно применяется при решении на ЭВМ самых различных задач оптимизации [90].

На рис. 4.1 приведена последовательность переходов стимула в системе образов 1) – 3), представленных в виде строки из 16 символов +1 и -1, причем

$$B = +, +, -, -; \quad D = +, +, +, +; \quad A = +, -, +, -;$$

значения  $T_0$  и  $B$  выбирались так, чтобы, с одной стороны, обеспе-  
4\*



чить достаточно быстрый переход от образа к образу и, с другой, достичь достаточной близости релаксирующего стимула к образу в фазе понижения температуры.

Таким образом, как видно из рис. 4.1, последовательные затухающие во времени "температурные вспышки" приводят к блужданию стимула между образами именно в такой последовательности, когда предыдущий и последующий образы имеют общий (в данном случае небольшой – равный  $\frac{1}{4}$  образа) элемент.

Такая картина соответствует "мышлению по ассоциации" [15], действительно напоминает перелет птицы с ветки на ветку и, позволяя "рассмотреть" каждый образ из цепочки, изображенной на рис. 4.1, оставляет стимул хаотическим в стадии его перехода от образа к образу.

**2. Пример моделирования "логического вывода".** Сочетание рассмотренного явления "блуждания" мысли по системе образов и способности системы вырабатывать прототип (гл. 2, § 6) приводит к явлению, которое может служить моделью "логического вывода".

Рассмотрим, например, следя [67], систему сложных образов в памяти:

- |                            |                                |
|----------------------------|--------------------------------|
| 1) Сократ человек умный;   | 4) Платон человек смертен;     |
| 2) Сократ человек добрый;  | 5) Ксенофонт человек смертен;  |
| 3) Сократ человек честный; | 6) Аристотель человек смертен. |

В нашей модели эти сложные образы при кодировании каждого образа памяти строкой из символов +1 и -1 могут быть записаны в виде

- |         |         |
|---------|---------|
| 1) ABL; | 4) PBC; |
| 2) ABM; | 5) QBC; |
| 3) ABN; | 6) RBC, |

где символы A, B, L, M, N, P, C, Q, R имеют, как было предположено выше, самостоятельный смысл и означают соответственно "Сократ", "человек", "умный", "добрый", "честный", "Платон", "смертен", "Ксенофонт", "Аристотель". Мы предположим, что эти символы представлены кусками строки из +1 и -1 такими, что символы A, P, Q, R взаимно ортогональны, то же относится к символам L, M, N, C.

Теперь в процессе случайного блуждания стимула при последовательном нагревании и охлаждении системы произойдет следующее. Независимо от начального состояния, по истечении некоторого времени стимул попадет в состояние ABC – энергия этого состояния наименьшая, и при достаточно малой температуре  $T_0$  уход стимула из этого состояния маловероятен – соответствующая ему потенциальная яма значительно глубже других минимумов энергии.

Поскольку символы A, B, ... (находящиеся в одних и тех же частях сложных векторов образов) взаимно ортогональны, можно обобщить правило скалярного умножения: при умножении векторов стимула на векторы образов будем считать, что

$$A \cdot A = 1, \quad A \cdot B = 0, \quad A \cdot C = 0, \quad \dots \quad (24)$$

Тогда, используя прежнее выражение для энергии \*)

$$-E = \sum_s \mu^s [(\text{Стимул}) \cdot (\text{Образ})^s]^2 \quad (25)$$

(суммирование ведется по всем образам), можно построить

	C	L	M	N
A	24	20	20	20
P	20	12	12	12
Q	20	12	12	12
R	20	12	12	12

Рис. 4.2. Энергетическая карта для системы образов 1) – 6)

энергетическую карту, на которой приведены значения энергии системы для различных вариантов значения стимула. На этой карте (рис. 4.2) значения энергии (взятой со знаком минус) приведены в зависимости от значений первого (строки таблицы) и третьего (столбцы таблицы) символа в стимуле (второй символ для всех случаев принят равным B).

Состояние ABC, обладающее наименьшей энергией, соответствует прототипу

Сократ человек смертен.

Таким образом, обычный "логический вывод" (Сократ человек, человек смертен, следовательно, Сократ смертен) в рассматриваемой модели получается при "случайном блуждании мысли" в результате перехода системы в минимум энергии, образующийся из-за существования в памяти двух тем: темы "человека Сократа" и темы "человек смертен".

3. Выявление темы при блуждании в системе образов памяти. При случайном блуждании стимула в системе образов памяти, в которых присутствуют несколько тем, эти темы выявляются следующим образом: при достаточно низкой температуре, когда блуждающий стимул проводит большую часть времени вблизи самых глубоких потенциальных ям на энергетической карте, одна из

\*)  $ABC \cdot ABC = 3, ABC \cdot ABD = 2, ABC \cdot ADE = 1, ABC \cdot DEF = 0$  и т. д.

имеющих самостоятельное значение частей стимула как раз и будет совпадать с каким-либо из символических обозначений ведущих тем системы образов памяти. То, что такое явление должно наблюдаться, становится ясным уже из рис. 4.2. Действительно, глубокие потенциальные ямы на энергетической карте этого рисунка соответствуют строке А, т.е. теме "Сократ" (точнее, теме "Сократ человек", поскольку второй символ всех сложных образов был выбран равным В – "человек"), и столбцу С, т.е. теме "человек смертен". При небольшой температуре случайное блуждание будет происходить лишь в пределах глубоких ям, соответствующих строке А и столбцу С, что и выделит обе указанные темы.

Рассмотрим теперь несколько более сложный, но похожий случай, когда на энергетической карте присутствуют несколько локальных глубоких потенциальных ям.

Простейший составной образ, естественно, состоит лишь из двух частей (каждая из которых имеет самостоятельное значение). Мы будем далее в этой и следующих главах часто пользоваться таким представлением образов памяти по следующим причинам. С одной стороны, пользуясь такими образами, мы сохраняем возможность моделировать ассоциативное мышление; с другой стороны, для таких образов удобно строить двумерные энергетические карты, и, наконец, из "сгустков" или групп таких простейших образов можно создавать более сложные образы. Следует, однако, помнить, что каждая из двух частей такого сложного образа является частью длинной строки из +1 и -1. По-прежнему для энергии будем пользоваться простейшим квадратичным выражением (25), а для вычисления скалярного произведения – правилами (24). Поскольку число образов может быть довольно большим, будем обозначать отдельный образ не парой букв

A, B; C, E;

а парой чисел, например

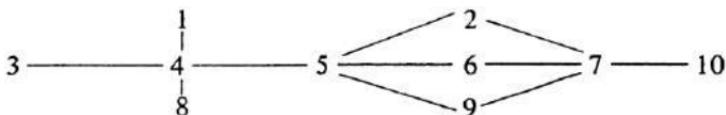
1, 17; 21, 14;

и при скалярном умножении вектора стимула на вектор образа складывать произведение первых символов стимула и образа с произведением вторых символов, считая это произведение равным единице, если у стимула и образа соответствующие символы совпадают, и равным нулю в противном случае.

Рассмотрим пример, который можно описать следующей схемой:



Обозначим слова числами:



(26a)

Этой схеме соответствует следующая система образов памяти:

1,4; 2,5; 2,7; 3,4; 4,5; 5,6; 6,7; 7,10; 4,8; 5,9; 7,9. (27)

Чтобы сделать процесс блуждания мысли по образам памяти более близким к действительности (и, во всяком случае, чтобы симметризовать картину этого блуждания), добавим к этой системе образы с переставленным первым и вторым символами:

4,1; 5,2; 7,2; 4,3; 5,4; 6,5; 7,6; 10,7; 8,4; 9,5; 9,7. (27a)

Энергетическая карта, соответствующая схеме (26) и системе образов памяти (27), подсчитанная по формуле (25) с учетом правил (24), изображена на рис. 4.3. На ней видны минимумы, соответствующие основным темам [70] схемы (26): тема Сократа, тема человека и тема смерти – это столбцы и строки 4, 5 и 7.

Блуждание по образам памяти, исследованное при различных значениях температуры  $T_0$  и различных декрементах затухания  $B$  температурной вспышки, показывает, как в различных условиях выделяются эти три основные темы. Удобно строить карты плотности состояний, показывающие, сколько раз за время процесса блуждания стимул находился в той или иной области памяти. При низкой температуре темы отчетливо выявляются, при высокой движение становится хаотическим и стимул значительную долю времени проводит вдали от образов памяти.

**4. Поиск аналогии.** Когда мы встречаемся с новым для нас явлением, событием или закономерностью, то для понимания (и запоминания) этих явлений, событий и закономерностей (новых опытных данных) мы, как правило, мысленно строим модель, описывающую совокупность этих новых данных. Модель строится, естественно, с помощью уже имеющихся у нас знаний. Одним из важных этапов при построении модели, описывающей новые данные, является нахождение аналогии между этими данными опыта и ранее известными нам данными, уже систематизированными и описанными с помощью различных моделей.

Сам процесс нахождения аналогии между новыми данными и какой-то из находящихся у нас в памяти моделей различных явлений можно представить как несколько совершающихся последовательно во времени процессов распознавания, каждый из которых подобен процессу распознавания, рассмотренному в гл. 2.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	2	7	5	3	5	2	3	2
2	3	4	3	6	8	4	8	3	4	3
3	2	3	2	7	5	3	5	2	3	2
4	7	6	7	8	10	6	8	7	6	5
5	5	8	5	10	8	8	8	5	8	5
6	3	4	3	6	8	4	8	3	4	3
7	5	8	5	8	8	8	8	5	8	7
8	2	3	2	7	5	3	5	2	3	2
9	3	4	3	6	8	4	8	3	4	3
10	2	3	2	5	5	3	7	2	3	2

Рис. 4.3. Энергетическая карта для системы образов (27)

Действительно, поиск аналогии можно представить себе состоящим из следующих этапов:

- 1) перевод описания опытных данных с языка опыта на язык моделей;
- 2) выбор модели, наиболее близкой по описанию к описанию опытных данных;
- 3) "приведение в действие" модели и проверка соответствия выводов модели всему набору рассматриваемых новых экспериментальных данных.

Из описания этих этапов поиска аналогии видно, что каждый из них включает поиск (в некоторой системе образов) одного или нескольких образов, наиболее близких к предъявленному на этом этапе стимулу. Действительно: 1) перевод с одного языка на другой представляет собой поиск близкого по значению слова; здесь стимулом является совокупность слов, описывающих на языке опыта наиболее характерные, важные черты набора экспериментальных данных, а системой образов — совокупности соответствующих слов на языке моделей; 2) второй этап, состоящий в выборе модели по ее описанию, включает процесс распознавания модели по ее наибольшей близости к стимулу — описанию данных опыта на языке моделей. Наконец, 3) этап проверки правильности выбранной модели включает определение степени близости какого-либо определенного вывода модели и некоторых признаков рассматриваемых экспериментальных данных.

Здесь нужно заметить, что уже на первом этапе может проявиться известная из практики неоднозначность аналогии: перевод с одного языка на другой неоднозначен, так что данному описанию фактов на языке опыта может соответствовать несколько различных описаний на языке моделей. Более того, если мы разделим все известные нам модели на несколько классов (например, относящихся к различным областям знания), каждый из которых имеет свой язык, то такая многозначность перевода становится неизбежной.

Дополнительная неоднозначность может возникнуть и на втором этапе поиска аналогии: одно и то же описание на языке моделей, предъявленное в качестве стимула, может оказаться близким к различным по сути моделям в силу того, что это описание оказалось "слишком широким" и включает несколько возможностей: например, при последовательных предъявлении стимул может релаксировать то к одному, то к другому образу.

Прежде чем переходить к обсуждению возможности моделирования описанной схемы процесса нахождения аналогии при осознании новых, полученных из опыта данных, отметим два существенных отличия такого многоступенчатого последовательного процесса распознавания от простого распознавания, рассмотренного в гл. 2.

Во-первых, в многоступенчатом процессе поиска аналогии при переходе к каждому следующему этапу изменяются и стимул, и система образов памяти. Найденный подходящий образ предыдущего этапа становится стимулом в следующем процессе распознавания. Во-вторых, задана сама последовательность этапов процесса нахождения аналогии. Чем же определяется механизм последовательной смены этапов этого процесса?

Для ответа на этот вопрос разделим прежде всего процесс нахождения аналогии на стадию собственно нахождения аналогии (этапы 1 + 2) и стадию проверки (этап 3). Само наличие этих двух стадий представляется естественным: ведь исходной задачей было нахождение правильной аналогии, и если (в результате первой стадии) аналогия найдена, необходимо проверить ее правильность. С точки зрения рассмотренной нами выше модели блуждания по системе простейших (составленных из двух частей) образов памяти переход между стадиями можно описать как переход между (выделенными исходной задачей) образами памяти:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Найти} \\ \text{аналогию} \end{array} \right\} \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Аналогия} \\ \text{правильна?} \end{array} \right\} . \quad (\text{A})$$

Эти сложные образы имеют общую часть ("аналогия"), и переход между ними может моделировать (циклический или повторный) процесс поиска и проверки аналогии.

Что касается этапов 1 и 2 (собственно поиска аналогии), то их сочетание также представляет собой процесс распознавания. На что похоже вновь узнанное нами? Этот вопрос мы задаем себе вновь и вновь в течение всей нашей жизни, и для пытливого ума, по-видимому, обязательно присутствие в памяти связанных образов:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Это} \\ \text{новое?} \end{array} \right\} \xrightarrow{\hspace{1cm}} \left\{ \begin{array}{l} \text{На что похоже} \\ \text{новое?} \end{array} \right\}. \quad (\text{Б})$$

Эти образы связаны общей частью ("новое"), и переход между ними может моделировать саму задачу (найти аналогию) в общем виде.

Таким образом, можно предположить, что само осознание необходимости решения задачи — найти правильную аналогию (между новыми данными опыта и известными моделями уже имеющихся знаний, содержащимися в нашей памяти) — возбуждает две пары образов (А) и (Б), между которыми в процессе решения задачи повторно происходят переходы. Эти переходы определяют описанные выше этапы всего процесса поиска аналогии: перевод с языка опыта на язык моделей, выбор модели, ее проверку [86].

Здесь надо отметить, что переходы стимула между образами пары (А) и между образами пары (Б), так же, как и конкретный поиск аналогии (т.е. процессы распознавания, соответствующие этапам 1–3), могут, по-видимому, происходить и одновременно, и последовательно, подобно тому как в процессе распознавания образа памяти, наиболее близкого предъявленному стимулу, это распознавание в случае составных (состоящих из нескольких имеющихся самостоятельное значение частей) стимула и образа может происходить и параллельно, и последовательно (см. § 14).

Не останавливаясь на этом вопросе, рассмотрим конкретный пример поиска аналогии.

На что похожа резка листа стали лучом лазера? Этот вопрос был задан одним из экспериментаторов группе физиков-теоретиков. Суть вопроса состояла в следующем. В экспериментах оказалось, что при резке лазерным лучом стального листа (эта резка осуществляется путем прямолинейного передвижения листа в его плоскости, а лазерный луч падает на лист приблизительно перпендикулярно этой плоскости, причем в точку падения луча подается струя кислорода) форма реза, почти в одинаковых условиях, бывает двух типов: это либо узкая ровная щель, либо широкая неровная (рис. 4.4.). Экспериментатора интересовало, в чем причина этого явления.

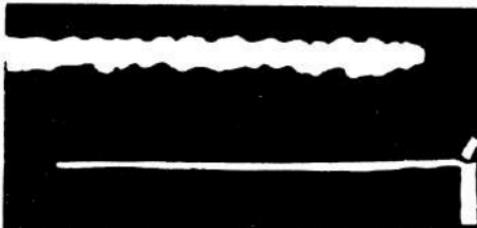
При обсуждении теоретиками этого экспериментального факта (это было обсуждение типа "мозгового штурма", но, по-видимому,

каждый отдельный физик-теоретик размышлял бы примерно так же) прежде всего возник вопрос: на что похоже это явление?

Последовательные попытки ответить на этот вопрос (приемлемый для большинства присутствующих ответ был получен примерно через 15–20 минут) включали:

- а) описание наиболее характерной черты данных опыта;
- б) поиск чего-либо похожего в описании известных моделей физических явлений.

Рис. 4.4. Форма реза листа стали лазерным лучом



Варианты описания данных опыта: рез

- 1) узкий – широкий;
- 2) гладкий – рваный;
- 3) неустойчивый;
- 4) имеет две формы (два состояния);
- 5) упорядоченный – неупорядоченный;
- 6) регулярный – нерегулярный (хаотический).

Поскольку лица, искавшие аналогию, были физиками-теоретиками с высшим образованием и некоторым опытом работы в своей области, поиск похожих физических моделей производился, по-видимому, каждым из них по-своему, но среди примерно одних и тех же общепринятых образов современной теоретической физики, число которых составляет, вероятно, несколько десятков тысяч [95] и, грубо говоря, соответствует (с точностью до множителя порядка нескольких единиц или десятков) числу страниц в каком-либо из полных современных курсов теоретической физики (примерно по странице на образ).

Ассоциативные ответы на варианты описания экспериментальных данных 1 – 6 были примерно следующими (знак “–” означает отсутствие определенной ассоциации):

- 1) – .
- 2) – .
- 3) +. Неустойчивость плазмы, гидродинамические неустойчивости, устойчивость по Ляпунову. (Этот вариант был, однако, отвергнут, поскольку уход неустойчивой системы от равновесного состояния должен, по-видимому, приводить либо к регулярным, либо к хаотическим колебаниям, либо к другому устойчивому состоянию, а на опыте наблюдалась смена двух режимов).

4) – . Слишком много явно не относящихся к делу вариантов в теоретической физике (спин  $\frac{1}{2}$ , инверсия координат, две поляризации и т.д.).

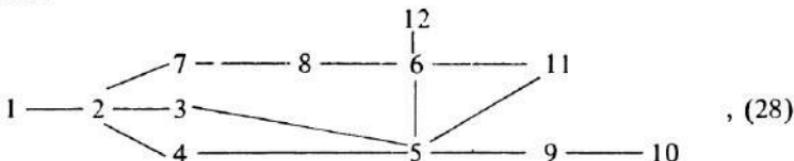
5) + . Переходы порядок – беспорядок. Фазовый переход.

6) + . Переход к хаосу в динамических системах. Переход к турбулентности.

Варианты 5 и 6 и связанные с ними модели обсуждались далее, но ответ по сути был уже найден – наблюдаемая закономерность резки стального листа лазерным лучом, по-видимому, аналогична закономерностям перехода от ламинарного течения к турбулентному (эти закономерности в наши дни изучаются и как переход к хаосу от регулярного поведения, и как фазовый переход в не-равновесных системах).

Продолжением описанного поиска аналогии была научная расчетно-теоретическая работа, выполненная двумя теоретиками, принимавшими участие в обсуждении, и опубликованная в научном журнале.

Моделирование процесса поиска аналогии можно попытаться провести, записывая в память систему сложных образов (состоящих из двух имеющих самостоятельное значение частей) и изучая процесс блуждания стимула в этой системе образов. В качестве примера можно рассмотреть систему образов, соответствующую схеме:



где 1 – железо, 2 – лазерная резка, 3 – ровный рез, 4 – неровный рез, 5 – переход, 6 – турбулентность, 7 – кислород, 8 – горение, 9 – фазовый переход, 10 – две фазы, 11 – бифуркация, 12 – ламинарный.

Образы памяти, после симметризации первого и второго символов, для такой схемы принимают вид

$$\begin{aligned} & 1, 2; 2, 7; 2, 3; 2, 4; 7, 8; 8, 6; 3, 5; 4, 5; 12, 6; 6, 5; 6, 11; \\ & 5, 11, 5, 9; 9, 10; \\ & 2, 1; 7, 2; 3, 2; 4, 2; 8, 7; 6, 8; 5, 3; 5, 4; 6, 12; 5, 6; \\ & 11, 6; 11, 5; 9, 5; 10, 9. \end{aligned} \quad (29)$$

Соответствующая энергетическая карта изображена на рис. 4.5. Блуждание по такой системе образов выявляет, в соответствии с энергетической картой, темы: лазерная резка, переход, турбулент-

2	7	3	3	6	5	3	3	3	2	3	2
7	8	8	8	9	8	8	6	6	5	6	5
3	8	4	4	9	6	4	4	4	3	4	3
3	8	4	4	9	6	4	4	4	3	4	3
6	9	9	9	10	11	7	7	9	6	9	6
5	8	6	6	11	8	6	8	6	5	8	7
3	8	4	4	7	6	4	6	4	3	4	3
3	6	4	4	7	8	6	4	4	3	4	3
3	6	4	4	9	6	4	4	4	5	4	3
2	5	3	3	6	5	3	3	5	2	3	2
3	6	4	4	9	8	4	4	4	3	4	3
2	5	3	3	6	7	3	3	3	2	3	2

11 10 9

8 7

6 5

Рис. 4.5. Энергетическая карта для системы образов памяти (28), включенных в обслуживание лазерной резки

ность. Эти темы, будучи увязаны вместе, содержат искомую аналогию.

Карта плотности состояний, показывающая, сколько раз за время процесса блуждания стимул находился в той или иной области памяти (28), приведена на рис. 4.6.

5. "Сценарии". В повседневной практической деятельности нам часто приходится обдумывать более или менее длинные "цепочки" последовательных действий, прошлых или будущих, припоминать или предугадывать цепочки последовательно совершающихся событий. Для краткости будем называть такие цепочки действий или событий сценариями.

Из нашего собственного опыта и из данных, описанных в литературе [15, 40], известно, что при обдумывании различных сценариев могут встретиться два крайних случая — сценарий либо "всплывает" в памяти сразу, как единое целое, либо мы составляем его постепенно, перебирая различные варианты действий или событий, отбирая подходящие образы и объединяя их в единый сценарий; между этими крайними случаями, конечно, лежат и промежуточные — здесь мы объединяем, перебирая варианты, различные "куски" сценария в единое целое.

Во всех этих случаях мы имеем дело с последовательностью образов, определенным способом упорядоченных во времени. Возникает вопрос: как можно описать такие последовательности об-

3	3	8	1	19	13	4	2		3	4
2	1			7	6		1			
				1	16				1	
3			2	14	20	3	6			
12				59	7	2	8	2		1
16	1									
					5					
			1	10		1				
4	1				3					
			7	3						
			1							

Рис. 4.6. Карта плотности состояния для системы образов (28)

разов, используя модель типа описываемой уравнениями (2), (3)? Возможный ответ следующий; поскольку сценарий, в отличие от потока сознания, характеризуется вполне определенной и явно выраженной целью, достаточно в выражении для энергии (25) приписать образу, соответствующему этой цели, большой вес  $\mu$  (и, следовательно, достаточно низкую энергию), чтобы при блуждании по системе образов памяти система в конце концов пришла в состояние, соответствующее образу цели. Выбор пути, по которому в системе образов от начального, исходного состояния по цепочке связанных между собой образов (например, простейших составных) мы приходим к цели, может определяться в нашей модели наличием еще нескольких образов с относительно большим весом, соответствующих дополнительным (второстепенным) целям при выборе наиболее подходящего сценария. При неоднократном повторном использовании одного и того же сценария "потенциальные ямы", соответствующие образам, входящим в сценарий, будут, в соответствии с уравнением (3), углубляться, и сценарий постепенно превратится в привычный, стандартный алгоритм.

Таким образом, мы приходим к обобщению первоначального предположения о том, что осознанию какого-либо события, явления, предмета соответствует в нашей модели предельное состояние процесса релаксации стимула к соответствующему образу памяти. Действительно, в случае сценария осознанию его соответствует цепочка образов, сменяющих друг друга в определенной последовательности.

Примерами привычных, стандартных алгоритмов-сценариев могут служить мелодии, фразы и сами слова.

**6. Вспоминание.** Вспоминание, занимающее значительную часть времени в наших повседневных размышлениях, судя по анализу высказываний, приводящихся различными авторами, бывает двоякого рода:

1) вспоминание, не имеющее, на первый взгляд, какой-либо определенной цели;

2) вспоминание, имеющее некоторую определенную цель.

Первый процесс, протекающий обычно без какого-либо умственного напряжения, похож на процесс случайного блуждания по системе образов памяти и, по-видимому, представляет собой частный случай этого процесса, обращенный в прошлое: картина прошедших событий сменяют одна другую, причем два следующих друг за другом образа, как правило, связаны каким-либо общим элементом.

Второй процесс характеризуется наличием цели; чаще всего встречаются два варианта: а) либо нам нужно вспомнить неопределенное, и тогда главный вопрос — "что я должен вспомнить?", б) либо мы хотим вспомнить нечто определенное, и тогда главные вопросы, возникающие перед нами, — "где я это видел (или слышал)?", "с чем это было связано?". Такой процесс вспоминания похож на рассмотренный выше процесс поиска аналогии, но отличается от него тем, что при этом целевом вспоминании сама область знаний (образов памяти), в которой находится интересующий нас образ (или тема), вначале не определена, и она-то и является предметом наших мысленных поисков\*).

При вспоминании по варианту а) мы обычно перебираем темы, связанные с нашими недавними заботами, с вопросами, которые нам надлежит решить (но они еще не решены), и проверяем, нет ли среди этих тем или образов того недостающего предмета, который, как мы чувствуем, необходимо вспомнить. При вспоминании по варианту б) нам известен предмет поиска, но неизвестны его некоторые определенные признаки, и мы мысленно перебираем те области знаний или темы, к которым могут относиться интересующие нас сведения. В обоих случаях, а) и б), вспоминание носит характер последовательных попыток распознавания (среди образов некоторой области памяти) одного или нескольких образов, в чем-то близких к тому (чаще всего не вполне определенному) стимулу, который и возникает в сознании при начале вспоминания.

Мы не будем подробно рассматривать первый процесс — "бесцельное" вспоминание, поскольку он, по-видимому, подобен слу-

\* Напомним, что в рассмотренном примере поиска аналогии область, в которой мы искали образ, похожий на предъявленный стимул, была определена — это была область физических моделей.

чайному блужданию в системе связанных общими элементами образов, но заметим следующее. Несмотря на кажущуюся "бесцельность" вспоминания такого типа, при таком вспоминании, как вероятно, известно каждому (об этом можно догадываться по описанию таких вспоминаний в художественной литературе и специальной литературе по психологии), на ум часто приходит решение различных вопросов, задач, возникают новые идеи, новые сравнения — все это связано общими элементами с образами, проходящими перед мысленным взором при вспоминании, и в то же время связано с еще не достигнутыми целями, еще не решенными задачами, стоящими перед нами.

Пример "бесцельного" вспоминания приведен в книге американского психолога Нормана [40]. Автор описывает ту последовательность образов, которая привела его к вспоминанию о том, где он несколько лет назад купил рамки для слайдов: дом, в котором накануне побывал автор — противопожарный детектор дыма в этом доме — детектор дыма в доме автора — батарейки для этого детектора — магазины, где автор пытался купить эти батарейки — магазин вблизи университета, где преподает автор и где продаются эти батарейки — отдел этого магазина, где продаются рамки для слайдов.

Такая последовательность действительно состоит из образов, каждый из которых имеет с предыдущим некоторый общий элемент. Эти образы можно представить как простейшие, состоящие лишь из двух частей, и рассмотреть энергетическую карту для такой системы и блуждание по этой системе образов.

Однако Норман указывает, что незадолго перед этим бесцельным, но удачным вспоминанием он старался вспомнить то же самое событие (свою покупку рамок для слайдов несколько лет назад) с вполне определенной целью — ему были нужны новые рамки для слайдов, — но эта его попытка вспоминания оказалась безуспешной.

Почему оказалась безуспешной эта его попытка вспоминания (по варианту б), см. выше), точно так же, как, по-видимому, оказываются иногда безуспешными попытки аналогичных вспоминаний у каждого из нас?

Одним из возможных ответов может быть слишком большая, неприемлемая для нас величина времени, необходимого, чтобы перебрать все возможные варианты образов, среди которых может находиться образ, близкий к предъявленному нам стимулу\*). Произведение числа магазинов на число этажей в каждом магази-

\* ) { Рамки для слайдов } — { Витрина или стеллаж магазина }

не, на число отделов на каждом этаже и на число стеллажей или витрин в каждом отделе составляет величину порядка нескольких сотен (скажем,  $5^4 = 625$ ), так что если мы будем мысленно "расматривать" каждую витрину лишь несколько секунд, у нас при непрерывной работе уйдет на вспоминание порядка часа. Никто из нас, по-видимому, не согласится тратить на вспоминание такое большое время\*), а вероятность нахождения нужного образа путем перебора за время, скажем, на порядок меньшее, может оказаться малой.

В той же книге Норман приводит пример своего успешного цевого вспоминания. Его целью было вспомнить некоторую книгу или статью (написанную некоторым психологом), в которой содержалось описание некоторого человека с исключительной памятью. Автор приводит цепочку образов, позволивших ему найти нужный образ памяти:

английский математик с исключительными способностями — автор статьи о нем, английский психолог — советский психолог Лурия — книга Лурия о Ш., человеке с исключительной памятью, "Маленькая книжка о большой памяти" [34].

Норман отмечает, что после того как последний из перечисленных образов памяти был найден, и цель была достигнута, он продолжал думать на эту же тему и приводит следующую систему образов:

американский психолог Эрл Хант, автор работы о мнемонисте, фамилия которого также обозначена одним инициалом — английский математик Эйткен с исключительными способностями — статья Хантера в сборнике под редакцией Уозона и Джонсон-Лэрда, в которой говорится о сравнении памяти Ш. и Эйткена.

Как и при поиске аналогии, при вспоминании такого типа процесс блуждания по системе составных образов чередуется с процессом распознавания — нахождения образа памяти, близкого к первоначально предъявленному стимулу:

Статья или книга психолога о мнемонисте.

**7. Использование классификации и целостных "картин" для облегчения вспоминания или поиска аналогии.** Значительная часть современного знания человечества входит в сферу науки, которая занимается его накоплением, осмысливанием и изучает возможность применения на практике. Современная наука делится на отдельные, часто слабо связанные области, и соответственно значительная часть знаний у каждого отдельного человека носит следы этой структуры всеобщего научного знания.

---

\* ) Вспомним, например, "Лошадиную фамилию" А.П. Чехова.

Далее, поскольку в наше время значительная часть знаний каждого отдельного человека относится, как правило, к какой-то одной области научного знания (или, в лучшем случае, в двум-трем), в которой он является профессионалом, это его знание носит на себе отпечаток той общепринятой классификации знания, которая свойственна данной области современной науки.

Согласно [95] профессиональное знание характеризуется целым рядом общих свойств, независимо от того, к какой именно области – шахматам, алгебре или физике – относится это знание, подобно тому как, по мысли авторов [95], имеет общие свойства генетика таких различных организмов, как, например, плодовая мушка, хлебная плесень и кишечная палочка. Одним из общих свойств любого знания является его хранение в виде нескольких десятков тысяч цельных образов, или картин, – стандартных позиций на шахматной доске у гроссмейстеров и мастеров, стандартных концепций, законов, алгоритмов и правил решения задач у выпускников высших учебных заведений после нескольких лет практической работы. Согласно [95] это число образов, грубо говоря, порядка числа слов и идиом в словаре выпускника высшего учебного заведения \*).

“Часто о человеке, искусном в решении физических и инженерных задач, говорят, что он обладает физической интуицией” [95]. Авторы [95] считают, что знание такого человека (специалиста) представляет собой систему сложных цельных образов, определяющих истолкование и решение задачи и “составляющих значительную часть того, что мы называем физической интуицией” \*\*).

Для большинства областей современной науки при хранении и представлении накапливающихся знаний характерно использование классификации типа линнеевской классификации животного и растительного мира (см., например, [8]). Стандартный полный учебный курс теоретической (или общей) физики содержит десяток томов, каждый из которых посвящен отдельной области физического мира и, в свою очередь, содержит десяток глав (по десятку параграфов), суммирующих результаты примерно четырех-пятилетниковых экспериментальных исследований и их осмысливания на языке физики и математики.

---

\* ) Надо заметить, что согласно Сименону [18] практический словарный запас у многих людей может быть и значительно меньшим: „... я употребляю 2000 слов... ; французский крестьянин... 600 слов; служащий, ремесленник... 1200 слов... ; мелкий буржуа... 1500 слов... ; только словарь людей, обладающих определенным уровнем культуры, достигает 2500 слов... Мои персонажи не рассказывают о тонкостях своего душевного состояния, а действуют”.

\*\*) Обсуждение вопроса об интуиции см. также в [57].

Но кроме этих знаний, у каждого имеющего некоторый опыт работы физика-профессионала есть еще знание о физическом мире, почерпнутое из знакомства с современными ему экспериментальными исследованиями, научными открытиями, техническими новинками и явлениями в природе. Эти знания носят иной характер, чем почерпнутые из курса обучения, они почти всегда не полностью понятны, содержат элементы неожиданного или необычного, но в то же время являются явлениями или событиями, образы которых запечатлеваются в памяти, так или иначе увязываясь с уже имеющимися в ней (т.е. запечатленными ранее) образами. Каждый образ такого типа, как правило, включает в себя несколько понятий или образов из различных областей классификационной схемы учебного курса, добавляя тем самым новые связи и вызывая новые аналогии, новое осмысливание имеющихся в памяти "старых" образов. Таким образом, усвоение нового частично сводится к распознаванию известных, похожих или аналогичных его черт в имеющихся образах памяти, а частично — к запечатлению в виде нового образа черт, не встречавшихся в памяти ранее.

Профессиональные знания, по-видимому, содержат теоретическое, классифицированное и схематизированное знание, почерпнутое из курса обучения (усредняющее и обобщающее результаты различных экспериментов), и знание, почерпнутое из собственного (а также из чужого) опыта, связанное с различными областями теории.

Наиболее естественный и общепринятый способ усвоения эмпирического знания — это создание какой-либо теоретической модели, описывающей эти новые для нас экспериментальные результаты, т.е. по сути — создание теории. Теоретическая схема модели, будучи компактной, позволяет запомнить лишь сущность нового явления, не перегружая память многочисленными несущественными деталями, второстепенными свойствами, конкретными числовыми данными, — математическая модель в виде формул, уравнений или алгоритмов существенно облегчает и усвоение и вспоминание нового материала. Подробнее вопрос о моделях явлений внешнего мира мы рассмотрим в гл. 5.

Компактная модель явления — это удобный способ его представления в памяти в виде единой цельной картины, образа. На практике, однако, у каждого из нас часто встречаются случаи, когда нужно запомнить целый ряд сведений, которые не удается (иногда из-за недостатка времени, а иногда из-за слишком большого объема и разнородного характера сведений) описать единой моделью или схемой. Примерами могут служить названия элементов в таблице Менделеева, расположение государств на карте мира, сведения из экономики и демографии, исторические факты, хими-

ческие и биохимические термины и т.п. В этих случаях, кроме постоянного повторного использования такого материала, помочь его запоминанию могут, как рекомендуют специалисты, различные мнемонические приемы [34, 100]. Большая часть этих приемов связана с тем или иным кодированием исходного материала, подлежащего запоминанию, и с более легким запоминанием закодированных сведений. В основе этих приемов лежит, по-видимому, то обстоятельство, что при этом закодированный материал запоминается в виде одной или нескольких цельных картин, каждая из которых включает целый ряд исходных символов, понятий, предметов, чисел.

### § 13. Понимание

**1. Поверхностное и глубокое понимание.** Согласно толковому словарю [49] понимание — это "та или иная точка зрения на что-либо, то или иное толкование, объяснение чего-либо". По Далю [13] понимать — значит "постигать умом, познавать, разуметь, уразумевать, обнять смыслом, разумом; находить, в чем смысл, толк, видеть причину и последствия".

Как видно из этих определений, понимание может быть либо "поверхностным" (что происходит? о чем идет речь?), либо углубленным (почему это происходит? с чем это связано?). В ряде случаев понимание почти неизбежно остается лишь поверхностным — так бывает, когда не имеется какой-либо простой модели или аналогии происходящего. В наше время к таким вопросам относятся, например, явления экономической жизни или погода — они касаются почти всех, но глубоким пониманием этих явлений обладают, вероятно, лишь немногие специалисты (см. гл. 5). В большинстве случаев, однако, имеются простые аналогии или модели происходящего — в этом случае понимание включает отыскание такой модели и установление с ее помощью связей с прошедшим и будущим, с другими явлениями, которые, казалось, не имеют отношения к происходящему.

Большинство практически используемых моделей являются динамическими: они позволяют прослеживать развитие событий во времени, или, иначе говоря, описывают некоторый сценарий. Отдельный кадр такого сценария — это один из образов модели.

Прежде чем переходить к обсуждению моделей различных явлений внешнего мира (см. гл. 5), рассмотрим вопрос о поверхностном понимании, о том, как можно было бы промоделировать сам процесс понимания — осознания того, о чем идет речь.

По сути, мы имеем здесь дело с распознаванием образа того явления, события, объекта, о котором идет речь в предъявленном нам высказывании.

Например, попытка промоделировать "более глубокое понимание" сцены при зрительном распознавании предполагает наличие в памяти определенных знаний об элементах, входящих в состав сцены, и об их взаимоотношениях. Иначе говоря, в памяти должна иметься некоторая модель событий, происходящих на сцене, включающая элементы этой сцены. В качестве простейшего примера такой попытки анализа сцены можно привести описанную в § 11 (гл. 3) систему "искусственный глаз – механическая рука", предназначенную для вытаскивания нужной детали из груды различных деталей. Искусственный глаз этой системы определял форму детали в выбранном участке "сцены" (каковой в данном случае являлось плоское изображение всей груды деталей), и далее система распознавала выбранную деталь – относила ее к одному из известных ей (т.е. занесенных заранее в память) классов деталей. Аналогичный принцип использован при анализе аэрофотоснимков аэропортов [103].

Попытка расширить "понимание" и возможности обычной экспертной системы состоит в присоединении к "поверхностным" знаниям (позволяющим системе давать рекомендации в ответ на запрос пользователя, не углубляясь в объяснение причин, почему именно так следует поступить или почему именно такой поставлен диагноз) другого, "глубинного", знания, основанного по сути дела на некоторой модели явлений в той предметной области, к которой относится действие данной экспертной системы [75].

Понимание текста сообщений (допустим, по телетайпу) о некотором событии или понимание вопроса пользователя (заданного, например, в письменной форме) в диалоговых системах предполагают построение модели тех событий, о которых сообщает телетайп или спрашивает пользователь. Если модель события известна, то известен и тот ограниченный "язык", на котором описываются события в данной модели. Ограниченный словарь языка модели обычно позволяет относительно просто находить в тексте "ключевые" слова модели и по простейшим правилам грамматики определять те переменные величины (наименования действующих лиц, наименование места действия, наименования различных вариантов действия согласно модели, время действия, один из вариантов исхода действия и т.п.), которые и дают конкретный пример работы модели в интересующем нас случае телетайпного сообщения или запроса пользователя. Подобный подход реализуется в автоматических системах анализа патентов, кратких телетайпных сообщений на определенную тему [96], запросов (в письменном виде) о перевозках, в описанной в § 8 гл. 3 системе AIRLINE.

Более глубокое понимание предполагает использование динамической модели описания событий. Такой является, например, система МЕСЧО для решения задач из области механики [101] и ряд аналогичных систем для решения задач из различных областей физики и математики [95].

Одна из возможностей расширения знаний экспертной системы или системы, предназначеннной для решения задач в некоторой области, – это введение эвристических правил общего характера (например, для решения задач это правила: "рассмотреть экстремальные случаи"; "сблизить" две переменные, присвоив им одинаковое значение"; "определить наиболее интересную эвристику"; "выбрать ту концепцию, которая требует меньше машинного времени"), позволяющих системе работать в различных предметных областях [31].

**2. Новичок и специалист. Инструкции и алгоритмы.** В одной из глав своей монографии [36] Миллер, Галантер и Прибрам обсуждают процесс приобретения навыка вождения самолета, основываясь на практическом опыте одного из авторов, полученном им в период написания указанной книги. Обсуждая постепенный переход в процессе обучения новым навыкам от последовательного осознанного выполнения различных этапов инструкции действий к автоматическому самостоятельному "умению", авторы подчеркивают, что "инструктор идет от стратегии к тактике в своих попытках сообщить План, в то время как обучающийся идет от тактики к стратегии в своих попытках выполнить его".

Спустя два десятилетия Ларкин, Мак-Дермот, Саймон и Саймон [95], обсуждая процесс решения задач из области кинематики (прямолинейное движение материальной точки) новичком и специалистом и проблему моделирования этого процесса решения задач на ЭВМ, отмечают следующее основное различие в способе решения у новичка и специалиста: "... новичок большую часть задач решает, идя от неизвестного решения к условиям задачи, тогда как специалист обычно прямо идет от условий к решению".

Таким образом, в обоих случаях (вождение самолета и решение задач) специалист в совершенстве владеет нужными алгоритмами и автоматически применяет их, новичок же последовательно использует отдельные инструкции (или отдельные части одной общей инструкции), выбирая и согласуя их.

При попытках моделирования процесса решения задачи на ЭВМ можно выделить два этапа: 1) понимание задачи, или перевод с языка, на котором задача сформулирована, на язык моделей; 2) выбор соответствующей модели или алгоритма. Первый этап представляет собой распознавание внешнего стимула – наход-

дение в памяти той модели, которая соответствует условиям задачи. Это проблема понимания текста (в данном случае – текста задачи). После того как задача понята, возникает вопрос о способе ее решения. Здесь и проявляется различие в подходах новичка и специалиста. Ларкин и др. [95], обсуждая моделирование на ЭВМ на языке продуцирующих систем, указывают, что здесь возможно моделирование обеих стратегий – "идущей вперед" стратегии специалиста и "идущей назад" стратегии новичка. В обеих системах каждое "действие" продуцирующей системы представляет собой одно из уравнений кинематики, а "условие" есть список переменных в этом уравнении. Эти две продуцирующие системы отличаются лишь в одном важном отношении. Для системы, моделирующей специалиста, правило действия таково: если известны значения всех независимых переменных в каком-либо уравнении (условие), попытайтесь найти зависимую переменную (действие). Для системы, моделирующей новичка, правило действия таково: если зависимая переменная в некотором уравнении есть искомая величина (условие), попытайтесь решить уравнение (действие), если значения некоторых независимых переменных неизвестны, поставьте цель – найти значения этих переменных.

Анализируя протоколы рассуждений различных людей во время решения задачи, авторы [95] указывают, что в памяти специалиста, по-видимому, имеются цельные представления (картины), процедуры (алгоритмы) для получения искомых величин из известных данных; специалист применяет такую процедуру и сообщает лишь полученный результат. В памяти же новичка имеются знания о том, что конкретные уравнения можно использовать для получения значений определенных переменных. Поэтому новичок сообщает, какими именно уравнениями в данный момент он пользуется и какие независимые переменные в них подставляет – для него это отдельные, последовательные шаги. Эти шаги отделены один от другого вопросом, задаваемым себе каждый раз: "что делать дальше?", и в результате новичок тратит на решение задачи время, по крайней мере в несколько раз большее, чем специалист.

Авторы [95] отмечают также аналогию между принципами решения задачи новичком или специалистом, с одной стороны ("пошаговым" решением новичка и "прыжками" специалиста), и работой ЭВМ, программа которой интерпретируется или компилируется, – с другой стороны. При работе с интерпретатором последний, получив команду выполнить следующий шаг, извлекает из памяти информацию о том, какой именно шаг следует сделать. При компилировании программы многие из этих шагов исключаются, целые последовательности шагов программы сли-

ваются в единые куски. В результате компилированная программа работает примерно на порядок быстрее.

Рассмотрим в качестве примера задачу из области механики, моделирование решения которой проводилось с помощью сравнения протоколов рассуждений людей, решавших эту задачу, и последовательностей действий ЭВМ, работавшей по программе МЕСНО [101], предназначеннной для моделирования процесса решения задачи человеком.

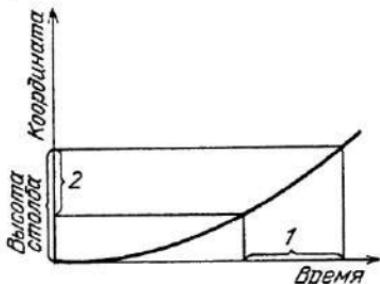


Рис. 4.7. К решению задачи о падении камня

"Камень, свалившийся с вершины столба, пролетает последние  $h$  метров до падения на землю за  $t$  секунд. Найти высоту столба".

Один из способов решения этой задачи специалистом представляется следующим. Специалист, вообразив равномерно-ускоренное (без учета ветра, сопротивления воздуха, вращения камня, движения Земли, конвекции воздуха и т.д.) движение камня, мысленно рисует параболу – зависимость пройденного пути от времени при нулевой начальной скорости (рис. 4.7). Далее ему нужно перемещать вместе пару отрезков 1 и 2 вдоль осей времени и координат и найти такое положение, чтобы они стали равными  $t$  и  $h$ ; координата верхней точки отрезка 2 будет искомой высотой столба. Задача "в принципе" решена, и найти численное (или буквенное) решение – дело техники.

Это – "сквозной" алгоритм, позволяющий за один прием найти решение, и им можно воспользоваться для решения на ЭВМ. Однако для этого нужно предварительно "перевести" условия задачи с естественного языка на язык модели: камень = точка; свалившийся с вершины = нулевая начальная скорость; пролетает... до падения на землю = прямолинейное движение с ускорением  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ; последние ... метров = отсчитанное расстояние (назад) от конечной точки пути; (последние) ... секунд = = время, отсчитанное (назад) от конечного момента движения. Если перевод завершен и в переведенном тексте удается далее распознать одну из заложенных в память задач (например, для механики это "равномерное движение точки до прямой", "рав-

номерно-ускоренное движение точки по прямой", "движение двух точек в одной плоскости", "пространственное движение системы точек, связанных стержнями с шарнирами", и т.д.), то далее включается соответствующий распознанной задаче алгоритм ее решения. В нашей задаче, завершив перевод и выяснив, что задача относится к области равномерно-ускоренного движения одной точки, можно пойти по пути решения задачи специалистом, например поручив ЭВМ найти каким-либо доступным ей способом

$$\min [gt_1^2/2 - g(t - t_1)^2/2 - h]^2,$$

произвольно меняя  $t_1$ , и, найдя значение  $t_1$ , соответствующее этому минимуму, записать ответ: высота столба =  $gt_1^2/2$ .

Различные программы, соответствующие моделированию способов решения подобных задач новичком, приведены в [101] и в ссылках к [95].

## § 14. Структура памяти

**1. Иерархия памяти.** Значительную часть нашей повседневной мыслительной деятельности составляет профессиональная мыслительная деятельность. То же, по-видимому, относится и к памяти — значительная ее часть содержит профессиональные знания. Эти профессиональные знания, при современной специализации, в каждой области знания определенным образом систематизированы. Примером такой систематизации является линнеевская схема животного и растительного мира в биологии [8], согласно которой сходные живые особи объединяются в вид, виды — в род, роды — в семейство, семейства — в отряд, отряды — в класс, а классы — в тип; несколько десятков типов, объединенных в царства, и составляют все множество животных и растений. Аналогичная классификация имеется и в любой другой науке: в физике эту систематизацию можно усмотреть в любом достаточно полном курсе общей или теоретической физики, например, в [30] или в [58]; такой курс делится на тома, каждый из которых посвящен определенной области физики, каждый том делится на главы, относящиеся к отдельным сторонам данной области, главы состоят из параграфов, в каждом из которых описывается определенный вопрос из данной главы, параграфы, в свою очередь, делятся на более мелкие части, имеющие самостоятельное значение и в то же время связанные между собой общей темой параграфа.

Будучи систематизированы в памяти в виде такой линнеевской схемы, знания связаны между собой и другим способом. Физик, если он имеет дело с каким-либо определенным явлением природы или конкретным экспериментом, воспринимает это природное

или экспериментальное явление как единое целое, и те знания из упомянутого курса физики, которые относятся к данному явлению, связываются для него между собой именно принадлежностью к этому одному явлению.

Таким образом, в памяти профессиональные знания в каждой области, будучи систематизированы в схемах типа линнеевской, в то же время соединены связями, возникающими при изучении отдельных явлений природы, при постановке эксперимента и самом экспериментальном исследовании.

Еще один распространенный вид связей между знаниями, представленными в виде линнеевской схемы, обусловлен самим языком — одинаковые названия или части названия, относящиеся к знаниям из различных, иногда далеких частей линнеевской схемы, подчеркивают сходство этих знаний. Подобным образом связаны, например, в физике гравитационная волна, волна де Броиля и морская волна.

Пользуясь представлением о линнеевской схеме образов памяти с указанными дополнительными связями между ними, можно попытаться сопоставить этой схеме двумерную карту простейших составных образов, подобную рассмотренной в § 12, но только гораздо большую. Каждая точка на такой карте, соответствующая некоторому простейшему составному образу, определяется двумя определенными координатами — числами, которыми обозначены две связанные между собой, имеющие самостоятельное значение части этого образа. Если в то же время части составного образа являются узлами линнеевской схемы, соединенными между собой согласно структуре этой схемы, то такая схема линнеевского типа и двумерная карта простейших составных образов будут соответствовать друг другу.

Далее нужно дополнить линнеевскую схему или двумерную карту простейших составных образов другими составными образами, соответствующими объединению отдельных линнеевских узлов в образах явлений природы, связями, соответствующими одинаковым названиям, и другими подобными связями.

Сопоставляя такой двумерной карте энергетическую карту, на которой энергия рассчитана для данной системы простейших составных образов в соответствии с формулой (25), можно рассмотреть блуждание стимула по карте между образами.

Случайное блуждание по такой двумерной карте при конечной температуре может моделировать "поток сознания" в данной области профессионального знания. Как и в случаях, рассмотренных в § 12, здесь также выделяются темы, соответствующие многократно встречающимся в простейших составных образах их частям, имеющим самостоятельное значение. При низкой темпе-

ратуре случайное блуждание происходит в основном в области вблизи какой-либо одной темы, изредка случайно происходит переход к другой теме и дальнейшее блуждание в этой новой области. При повышении температуры наблюдаются более частые переходы между темами, блуждание становится более случайнм.

Заметим, что при этом такими выделенными темами могут служить образы, соответствующие различным уровням иерархии в линнеевской схеме: для появления темы достаточно, чтобы некоторый узел линнеевской схемы был связан с многими другими узлами. Столбцы и строки энергетической карты, соответствующие таким узлам линнеевской схемы, будут обладать энергией более низкой, чем столбцы и строки карты, соответствующие узлам линнеевской схемы, имеющим относительно мало связей с другими узлами.

Таким образом, даже если весовые множители для разных образов (в выражении для энергии (25)) одинаковы, в системе образов возникает определенная иерархия: появляются темы, соответствующие узлам линнеевской схемы с наибольшим числом связей.

Блуждание в пределах одной темы соответствует осознанию центрального образа этой темы с некоторым "ореолом" из связанных с ним узлов линнеевской схемы. Если бы мы теперь начали следить лишь за переходами от одной темы к другой (считая блуждание внутри каждой темы осознанием центрального ее образа с "ореолом"), то каждые две связанные между собой темы стали бы играть роль новых простейших составных образов, которые, в свою очередь, могли бы объединяться в новые темы, — так возникла бы следующая ступень иерархии образов. При этом, однако, следовало бы "огрубить" энергетическую карту так, чтобы прежние темы стали составляющими новых образов.

Следовательно, представление о простейших составных образах позволяет, рассматривая блуждание стимула по двумерной карте, моделировать появление сложных образов — определенных тем — и показывает, как могла бы появиться в памяти столь часто используемая нами на практике иерархическая схема (типа линнеевской) профессиональных знаний. При этом, конечно, мы должны помнить, что такая схема дополняется системой связей (между теми же узлами), обусловленными, как указывалось выше, наличием в памяти сложных цельных образов явлений природы, одинаковыми наименованиями различных по сути образов и т.п.

Выявлению главных тем, т.е. появлениею иерархии в системе образов памяти, может способствовать следующее обстоятельство. Согласно одному из основных уравнений (3) рассматриваемой

нами модели, "матрица синаптических связей" меняется со временем, причем это изменение пропорционально квадратичной комбинации компонент вектора-стимула. Если рассмотреть теперь длительное блуждание стимула по двумерной энергетической карте при  $T = \text{const} \ll \mu$ , то изменение энергии со временем (из-за изменения матрицы синаптических связей  $V$  в соответствии с уравнением (3)) будет происходить очень медленно по сравнению с темпом блуждания.

Согласно (3) относительный вес образов, соответствующих на энергетической карте минимумам энергии, будет со временем возрастать, и при достаточно длительном блуждании из системы образов выделятся темы, обладающие наибольшим весом, между которыми и будет проходить блуждание.

Если первоначально веса всех образов были примерно одинаковыми, но некоторые из компонент простейших составных образов встречались чаще, чем другие, то именно эти наиболее часто встречающиеся компоненты будут соответствовать выделенным строкам и столбцам (с наименьшей энергией) на энергетической карте; они и определят темы, выделяющиеся в процессе углубления соответствующих потенциальных ям в результате нелинейного усиления в памяти наиболее часто встречающихся образов. Такие компоненты часто встречающихся образов станут собирающими наименованиями и образуют "верхний" уровень в намечающейся иерархии образов. Продолжая этот процесс блуждания по образам и усиления наиболее часто встречающихся образов, мы можем получить "многоступенчатую" иерархическую схему типа линнеевской.

**2. Линнеевская схема.** В диалогах, относящихся к профессио-нальной деятельности, а также в повседневной жизни мы обычно задаем собеседнику уточняющие вопросы. Часто они построены так, что ответом на них является либо "да", либо "нет", причем при ответе "нет", как правило, задается следующий вопрос: "В чем состоит отличие объекта (или явления), который имел в виду собеседник, от объекта, который мы представили, высушив его высказывание?".

Именно эти вопросы положены в основу игры "Угадай животное", ставшей популярной в последнее время в связи с распространением персональных компьютеров. Простой вариант программы такой игры приведен в приложении 2. В память вводятся названия двух животных, например "окунь" и "мышь". Пользователь по указанию ЭВМ задумывает животное. Машина задает первый вопрос: "Живет на суше?". При ответе "да" машина отвечает: "Мышь". Если пользователь, в свою очередь, говорит "да", машина ликует: "Победа!". В начале игры, как правило, поль-

ватель говорит "нет". Тогда ЭВМ спрашивает: "Ваше животное?". – "Слон". ЭВМ: "Какое имеет качество, отличающее его от мыши?". – "Большой". Эти два последних ответа записываются в память машины, после чего опять следует указание задумать животное. "Живет на суще?" – "Да" – "Большой?" – "Да" – "Слон!" – "Нет" – "Ваше животное?" – "Тигр" – "Какое имеет качество, отличающее от слона?" – "Имеет полосы". – "Задумайте животное". "Живет на суще?" – "Да" – "Большой?" – "Да" – "Имеет полосы?" – "Нет" – "Слон!" – "Нет" – "Ваше животное?" – "Бегемот" – "Что отличает его от слона?" – "Живет в воде" – и т.д.

Такой способ классификации объектов в памяти (бинарное дерево) позволяет ЭВМ по указанному ряду вопросов однозначно установить задуманное пользователем-игроком животное. Нужно заметить, что и вопросы, и объекты в этой игре – произвольные, ответы же здесь допускаются только "да" и "нет".

Этот способ классификации, основанный на противопоставлении (теза – антитеза), широко применяется, например, в ботанике. В качестве примера дадим выдержку из предисловия к "Определителю растений Казахской ССР" (Алма-Ата, 1969 г.):

"В "Определителе" приведены "ключи" (дихотомические таблицы) для определения названий семейств, родов, видов растений. Таблицы состоят из последовательных ступеней, каждая из которых имеет два раздваивающихся признака (тезу и антитезу). Один из них выбирается при определении вида растения. Цифра слева обозначает тезу. Антитеза обозначается знаком "–" (тире). Цифры, стоящие с правой стороны, отсылают к следующей ступени. Если

Т а б л и ц а 4.1

1. Споровые растения, никогда не образующие плодов и семян; размножаются спорами ... травянистые растения (папоротники, хвоци, плауны; отдел Высшие споровые, подотдел Папоротникообразные)	2.
– Семенные растения, размножающиеся семенами ... (отдел Цветковые)...	7.
7. (1) Растения голосеменные ... колосок – шишка...	8.
– Растения покрытосеменные... семена в ягодах, коробочках, зерновках	10.
8. Внутренние чешуйки покрова семяпочки вытянуты в трубку; семя – ложная ягода... древесина без смоляных ходов ... Семейство 9. Эфедровые.	
– Покров семяпочки не вытянут в трубку ... древесина со смоляными ходами (класс Хвойные)	9.
9. Колосок – настоящая шишка ... листья игольчатые, в виде хвои, спирально расположенные. Семейство 7. Сосновые.	
– Колосок – шишкоягода или сочная шишка... листья игловидные или чешуевидные ... Семейство 8. Кипарисовые.	

последней цифры ссылки в таблице нет, то мы подойдем в "Ключе для определения семейств" (см. табл. 4.1) к определенному семейству, а в соответствующей таблице (см. табл. 4.2) — к интересующему нас роду и, наконец, виду, к которому относится определяемое растение.

Приведем пример. Возьмем заранее известное нам растение — сосну лесную, растущую дико на севере и зачастую встречающуюся в культуре на юге. Сначала надо определить по "Ключу для определения семейств", к какому семейству относится сосна лесная. В 1-й ступени этой таблицы, сравнив тезу (споровые растения, никогда не образующие плодов и семян...) и антитезу (семенные растения, размножающиеся семенами...), выбираем антитезу с переходом на 7-ю ступень. В 7-й ступени выбираем тезу (растения голосеменные...), переходим на 8-ю ступень. С антитезы 8-й ступени (покровов семяпочки не вытянут в трубку...) переходим на 9-ю ступень. Теза 9-й ступени (колосок — настоящая шишка с многочисленными деревянистыми чешуями; листья игольчатые в виде хвои, спирально расположенные...) приводит нас к семейству: 7. Сосновые.

По оглавлению "Определителя" на соответствующей странице находим указанное под номером 7 семейство и, сравнивая тезу и антитезу 1-й ступени, выбираем антитезу (листья жесткие и плотные, одиночные или в пучках по 2—5, вечнозеленые...) со сноской на 2-ю ступень. Во 2-й ступени выбираем тезу (листья на коротких побегах, сидят по 2—3 или по 5) и подходим к роду: 4. Сосна. Затем находим этот род под номером 4 и, наконец, сопоставляя тезу и антитезу, определяем вид сосны:

1. Листья в пучке по 2 (3), жесткие, 4—7 см длиной; зрелые шишки яйцевидно-конические, серые, матовые, 3—6 см длиной, 2—4 см шириной, чешуи с почти ромбическим 4—5-гранным щитом

#### Таблица 4.2

##### Семейство 7. Сосновые.

1. Листья (хвоя) мягкие ... в пучках по 20—60... на зиму опадающие ... Род 3. Лиственница.
  - Листья (хвоя) жесткие ... одиночные или в пучках по 2—5 ...  
... вечнозеленые... 2.
2. Листья на коротких побегах ... по два—три или по пять. Род 4. Сосна.
  - Листья все одиночные... 3.
  3. Листья плоские ... Род 1. Пихта.
  - Листья четырехгранные: ... Род 2. Ель.
- Род 4. Сосна.
  1. Листья в пучке по два (три), жесткие... 1. Сосна лесная.
  2. Листья в пучке по пять, довольно мягкие ... 2. Сосна сибирская.

ком; семена мелкие, с крылом. Дерево до 30 м высоты, с широкой округлой короной, цветет май–июнь, плодоносит июль–август. Образует чистые или в смеси с лиственными леса сев., центр. и сев.-вост. Казахст. Технич., дуб., смол., лек., декор. 1. С. лесная (обыкнов.; каз. карагай). – *P. sylvestris L.*".

При определении вида растения в приведенном примере нам пришлось семь раз выбрать между тезой и антитезой. Вообще такая дихотомическая система (или "бинарное дерево") имеет среднюю длину пути (ожидаемое число ключевых сравнений), равную двоичному логарифму числа узлов в случае, когда "дерево" сбалансировано, т.е. когда каждый узел имеет ровно два подузла. В наихудшем же случае, когда дерево вырождается в простой список, средняя длина пути в два раза меньше числа узлов [9].

Поэтому, например, сведения о каждом из 1000 авиарейсов [97, 108] можно в такой структуре найти, выбрав между тезой и антитезой в среднем десять раз. Доступ к каждой из 50 000 "картинок" в памяти при их расположении в виде бинарного дерева потребовал бы в среднем около полутора десятков выборов между тезой и антитезой.

### § 15. Цели мышления

**1. Социальные стереотипы.** Чем определяется круг тех вопросов, тем, проблем, событий, которые составляют предмет нашего мышления? По-видимому, само мышление служит для решения задач жизнеобеспечения – удовлетворения наших физических и духовных потребностей в обществе и в Мире, который нас в данный момент окружает. Задачей жизнеобеспечения определяются цели, к достижению которых мы должны стремиться. Эти цели в значительной степени определяются той жизненной ролью (идеалом, стереотипом), которая в каждый данный момент кажется нам наиболее соответствующей нашему "я", нашему мироощущению. Жизненная роль, как правило, соответствующая одному из принятых в обществе стереотипов, и определяет множество целей, которые очерчивают круг нашего мышления.

В рамках рассматриваемой нами модели можно представить себе размыщение о таких определенных целях (и о способах их достижения), как блуждание по образам памяти, связанным с образом выбранной жизненной роли. Подобное блуждание может привести к появлению цельной, единой темы жизненной роли, и эта тема станет цельным, единым образом памяти. Если вес  $\mu$  такого образа достаточно велик, то энергия, соответствующая ему, будет очень низкой, и при самых разнообразных начальных значениях стимула в результате его релаксации мы можем прийти

к образу памяти, соответствующему нашей жизненной роли. Таким способом можно было бы моделировать то обстоятельство, что мы постоянно помним о своих главных задачах в жизни.

Если главные жизненные цели (в данный момент) определены, то при поиске способов их достижения в данном окружающем обществе и в данном мире возникают конкретные цели, задачи и способы их решения. При той степени разделения труда, которая свойственна нашему времени, знания, соответствующие каждой жизненной роли, в значительной степени являются профессиональными. Возможную структуру таких знаний в памяти мы обсуждали в § 14. Если теперь к образам профессиональной памяти (схема типа линнеевской, дополненная связями, соответствующими цельным образом явлений внешнего мира, и другими связями, о которых говорилось выше) мы добавим образы (по предположению, обладающие большими весами, т.е. низкой энергией) конкретных целей, задач и способов их решения, соответствующих выбранной жизненной роли, то мы получим схему, блуждание по образам которой могло бы описать процесс мышления в целом.

Здесь нужно сделать следующее замечание. В рамках рассматриваемой модели мы можем выявить определенную цель, приписав соответствующему ей образу памяти достаточно низкую энергию – для этого достаточно выбрать множитель  $\mu$  в выражении для энергии (1а), (25) достаточно большим. Однако, чтобы ответить на вопрос, чем именно определяется выделение в данный момент в качестве главенствующей некоторой цели, нужно было бы попытаться промоделировать решение человеком задачи о выборе стратегии, оптимальной для достижения главных целей, соответствующих его представлению о своей жизненной роли. Такое моделирование предполагает выбор определенной психологической модели человека, производящего выбор стратегии, и выходит за рамки нашего рассмотрения (см. [47]).

Выбрав определенную цель в модели процесса мышления путем приписывания образу этой цели достаточно низкой энергии, мы, по-видимому, можем промоделировать тем самым то обстоятельство, что мы постоянно помним о необходимости искать пути для достижения поставленных перед собой конкретных целей, о необходимости искать еще не найденное решение задачи, соответствующей достижению такой цели. Действительно, достаточно широкий набор начальных стимулов при релаксации будет попадать в "потенциальную яму", соответствующую образу нашей конкретной цели, нерешенной задачи, и напоминать о необходимости ее решения.

Вопрос же о том, как конкретно решается та или иная задача, мы рассматривали выше (§ 12, 13): это, как правило, находде-

ние аналогии с известным ранее, выбор модели явления и ее использование для предсказания событий, оптимизации и обобщения.

2. "Ханойская башня". Пример решения задачи путем приписывания образу цели низкой энергии. Рассмотрим пример решения задачи с помощью случайного блуждания в условиях, когда состоянию системы, соответствующему искомому решению, приписывается достаточно низкая энергия, а само случайное блуждание по состояниям системы производится, как в методе Монте-Карло, с учетом формулы Больцмана, описывающей распределение по состояниям с различной энергией при некоторой конечной температуре.

В качестве примера выберем задачу, носящую название "Ханойская башня" [17] (рис. 4.8). В этой задаче требуется перенести кружочки детской пирамидки с одной палочки на другую, уложив их в конце концов в том же порядке, как и в начале, — меньшие кружочки на больших. При переносе нужно пользоваться третьей палочкой, на которую можно временно помещать кружочки, но при этом и на ней над кружочком может лежать только меньший. Имеются различные алгоритмы для решения этой задачи, минимальное необходимое число перемещений для  $n$  кружочков равно  $2^n - 1$ .

Мы, однако, поступим следующим образом. Мы не будем искать какой-либо определенный регулярный способ перемещения кружочков, который в конце концов приведет нас к цели (перенести пирамидку на какую-либо из двух свободных вначале палочек), а вместо этого начнем перекладывать кружочки с одной пирамидки на другую, случайно выбирая на каждом шагу пару пирамидок

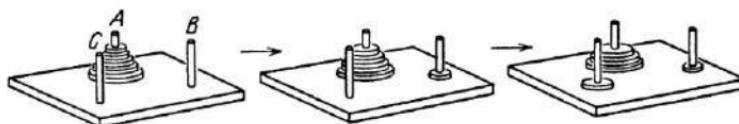


Рис. 4.8. "Ханойская башня"

(ту, с которой мы снимаем кружочек, и ту, на которую его переносим) и следя только за тем, чтобы больший кружочек не оказался лежащим на меньшем — такие варианты мы будем отбрасывать.

Такие перемещения кружочков мы будем производить мысленно, используя ЭВМ (мы увидим, что число этих перемещений окажется довольно большим — для переноса пирамидки из пяти кружочков потребуется несколько сотен перемещений) и руководствуясь следующим правилом. Каждой из конфигураций системы (т.е. каждому из расположений кружочков на всех трех пи-

рамидках) мы припишем определенное значение энергии, зависящее от самой этой конфигурации. Производя каждое перемещение кружочка, будем подсчитывать два значения энергии — для старой и новой конфигурации. Если энергия новой конфигурации ниже, чем старой, то перемещение производится. Если же новая энергия больше старой на величину  $\Delta E$ , то перемещение производится с вероятностью  $\exp(-\Delta E/T)$ , где  $T$  — выбранная нами температура системы. Фактически после подсчета значения  $\exp(-\Delta E/T)$  выбирается случайное число, лежащее между нулем и единицей, и перенос кружка производится, если это число оказывается меньше, чем  $\exp(-\Delta E/T)$ , в противном случае мы отказываемся от переноса кружка, конфигурация остается старой, и мы переходим к новой попытке переноса.

Пример программы приведен в приложении 3. Зависимость энергии от конфигурации системы можно выбрать по-разному, нужно только, чтобы энергия состояния, к которому мы стремимся, была достаточно низкой. Можно выбрать, например, эту энергию в следующем виде:

$$E = -1/[0,1 + (O(3,1) - 3)^2] - 1/[0,1 + (O(3,2) - 2)^2] - \\ - 1/[0,1 + (O(3,3) - 1)^2]. \quad (30)$$

Это выражение (оно написано для случая трех кружочков) составлено так, что если в самом нижнем положении на палочке 3, вначале бывшей пустой, появляется кружочек под номером 3 (т.е. самый большой), то энергия системы резко уменьшается (она падает от значения, большего  $-1$ , до значения, примерно равного  $-10$ ) и, при достаточно низкой температуре (например,  $T = 1$ ), перенос этого кружочка в какое-либо другое состояние оказывается маловероятным. Дальнейшее значительное понижение энергии системы произойдет, когда в "нужное" положение становится кружочек с номером 2 и т.д. Практически при таком выборе энергии система приходит к искомому состоянию за несколько десятков шагов.

Аналогично можно поступить и для случая произвольного числа кружочков, составляющих пирамидку. Для пяти кружочков, например, при выборе энергии в виде, аналогичном (30), цель оказывается достигнутой после нескольких сотен перестановок кружочков. Конечно, это намного превышает необходимое число шагов при регулярных алгоритмах, однако для нас важен принципиальный результат — приписывание образу цели достаточно низкой энергии при случайном переборе конфигураций приводит к решению задачи.

Оказывается, можно резко сократить число шагов, приводящих к цели, если дать ЭВМ инструкцию: запомнить ту последователь-

ность перестановок кружочков, которая привела к цели, а затем устраниТЬ "замкнутые петли" в этой последовательности (т.е. все части последовательности, начинающиеся с какой-либо конфигурации и кончивающиеся ею же). При этом, например, для четырех кружочков число шагов уменьшается с 200–300 до 17–20.

Заметим, что регулярные алгоритмы, которые обсуждаются в [17] применительно к задаче о "Ханойской башне", – это алгоритмы, использующие понятия рекурсии и итерации. Рекурсивный процесс решения основан на идеи сведения задачи об  $n$  кружочках к задаче об  $n - 1$  кружочке и формулируется так:

"1. Перенести пирамидку из  $n - 1$  кружочков с исходной палочки на вспомогательную.

2. Переложить  $n$ -й кружочек с исходной палочки на конечную.

3. Снова перенести пирамидку из  $n - 1$  кружочков, на этот раз – со вспомогательной палочки на конечную".

Поскольку решение для маленькой пирамидки – за двух или трех кружочков – легко находится, этот рекурсивный алгоритм дает решение задачи для произвольной пирамидки.

Итерационный алгоритм [17] выглядит так:

"1. Перенести наименьший кружочек с той палочки, на которой он находился в данный момент, на палочку, следующую по часовой стрелке.

2. Перенести любой кружочек, кроме наименьшего".

К сожалению, эти красивые и эффективные алгоритмы применимы только для данной конкретной задачи – они становятся не применимыми при небольшом изменении условий задачи \*). В то

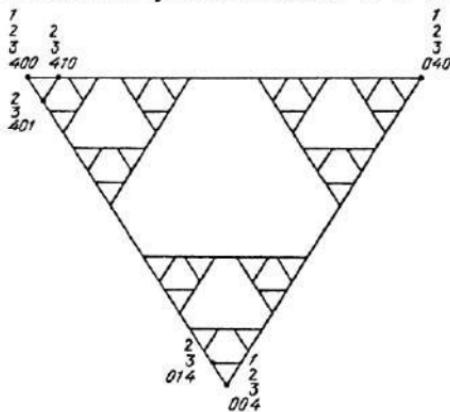


Рис. 4.9. Диаграмма состояний для игры "Ханойская башня"

\* ) Следить за перестановками кружочков удобно на диаграмме состояний системы, изображенной (для случая четырех кружочков) на рис. 4.9 (И.Б. Стечкина, О.П. Иванов). На этой диаграмме легко увидеть и кратчайший путь перехода от одного произвольного расположения кружочков к другому.

же время рассмотренный нами способ случайного блуждания и стремления к цели при постепенном понижении энергии — достаточно универсальный, его можно применять, с соответствующими изменениями, для решения самых различных задач.

При решении таким способом на ЭВМ задачи о возвращении на "свои" места шашек в игре "15" можно минимизировать, например, сумму (по всем шашкам) квадратов "расстояний" от исходного положения до "своего". В этом случае почти все шашки довольно быстро возвращаются на свои места, а затем идет медленный процесс "диффузии дырки" на свое место с координатами (4, 4). Диаграмма состояний для игры "15" ( $= 4 \times 4 - 1$ ) гораздо сложнее, чем для "Ханойской башни" — даже для значительно более простой игры "5" ( $= 2 \times 3 - 1$ ) диаграмма состояний представляет собой "тридцатикратно вырожденный" икосаэдр (И.Б. Стечкина, О.П. Иванов). Каждой вершине икосаэдра соответствует одна из следующих комбинаций чисел 1, 2, 3, 4, 5: 1, 2, 3, 4, 5; 2, 3, 1, 4, 5; 1, 3, 4, 2, 5; 1, 2, 4, 5, 3; 1, 4, 2, 3, 5; 1, 2, 5, 3, 4; 4, 3, 5, 2, 1; 5, 3, 2, 4, 1; 5, 4, 2, 1, 3; 5, 2, 4, 3, 1; 5, 4, 1, 3, 2; 5, 4, 3, 2, 1. "Тридцатикратное вырождение" означает возможность в каждой из этих комбинаций поставить единицу на одно из шести мест, а нуль — в один из пяти "промежутков" между пятью числами 1—5:  $5 \times 6 = 30$ .

Попытка непосредственного решения на ЭВМ аналогичным способом задачи о  $3 \times 3 \times 3$ -кубике Рубика оказывается безуспешной: возвращение кубика в правильное положение (из произвольного исходного положения, полученного, в свою очередь, последовательностью случайных вращений из правильного положения), соответствующее минимуму энергии, затруднено наличием большого числа глубоких потенциальных ям, встречающихся на этом пути. Однако сборка кубика Рубика может быть проведена последовательными этапами [26]: перемещение на свои места 12 реберных кубиков; их ориентация; перемещение угловых кубиков на свои места (при этом не затрагиваются реберные кубики); ориентация угловых кубиков. Каждую из этих задач, конечно, можно решить на ЭВМ с помощью процесса случайного блуждания, последовательно задавая минимальную энергию цели каждой задачи.

В рассмотренном примере метод решения различных задач с помощью блуждания по конфигурационному пространству системы при постепенном понижении энергии системы в процессе приближения к цели оказывается достаточно эффективным и может использоваться даже и в тех случаях, когда существует (или можно попытаться найти) регулярный алгоритм типа рекурсационного, итерационного и т.п. Во многих задачах, в связи с их внутренней сложностью или неоднородностью данных, само существование регулярного алгоритма кажется сомнительным, и здесь стохasti-

ческий подход часто, по-видимому, является самым простым. При этом следует заметить, что в каждой конкретной задаче можно ввести, кроме конечной цели, обладающей наименьшей энергией, еще и ряд промежуточных целей, энергия которых занимает положение, промежуточное между исходной и конечной энергией. В этом случае путь системы к конечной цели становится более определенным, чем при наличии одной лишь конечной цели, и время движения к цели сокращается.

Мы хотим подчеркнуть, что рассмотренный способ решения задач, по-видимому, моделирует процесс мысленного решения задачи о достижении некоторой определенной цели человеком. В этом последнем случае происходит блуждание по системе образов памяти (например, простейших составных) при постепенном понижении энергии стимула по мере приближения к образу цели. Этот процесс аналогичен блужданию по конфигурационному пространству рассмотренных задач в процессе понижения энергии и стремления к цели.

---

## ГЛАВА 5

### МОДЕЛИ МИРА

Мы видели, что каждый живой организм, от бактерии до человека, реагируя на явления и предметы внешнего мира, тем самым "носит в себе" модель внешнего мира. Для бактерии это химические вещества различных типов, неоднородно распределенные в окружающей ее воде, и неоднородная освещенность раствора. Для некоторых простейших это еще и анизотропия освещенности воды, в которой они плавают, температура и давление, их градиенты. Модель мира в "памяти" моллюсков с их более разнообразным поведенческим репертуаром уже гораздо богаче. Насекомые, особенно общественные, имеют уже развитую систему передачи сигналов от одних членов сообщества другим — для каждого из них внешний мир уже включает, кроме окружающей природы, еще и свое сообщество с его "кастовым" устройством, сложными сооружениями, коллективными действиями.

Таким образом, каждый организм носит в себе некоторую модель мира; "копия мира", пусть крайне упрощенная, схематичная и несовершенная, есть в каждом живом существе.

Мышление человека — это "модель мира в движении". Все бытовые, профессиональные, культурные знания человека, сосредоточенные в образах его памяти, — это его модель мира, проецирующаяся в процессе мышления в каждый момент на одну из своих граней. В процессе познания мира каждым человеком его модель мира совершенствуется — углубляется, уточняется, становится более богатой. Благодаря языку, благодаря развитой системе связей и коммуникации между людьми новые сведения о мире, полученные отдельным человеком, новое осознание закономерностей явлений природы и общественной жизни отдельными людьми становятся достоянием всего общества и используются им в своей деятельности. Таким образом, в отличие от других живых существ, модель мира у человечества в течение всего исторического периода постоянно развивалась и совершенствовалась.

Как и у всех многоклеточных организмов, образы памяти у человека "записаны" в виде сложных надмолекулярных структур отдельных нейронов, объединенных в "сверхструктуры",

принадлежащие нейронным сетям. Эти структуры подвержены процессам релаксации (перестройки) и восстановления в процессах распознавания; перестройка этих структур происходит и при обучении (см. гл. 1 и 3).

Свойство обмениваться сигналами присуще всем живым организмам, даже бактериям и простейшим. У живых существ, ведущих общественный образ жизни, среди образов памяти есть такие образы, которые соответствуют различным универсальным сигналам, служащим для передачи сообщений от одних членов сообщества другим. У человека этой цели служит устная и письменная речь; язык, в частности, позволяет людям на каждом этапе развития человечества вырабатывать более или менее общепринятую картину мира, его модель.

Универсальные сигналы у животных, служащие для передачи сообщений, соответствуют универсальным же действиям, приблизительно одинаковым для различных членов сообщества. Отсюда, по-видимому, проистекает и механизм подражания, мобилизации, свойственный ряду общественных животных (см. § 3 гл. 1).

Здесь мы снова встречаемся с явлением категоризации в мире живого: роли, функции живых существ в сообществе дифференцированы, разбиты на ряд отдельных категорий (такая дифференцировка встречается даже у низших беспозвоночных — актиний, коралловых полипов и медуз: в колониях этих организмов одни индивидуумы специализированы для питания, другие — для размножения [8]). Различие функций у разных членов сообщества вызывает у них и различные варианты стереотипного поведения в ответ на одно и то же сообщение.

У человека с его непрерывным совершенствованием орудий труда и передачей опыта от поколения к поколению это разделение обязанностей достигло в наше время очень высокой степени развития и охватило, в частности, и профессионалов, овладевающих знанием. "Многие из математиков устраиваются в каком-нибудь закоулке математической науки, откуда они и не стремятся выйти, и не только почти полностью игнорируют все то, что не касается предмета их исследований, но не в силах даже понять язык и терминологию своих собратьев, специальность которых далека от них" [4].

Однако при всей своей сложной структуре современная наука остается тем не менее единой и, непрерывно обогащая нас новыми экспериментальными открытиями и новыми теориями, служит дальнейшему совершенствованию нашей модели мира.

Мы видели в гл. 3 и 4, что именно несовершенство моделей явлений внешнего мира осложняет "глубинное" понимание, в частности, при моделировании на ЭВМ процесса решения задач, выбора стратегий и других элементов мышления человека [48, 106].

Рассмотрим поэтому некоторые современные представления о мире, выделив условно прежде всего науку о Земле, а также естественные науки в целом.

Наука о Земле многообразна – она включает науку о самой планете, об ее истории, строении, климате, погоде, о растительном и животном мире и о человеке. Многие разделы этой науки чрезвычайно сильно развились в наше время, в эпоху научно-технической революции. В § 16 мы рассмотрим некоторые модели, развитые в последние годы и представляющие собой попытку описания ряда процессов, происходящих на Земле.

## § 16. Наука о Земле

**1. Модели климата [37].** Современные модели климата – многолетнего режима погоды, свойственного той или иной местности на Земле, используют математическое описание процессов переноса солнечного излучения, попадающего в атмосферу (и вызывающего в ней химические реакции и конвективное движение), поглощение этого излучения сушей и океаном, их тепловое излучение, циркуляцию нагреваемых атмосферы и океана, перемещение влаги в атмосфере и соли в океане, а также выделение тепла на суше в результате деятельности человека.

В результате решения на современных ЭВМ уравнений, описывающих все эти процессы, в течение последних десятилетий в ряде стран получены сведения о величинах, измеряемых метеорологами в наше время, об изменении климата в прошлом и о вероятных сдвигах климата в будущем.

Тем не менее на основе существующих моделей еще невозможно дать климатический прогноз отдельного региона какой-либо страны сроком на 10–15 лет. Одни модели, более простые, недостаточно адекватно отражают реальные процессы, определяющие климатические изменения; другие, более полные, требуют слишком большого времени для расчета на современных ЭВМ.

Имеются и трудности принципиального характера – даже простые системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающие идеализированные частные модели отдельных климатических процессов, будучи по своей природе детерминистскими, тем не менее имеют решения хаотического характера ("странный аттрактор" Лоренца). Возможно, сам климат соответствует набору состояний вблизи "притягивающих точек" множества метеорологических переменных, а климатическая изменчивость соответствует переходам между различными такими точками.

Разработанные для расчета климата математические модели использовались [37, 55] для оценки климатических изменений на Земле в случае ядерной войны в предположении, что главной

причиной таких изменений оказалось бы образование в атмосфере тысяч облаков пыли и дыма от ядерных взрывов, пожаров в лесах и городах. Такие облака, поднявшиеся на высоту 20 км, распространялись бы над зоной умеренных широт северного полушария и в течение примерно недели более или менее равномерно перемешались с окружающим воздухом, образовав плотную "завесу", закрывающую Землю от солнечного света. Сильное поглощение солнечного света может продолжаться несколько недель или месяцев после ядерного конфликта. В зонах ядерного удара при этом даже в полдень будет темно. Образование больших количеств дыма и пыли в атмосфере в течение нескольких дней приведет к падению температуры воздуха у поверхности суши на несколько десятков градусов, может погубить урожай, за несколько недель волна темноты и холода должна распространиться на тропики и вызвать там настоящую экологическую катастрофу. Штормы и осадки должны охватить прибрежные зоны шириной около 100 км вдоль береговой линии. "Ядерная зима" продолжалась бы несколько месяцев после ядерной войны и могла бы привести к разрушениям окружающей среды и нарушениям всей экологической системы Земли, губительным для человека.

**2. Рост растений.** Жизнь на Земле есть, по сути, сложный процесс поглощения солнечного света [5].

Около 1% солнечной энергии, падающей на Землю, поглощается растениями. В результате растения ежегодно связывают углекислый газ атмосферы (и воду) в количестве около 150 млрд т сухого органического вещества — порядка 1 кг сухого вещества с 1 м<sup>2</sup> за год. Часть этого органического вещества потребляется растительноядными животными, которыми, в свою очередь, питаются хищники и человек. Растительные и животные остатки разлагаются бактериями и грибами до уровня исходных неорганических веществ. Круговорот веществ замыкается, энергия же солнечного света, поглощенная растениями, переходит в тепло и излучается Землей в космос.

Таким образом, современная биосфера Земли существует благодаря фотосинтезу — образованию сложных органических веществ из простых неорганических за счет поглощаемой световой энергии.

Для нашей цели — упрощенного рассмотрения процесса использования солнечной энергии для фотосинтеза в зеленых растениях на примере яровой пшеницы — удобно разделить весь жизненный цикл этого однолетнего растения на четыре этапа: 1) прорастание семян и появление всходов, 2) рост листьев и стебля, 3) цветение растения и формирование колоса, 4) налив зерна. Мы не будем рассматривать сложные этапы 1 и 3, воспользовавшись тем, что

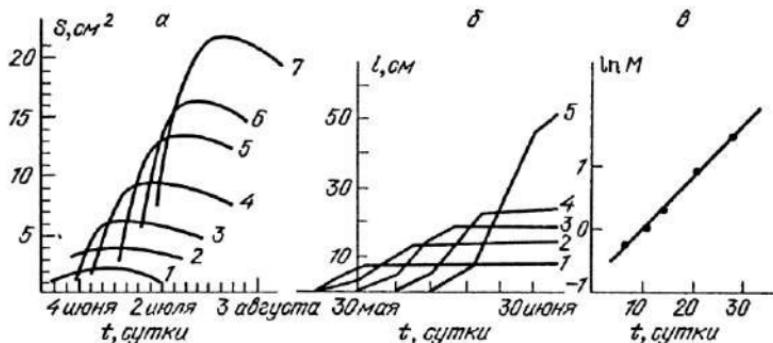


Рис. 5.1. Зависимость площади листьев (а) и длины междуузлий стебля (б) пшеницы от времени. Экспоненциальная зависимость массы  $M$  (в относительных единицах) растения пшеницы от времени (в)

эти этапы относительно короткие — примерно одна и две недели соответственно. Ограничимся рассмотрением двух длительных этапов в жизни растения пшеницы — роста листьев и стебля (до выметывания колоса), продолжающегося полтора — два месяца, и налив зерна — около полутора месяцев.

Графики роста листьев и отдельных междуузлий стебля пшеницы приведены на рис. 5.1 (по оси ординат отложены число и месяц; цифры на кривых — номер листа или междуузлия). Из этих графиков видно, что каждый последующий лист начинает расти только после того, как практически закончился рост предыдущего листа. Последовательный рост листьев однолетнего злака — яровой пшеницы, выработавшийся и закрепленный в результате эволюции этого растения, связан, по-видимому, с тем, что продолжение процесса экспоненциального роста каждого листа (удвоение примерно за 8 ч) привело бы к противоречию с ограниченным корневым питанием листьев растения. По окончании роста лист продолжает фотосинтезировать, появляющиеся в результате фотосинтеза сахара используются для процессов роста и метаболизма следующего листа\*).

Если, например, каждый лист растет определенное время  $t$ , а затем прекращает свой рост (и начинается рост следующего листа), то площадь листьев будет определяться соотношениями

$$S_n = \begin{cases} S_1, n = 1, \\ S_1 A (A + 1)^{n-2}, n \geq 2, \end{cases}$$

\*). Полное время роста 8–10 листьев пшеницы составляет 7 дней  $\times$   $(8 + 10) = 56 \div 70$  дней, т.е. те самые полтора — два месяца, о которых говорилось выше.

где  $S_1$  – площадь первого листа,  $n = 1, 2, 3, \dots$  – номер листа,  
 $A = e^{\Gamma t_1} - 1$

– отношение площади данного выросшего листа к суммарной площади предшествующих листьев,  $\Gamma$  – относительная скорость прироста полной площади листьев растения. При выводе этих формул сделано предположение, что листья не затеняют друг друга, скорость увеличения площади листа пропорциональна суммарной площади всех листьев растения и начальная площадь каждого растущего листа пренебрежимо мала по сравнению с его конечной площадью. Полная площадь листьев растения и, следовательно, его масса, экспоненциально растут со временем:

$$\sum_{n=1}^N S_n = S_1 e^{\Gamma t}; \quad t = t_1(N-1). \quad (31)$$

Такой закон роста массы растения со временем действительно наблюдается в эксперименте, в котором корни растения находились в воде (естественно, с достаточным количеством растворенных в ней ионов, используемых растением в качестве питательных веществ). При этом оказалось, что относительная скорость роста массы корней растения (составляющих для этих молодых растений около 25% всей массы) точно совпадала с относительной скоростью роста массы зеленой части растения. Если корень пшеницы находится в естественных условиях, в почве, то его рост несколько отстает от роста листьев, однако и в этом случае для роста зеленой массы растения можно по-прежнему пользоваться формулой (31) с инкрементом  $\Gamma$ , значение которого определяется интенсивностью падающего света.

Таким образом, масса отдельного растения пшеницы, освещенного постоянным потоком света, растет со временем экспоненциально. Это обусловлено тем обстоятельством, что прирост массы растения за единицу времени пропорционален площади всех листьев, и, следовательно, пропорционален полной массе растения в данный момент времени.

В фазе налива зерна продукты фотосинтеза, образующиеся в основном в верхних, больших по размеру листьях, поступают в зерна колоса, и в клетках этих зерен происходит поликонденсация сахаров, выработанных в листьях в процессе фотосинтеза, в молекулах крахмала.

Если масса отдельного растения на свету увеличивается со временем экспоненциально, то в густом посеве это не так. Здесь листья соседних растений затеняют друг друга, и если посев настолько густой, что лучи света полностью поглощаются растениями (и не попадают на поверхность почвы), то масса каждого рас-

тения при освещении постоянным во времени потоком света будет увеличиваться со временем линейно. Действительно, полная энергия, поглощенная единицей площади посева при постоянном световом потоке, растет со временем линейно; если эффективность фотосинтеза постоянна, то линейно со временем будет увеличиваться и масса растений пшеницы на единичной площади посева. Поскольку число растений на единице площади не меняется, линейно со временем будет увеличиваться и масса одного растения.

В естественных условиях эффективность фотосинтеза меняется в течение дня, в основном из-за изменений интенсивности света и температуры. В течение дня интенсивность солнечного света меняется, достигая максимума в полдень и обращаясь в нуль на заходе и при восходе солнца. При этом оказывается, что даже в средних широтах интенсивность физиологически активной радиации в полдень заметно превышает оптимальное значение, соответствующее наилучшим условиям роста пшеницы: интенсивность света, поглощающегося в листе, оказывается слишком большой, не соответствует концентрации молекул углекислого газа. Поэтому не все поглощенные электроны могут использоваться в процессе фотосинтеза для усвоения молекул углекислого газа и включения их в сахара. Следовательно, скорость фотосинтеза при увеличении интенсивности света перестает расти.

Дневные изменения температуры также неблагоприятно влияют на скорость фотосинтеза в естественных условиях. В течение дня температура меняется от низкой при восходе солнца до наивысшей в полуденные часы и затем снова до низкой к заходу солнца. Оптимальной для фотосинтеза является температура около 25 °С.

При температуре выше 25 °С эффективность фотосинтеза падает в основном из-за того, что ферменты, участвующие в процессах фотосинтеза, в этом случае работают хуже, а также из-за того, что относительный вклад процесса фотодыхания (поглощающего энергию, вырабатываемую при фотосинтезе) увеличивается с ростом температуры. Если же температура растения опускается ниже оптимальной, то замедляются процессы переноса питательных веществ между корнями и листьями. Это также приводит к уменьшению эффективности фотосинтеза.

Следующий эффект, который нужно учесть при теоретической оценке эффективности фотосинтеза в естественных условиях, связан с тем, что в первый месяц развития посева (даже при относительно густом посеве, соответствующем урожаю порядка 100 ц/га) растения пшеницы не полностью закрывают листьями находящуюся под посевом почву. Поэтому при расчете нужно учитывать, что полная доля физиологически активной радиации, пог-

лощенной растениями, равна доле поверхности почвы, занятой проекцией на нее листьев.

Чтобы эффективность фотосинтеза растений была высокой, необходимо выполнение еще нескольких условий, связанных в основном с качеством почвы, в которой находятся корни. Это достаточная обеспеченность растения продуктами минерального питания — азотом, калием и фосфором, определенные значения водородного показателя и ионной силы почвенного раствора (т.е. воды с растворенными в ней минеральными ионами) и, наконец, достаточная обеспеченность растений почвенной водой.

Если энергия солнечного света, падающего в течение года на поверхность земли в данном месте, превышает полную энергию испарения осадков для данного места, то посевам необходим полив. Если же годовая солнечная энергия света в данном месте недостаточна для испарения суммы годовых осадков, то обычно применяют дренаж и осушение почвы. Однако равенства полной световой энергии и полной теплоты испарения осадков для данного места еще недостаточно. Для правильного развития посевов в условиях эффективного фотосинтеза необходимо еще, чтобы содержание воды в почве находилось в определенных пределах. Учет зависимости скорости фотосинтеза от влажности почвы (при некоторой выбранной модели корня растения) вместе с расчетом профиля влажности по глубине почвы (на основе нелинейного уравнения для влагосодержания, с учетом просачивания воды и испарения с поверхности) позволяет решить уравнение для скорости роста массы растений на единице площади (при переменной интенсивности падающего света, при переменной температуре и заданных значениях концентраций питательных веществ, водородного показателя почвы и скорости полива) и прогнозировать урожай в естественных условиях.

**3. Экономика.** При обсуждении математических моделей экономического развития нужно учитывать следующее обстоятельство. С одной стороны, при пропорциональном развитии экономики (когда постоянно растет и количество выпускаемого продукта, и количество орудий, используемых для производства продукта) скорость экспоненциального роста имеет предел, определяемый самой технологией изготовления продукта (или суммой технологий, если речь идет о всей совокупности выпускаемых продуктов). Например, для современной технологии добычи, выплавки и обработки железа эта скорость составляет примерно  $1/7$  т в год на 1 т железа в оборудовании горнодобывающей промышленности (добыча железной руды и угля), металлургии и машиностроения. Эта величина, вместе с другой важной величиной — сроком службы железа, определяет предельную скорость экспонен-

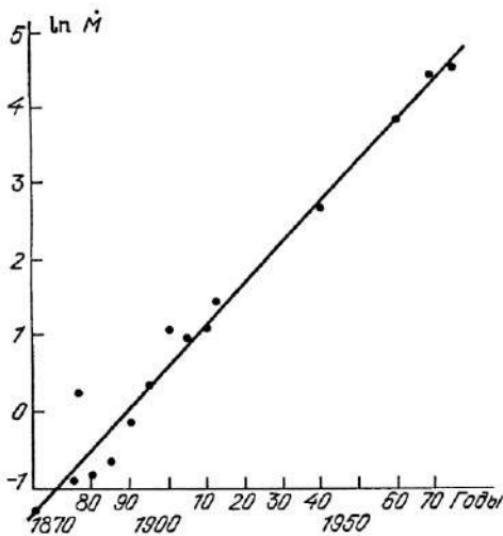


Рис. 5.2. Зависимость от времени годовой выплавки чугуна  $\dot{M}$  в нашей стране (в млн т/год)

циального роста как металлофонда, так и выплавки чугуна (рис. 5.2) во времени [19].

С другой стороны, в ряде современных теорий экономического развития [42] используется иной подход. В них рассматриваются рынки труда, продукта и денег и вводятся правдоподобные феноменологические соотношения между предложением труда и доходом на душу населения; между числом рабочих мест на производстве (единичной мощности) и ценой и ставкой заработной платы; между запасом продукта на рынке и ценой на продукт; между резервом платежных средств банковской системы, потоком кредитов и скоростью эмиссии денег государством.

Решение динамических уравнений, описывающих эти соотношения (это система нескольких обыкновенных дифференциальных или конечно-разностных уравнений), и дает характер развития экономики во времени: экспоненциальный рост, равновесие, инфляционный режим или их комбинацию.

Полная теория должна, по-видимому, сочетать ограничения, налагаемые технологией (она должна описывать потоки веществ, материалов и продуктов на разных стадиях процесса изготовления и использования продуктов, а также распределение этих потоков в пространстве и времени), с закономерностями общественной жизни, отражающими распределение труда и благ.

**4. Моделирование исторического процесса.** При попытке моделирования исторического процесса важно, по-видимому, учитывать как экономическую, так и политическую его стороны [118]. В качестве примера анализа, основанного либо на одном, либо на другом из указанных аспектов, рассмотрим имитационную модель Пелопоннесской войны (431 – 407 гг. до н.э.) и моделирование мышления Бисмарка – министра-президента Пруссии и

канцлера Германской империи – в период объединения и сразу после объединения Германии (1866–1877 гг).

В [11] используется балансовая модель, учитывающая численность населения в различных социальных слоях и в различных полисах Древней Греции, земельные владения полисов, товары и деньги у различных слоев населения в полисах, количество военной техники. Рассчитывая изменения численности населения в различных слоях в мирное и военное время, вводя соотношения, описывающие динамику товара на рынках и динамику денег (в государственной казне и у различных слоев населения), можно проследить за состоянием экономики каждого из полисов в течение всех 25 лет войны. Путем решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений для указанных величин (с шагом в один год) авторам [11] удалось воспроизвести и уточнить ряд социальных явлений, относящихся к рассматриваемому периоду, количественно охарактеризовать состояние экономики противоборствовавших государств. Однако некоторые ключевые моменты истории этого периода остаются вне рамок используемой модели и, по-видимому, определяются политическими факторами.

Именно политическая сторона исторического процесса положена в основу рассмотрения анализа мышления Бисмарка в период объединения Германии [33]. Здесь исследуется "диаграмма мышления" Бисмарка как государственного деятеля, учитывающая его политические цели и возможные варианты развития событий. Основанный на мемуарах Бисмарка, этот анализ позволяет моделировать логику рассуждений исторического деятеля и принятия им решений.

### § 17. Естественные науки

**1. Естественная история. Эволюция.** В течение нескольких последних десятилетий непрерывно предпринимаются попытки построить модель, описывающую появление жизни на Земле и эволюцию живых организмов. В последнее время в этой области науки появились работы, посвященные нахождению аналогий между биологическими явлениями и явлениями в области физики. Так, в [1, 10] строится математическая модель дарвиновой дивергенции (происхождения двух и более видов от общего предка) по аналогии с физическими моделями фазовых переходов; в [22] обсуждается ряд экспериментов, позволяющих предположить, что самые первые организмы, способные эволюционировать под действием естественного отбора, были устроены иначе, чем современные организмы, и имели другой состав: ими могли быть кристаллы глины.

**2. Строение вещества. Макрокосм** \*). В наше время продолжает развиваться традиционная область физики — наука о строении вещества. Экспериментальные данные и объясняющие их теоретические модели выявляют все новые структуры в охлажденных (квантовых) жидкостях, в обычных и полимерных жидкостях, в твердых телах, жидких кристаллах [7]. Аналогии с многими из этих структур или их математическое описание используются в биофизике, физике элементарных частиц и космологии.

Большой экспериментальный материал (полученный в последние десятилетия и касающийся строения и взаимодействий элементарных частиц) одна из общепринятых современных моделей описывает, используя 34 "кирпичика" — элементарные частицы (не всегда наблюдаемые непосредственно), и около двух десятков постоянных — масс этих частиц и их "зарядов". В некоторых теориях (например, теории преонов, техничура, суперструн [14, 80]) такое многообразие объясняется тем, что эти фундаментальные по современным понятиям частицы состоят из еще более мелких субчастиц [21].

Одним из наиболее необычных выводов современной космологической теории, так называемой теории "раздувающейся Вселенной" (эта теория смыкается с современной теорией микромира элементарных частиц), состоит в том, что вещество и энергия в наблюдаемом мире могли возникнуть практически "из ничего" [12]. Действительно, наблюдаемые сегодня протоны и нейтроны (составляющие материальные тела), согласно нынешней теории элементарных частиц, не должны были существовать вечно — они могли возникнуть в ходе эволюции Вселенной. Что же касается существующей сегодня огромной энергии Вселенной — энергии звезд, планет и т.д., — то современная теория показывает, что эта энергия приближенно равна (по модулю) отрицательной гравитационной энергии Вселенной, так что полная энергия равна нулю, что согласуется с рождением и эволюцией Вселенной "из ничего".

И в то же время существующих экспериментальных данных недостаточно для ответа на вытекающие из теории вопросы. Одно из предположений относится к топологии искривленного пространства Вселенной: "Вселенная, возможно, изогнута подобно запутанной веревочной петле" [54].

**3. Математика.** Математика была и остается мощным средством описания внешнего мира. Создание математической теории

\*) "Макрокосм — вселенная в большом виде; микрокосм — малый мир, вселенная в малом виде, человек" [13]. "Макрокосм — мир, вселенная. Микрокосм — мир малых величин — (атомов, электронов и т.п.)" [49].

какого-либо явления внешнего мира традиционно считается одним из признаков глубокого понимания этого явления. Эффективность математики в описании явлений природы очень велика. "... Математика представляется скоплением абстрактных форм – математических структур, и оказывается (хотя по существу и неизвестно, почему), что некоторые аспекты экспериментальной действительности как будто в результате предопределения укладываются в некоторые из этих форм" [4].

Но за несколько последних десятилетий изменилась и математика. "Математика лишилась своей истинности. Ныне она уже не является независимой, абсолютно надежной и прочно обоснованной областью знаний. Большинство математиков заявили о своей преданности естествознанию... Замечательная точность и эффективность математики в описании реального мира по-прежнему ждут своего объяснения" [23].

\*

Мы попытались в этой главе кратко описать современные модели некоторых основных явлений в живой и неживой природе.

Сейчас, в начале эпохи НТР, большинство из этих моделей еще сложны и несовершенны, и надо надеяться, что именно упрощение и совершенствование этих моделей мира приведет к решению задачи о "глубинном" понимании (как ЭВМ, так и человеком) непрерывно растущей, получаемой из опыта информации, задачи об обработке этой информации и о ее систематизации.

---

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя мышление самого человека и изучая модели элементов мышления, созданные как природой, так и человеком, мы узнаем довольно много об этом процессе.

Конечно, многое остается еще неизвестным: закономерности языка и история его возникновения, "география" системы знаний — образов памяти — в мозгу человека, детальные механизмы работы нейронных подсистем в процессах мышления, пределы возможностей человеческого интеллекта.

Однако не видно никаких принципиальных трудностей на пути экспериментальных и теоретических исследований, которые должны привести к ответу на эти (и другие, столь же интересные) вопросы. Именно в последние годы получены сведения о молекулярных механизмах обучения — пластичности памяти, о действии нейронной системы (у простых организмов) как целого; имитационное моделирование в системах искусственного интеллекта позволяет, хотя и крайне схематично, воспроизвести ряд элементов в действиях человека, связанных с работой мысли.

Наряду с обучением категоризация явлений внешнего мира и знаний, приобретенных обществом, особенно при их обработке в духе закона Вебера — Фехнера (например: "количество нужных знаний есть логарифм полного количества знаний"), открывает поистине безграничные возможности для развития человеческого интеллекта.

---

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### ИСЧЕЗНОВЕНИЕ ПРОТОТИПА ПРИ "РАЗОБУЧЕНИИ"

В [84] была предложена процедура "разобучения", предназначенная для устранения из памяти "ложных" образов. Разобучение состоит в предъявлении системе нейронов случайных стимулов и в вычитании из матрицы  $T_{ij}$  (а не добавлении к ней, как в (3)) каждый раз величины  $\epsilon \varphi_i \varphi_j$ , соответствующей тому образу памяти, к которому релаксировал стимул. В применении к случаю прототипа  $\varphi^0$  системы образов  $\varphi^0 + \delta^\varepsilon$  разобучение привело бы к исчезновению прототипа (и к появлению вместо одной потенциальной ямы, соответствующей прототипу,  $s_0$  потенциальных ям). После  $n \approx 1/\epsilon$  предъявлений стимула (и вычитания каждый раз из  $T_{ij}$  величины  $\epsilon \varphi_i^0 \varphi_j^0$  в соответствии с процедурой разобучения). Действительно, после разобучения в главном слагаемом в вариации энергии (16),  $-\sum_s N(\varphi^0 \delta)$ , появится множитель  $(1 - n\epsilon)$  и это слагаемое, обеспечивающее устойчивость прототипа, при  $n \approx 1/\epsilon$  станет сравнимым по величине с суммой остальных слагаемых в (16), а при дальнейшем увеличении  $n$  сменит знак на противоположный; в результате прототип станет неустойчивым.

---

---

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### ПРЕДПОЛАГАЕМЫЙ СЛОВАРЬ ПЕРВОБЫТНОГО ЧЕЛОВЕКА

а) *Личные местоимения*

я

ты

мы

он

вы

они

б) *Вопросительные слова*

кто

где

что

когда

как

в) *Коррелятивные слова*

и

если

потому что

г) *Пространственные слова*

возле

в

с

д) *Локализирующие слова*

там

далеко

близко

правый

здесь

тот

этот

левый

е) *Слова, обозначающие движение и покой*

приходить

сидеть

давать

лететь

стоять

держать

падать

плавать

поворачивать

идти

бросать

тянуть

плыть

течь

лежать

толкать

ж) *Действия*

мыть

расщеплять

завязывать

ударять

вытирать

резать

тереть

копать

чесать

сжимать

з) *Периоды времени*

год

день

ночь

и) *Числительные*

один – десять

двадцать

сто

к) *Количество*

все

мало

много

несколько

л) *Величина*

широкий

толстый

длинный

тонкий

узкий

большой

маленький

короткий

м) *Предметы и явления природы*

лед

соль

звезда	мясо
солнце	глаз
ветер	перо
небо	кожа
облако	кость
дождь	голова
вода	рот
море	нос
дым	крыло
снег	сердце
песок	жир
камень	кишки
гора	живот
зола	шея
земля	волосы
пыль	печень
озеро	нога
туман	c) <i>Ощущения и деятельность</i>
река	пить
огонь	умирать
и) <i>Растения и части растений</i>	слышать
кора	видеть
лист	спать
трава	жить
дерево	есть
корень	знать
цветок	кусать
лес	бояться
семя	думатъ
ягода (фрукты)	дышать
палка	рвать (тошнить)
о) <i>Животный мир</i>	нюхать
червяк	т) <i>Действия, производимые ртом</i>
змея	смеяться
вошь	петь
рыба	сосать
собака	кричать
животное	плевать
птица	говорить
п) <i>Человек</i>	у) <i>Цвет</i>
человек	черный
женщина	зеленый
ребенок	красный
мужчина	белый
р) <i>Части тела и вещества</i>	желтый
кровь	ф) <i>Описательные элементы</i>
ухо	старый
рука	сухой
язык	хороший
зуб	новый
ступня	теплый
яйцо	гнилой
спина	холодный
хвост	острый

правильный	варить
прямой	считать
гладкий	играть
плохой	одевание
мокрый	работать
тупой	танцевать
грязный	копье
х) <i>Родство</i>	вонзать
брат	сражаться
сестра	ч) <i>Разное</i>
отец	имя
мать	другой
муж	не
жена	гореть
ц) <i>Предметы культуры и культур- ная деятельность</i>	дуть
шить	замерзать
веревка	распухать
стрелять	дорога
охотиться	убивать

---

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### ANIMAL

```
10 DIM O$(50):DIM Q$(50,50)
20 FOR I = 1 TO 50:Q$(1) = "S": NEXT I
30 FOR I = 1 TO 50: FOR J = 1 TO 50: Q$(I,J) = "S": NEXT J: NEXT I
40 O$(1) = "PERSHE": O$(2) = "MOUSE": Q$(1,2) = "LIVED ON THE
GROUND"
50 M = 2
60 PRINT "THINK AN ANIMAL"
70 I = 1
80 FOR J = I + 1 TO M: IF Q$(I,J) = "S" THEN 110
90 PRINT Q$(I,J); I; J
100 INPUT A$: IF A$ = "YES" THEN 180
110 NEXT J
120 PRINT O$(I); I: INPUT A$: IF A$ = "YES" THEN 130 ELSE 140
130 PRINT "VICTORY": GO TO 60
140 PRINT "YOURS ANIMAL": INPUT O$(M + 1)
150 PRINT "YOURS QUESTION": INPUT Q$(I, M + 1)
160 M = M + 1:CLS
170 GO TO 60
180 I = J
190 IF I < M THEN 80
200 IF I = M THEN 120
210 END
```

---

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### HANOI TOUR

```
10  DIM O(3,5): DIM N(3)
20  PRINT "T": INPUT T
30  PRINT "O": FOR I = 1 TO 3: FOR J = 1 TO 5: INPUT Q(I,J)
40  NEXT J: NEXT I: N(1) = 5; N(2) = 0: N(3) = 0
50  E = 0: S = 1
60  X = RND(3)
70  Y = RND(3)
80  IF Y = X THEN 70
90  M = 5
100 P = O(X, M): IF P = 0 THEN 110 ELSE 140
110 IF M > 1 THEN 120 ELSE 130
120 M = M - 1: GO TO 100
130 P = 0
140 N = 5
150 Q = O(Y, N): IF Q = 0 THEN 160 ELSE 190
160 IF N > 1 THEN 170 ELSE 180
170 N = N - 1: GO TO 150
180 Q = 0
190 IF N(Y) > 0 THEN 200 ELSE 220
200 IF P > Q THEN 60
210 IF N(Y) = 5 THEN 70
220 IF N(X) = 0 THEN 60
230 O(Y, N(Y) + 1) = O(X, N(X))
240 O(X, N(X)) = 0
250 N(X) = N(X) - 1: N(Y) = N(Y) + 1
260 IF N(3) = 5 THEN 410
270 IF N(2) = 5 THEN 410
280 D = RND(0)
290 F = -1/(0.1 + (O(3,1) - 5) ↑ 2) -1/(0.1 + (O(3,2) - 4) ↑ 2)
    -1/(0.1 + (O(3,3) - 3) ↑ 2) -1/(0.1 + (O(3,4) - 2) ↑ 2)
```

$-1/(0.1 + (O(2,1) - 5) \uparrow 2)$   $-1/(0.1 + (O(2,2) - 4) \uparrow 2)$   
 $-1/(0.1 + (O(2,3) - 3) \uparrow 2)$   $-1/(0.1 + (O(2,4) - 2) \uparrow 2)$

300 IF D > EXP(-(F - E)/T) THEN 310 ELSE 350  
310 O(X, N(X) + 1) = O(Y, N(Y))  
320 O(Y, N(Y)) = 0  
330 N(X) = N(X) + 1: N(Y) = N(Y) - 1  
340 GO TO 60  
350 E = F: PRINT E  
360 S = S + 1: PRINT "N="; S  
370 PRINT O(1,1); O(1,2); O(1,3); O(1,4); O(1,5)  
380 PRINT O(2,1); O(2,2); O(2,3); O(2,4); O(2,5)  
390 PRINT O(3,1); O(3,2); O(3,3); O(3,4); O(3,5)  
400 GO TO 60  
410 END

---

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белинцев Б.Н., Волькенштейн М.В. // Докл. АН СССР. – 1977. – Т. 235. – С. 205.
2. Бернс Б. Неопределенность в нервной системе. – М.: Мир, 1969.
3. Броунел Ф.Х. // В мире науки. – 1985. – № 2. – С. 34.
4. Бурбаки Н. Очерки по истории математики. – М.: ИЛ, 1963.
5. Веденов А.А. Фотосинтез. – М.: Знание, 1984.
6. Веденов А.А., Левченко Е.Б. // Письма в ЖЭТФ. – 1985. – Т. 41. – С. 328.
7. Веденов А.А., Левченко Е.Б., Третьякова Л.И. // Природа. – 1985. – № 11. – С. 14.
8. Вишли К. Биология. – М.: Мир, 1968.
9. Вирт Н. // В мире науки. – 1984. – № 11. – С. 16.
10. Волькенштейн М.В. // УФН. – 1984. – Т. 143. – С. 429.
11. Гусейнова А.С., Павловский Ю.Н., Устинов В.А. Опыт имитационного моделирования исторического процесса. – М.: Наука, 1984.
12. Гут А.Г., Стейнхардт П.Д. // В мире науки. – 1984. – № 7. – С. 56.
13. Даль В.И. Толковый словарь живого великорусского языка. – М.: Рус. яз., 1978.
14. Джексон Д.Д., Тигнер М. // В мире науки. – 1986. – № 5. – С. 36.
15. Джеймс В. Научные основы психологии. – СПб, 1902.
16. Дунин-Барковский В.Л. // УФН. – 1986. – Т. 150. – С. 321.
17. Дьюодни А.К. // В мире науки. – 1985. – № 1. – С. 90.
18. "За рубежом". – 1985. – № 33 (1310). – С. 22.
19. Зусман Л.Л. Народнохозяйственные проблемы экономии металла. – М.: Экономика, 1985.
20. Иоффе Л.Б., Фейгельман М.В. // УФН. – 1986. – Т. 150. – С. 323.
21. Квиг К. // В мире науки. – 1985. – № 6. – С. 34.
22. Кернс-Смит А. Дж. // В мире науки. – 1985. – № 8. – С. 46.
23. Клейн М. Математика. Утрата определенности. – М.: Мир, 1984.
24. Клацки Р. Память человека: структуры и процессы. – М.: Мир, 1978.
25. Конев С.В., Руденюк А.Н. // Биофизика. – 1981. – Т. 26. – С. 535.
26. Константинов И. // Наука и жизнь – 1982. – № 2. – С. 100–101.
27. Куффлер С., Николс Дж. От нейрона к мозгу. – М.: Мир, 1979.
28. Кэндел Э. Клеточные основы поведения. – М.: Мир, 1980.
29. Кэндел Э. Малые системы нейронов // Мозг. – М.: Мир, 1984.
30. Ландau Л.Д., Либшиц Е.М. Теоретическая физика. Либшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. – М.: Наука, 1979.
31. Ленат Д.Б. // В мире науки. – 1984. – № 11. – С. 112.
32. Лёб Д.Э. // В мире науки. – 1985. – № 4. – С. 66.
33. Луков В.Б., Сергеев В.М. Опыт моделирования мышления исторических деятелей: Отто фон Бисмарк, 1866–1876 гг. // Вопросы кибернетики.

- Логика рассуждений и ее моделирование / Под ред. Д.А. Постелова. – М.: Наука, 1983.
34. Лурия А.Р. Маленькая книжка о большой памяти. – М.: Изд-во МГУ, 1968.
35. Мещеряков А.И. // Скороходова О.И. Как я воспринимаю, представляю и понимаю окружающий мир. – М.: Педагогика, 1972.
36. Миллер Дж., Галантэр Е., Прибрам К. Планы и структура поведения. – М.: Прогресс, 1964.
37. Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера. – М.: Наука, 1985.
38. Мотли М.Т. // В мире науки. – 1985. – № 11. – С. 58.
39. "Новое в лингвистике" / Под ред. Звегинцева В.А. – Вып. 1. – М.: ИЛ, 1960.
40. Норман Д. Память и обучение. – М.: Мир, 1985.
41. Пеппер Д.М. // В мире науки. – 1986. – № 3. – С. 34.
42. Петров А.А. Математическое моделирование экономического развития. – М.: Знание, 1984.
43. Поджио Т. // В мире науки. – 1984. – № 6. – С. 58.
44. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. – М.: Мир, 1980.
45. Райкер Л.К. // В мире науки. – 1984. – № 8. – С. 57.
46. Резникова Ж.И. Межвидовые отношения муравьев. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983.
47. Симонов П.В. // Природа. – 1983. – № 3. – С. 24.
48. Симонс Дж. ЭВМ пятого поколения: компьютеры 90-х годов. – М.: Финансы и статистика, 1985.
49. Словарь русского языка / Под ред. А.П. Евгеньевой. – 2 изд. – М.: Рус. яз., 1981.
50. Соколянский И.А. // Докл. АПН РСФСР. – 1959. – № 1.
51. Спрингер С., Дейч Г. Левый мозг, правый мозг. – М.: Мир, 1983.
52. Стивенс Ч. // Мозг. – М.: Мир, 1984.
53. Строук Дж. Введение в когерентную оптику и голограмию. – М.: Мир, 1967.
54. Терстон У.П., Уикс Д.Р. // В мире науки. – 1984. – № 9. – С. 74.
55. Турко Р.П. и др. // В мире науки. – 1984. – № 10. – С. 4.
56. Файн В.С. Алгоритмическое моделирование формообразования. – М.: Наука, 1975.
57. Файнберг Е.Л. Кибернетика, логика, искусство. – М.: Радио и связь, 1981.
58. Файнман Р. Курс физики. – М.: Мир, 1979.
59. Хорн Б.К.П., Икуэти К. // В мире науки. – 1984. – № 10. – С. 76.
60. Хьюбер Ф., Торсон Дж. // В мире науки. – 1986. – № 2. – С. 24.
61. Шеллер Р.Х., Аксель Р. // В мире науки. – 1984. – № 5. – С. 28.
62. Эвартс Э. Механизмы головного мозга, управляющие движением // Мозг. – М.: Мир, 1984.
63. "Эволюционная физиология" / Под ред. Е.М. Крепса. – Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1983. – Ч. 2.
64. Эделмен Дж., Маунткасл В. Разумный мозг. – М.: Мир, 1981.
65. Эймас П.Д. // В мире науки. – 1985. – № 3. – С. 12.
66. Элкон Д.Л. // В мире науки. – 1983. – № 9. – С. 34.
67. Anderson J.A. // IEEE transactions on systems, man and cybernetics. – 1983. – V. SMC-13. – № 5. – P. 799.
68. Anderson J.A., Mozer M.C. Categorization and selective neurons // [107] – P. 213.

69. Anderson J.A., Silverstein J.W. // Psychol. Rev. – 1977. – V. 84. – P. 413.
70. Anderson J.R. // Science. – 1983. – V. 220. – P. 25.
71. Brady M. // Artificial Intelligence. – 1985. – V. 26. – P. 79.
72. Clark J.W., Winston J.V., Rafelski J. // Phys. Lett. – 1984. – V. A102. – P. 207.
73. Crick F.C., Mitchison G. // Nature. – 1983. – V. 304. – P. 111.
74. Damper R.I. // Phys. Bull. – 1985. – V. 36. – P. 336.
75. Fink P.K., Lusth J.C., Duran J.W. // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1985. – V. PAMI-7. – №5. – P. 551.
76. Georgopoulos A.P., Schwartz A.B., Kettner R.E. // Science. – 1986. – V. 233. – P. 1416.
77. Gilchrist A.L. // Sci. Am. – 1979. – V. 240, №3. – P. 88.
78. Golet P., Castellucci V.F., Schacher S., Kandel E.P. // Nature. – 1986. – V. 322. – P. 419.
79. Goldman M.V. // Rev. Mod. Phys. – 1984. – V. 56. – №4.
80. Greenberg O.W. // Phys. Today. – September, 1985.
81. Grimson W.E.L. // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1985. – V. PAMI-7, №1. – P. 17.
82. Hart J., Jr., Berndt R.S., Caramazza A. // Nature. – 1985. – V. 316. – P. 439.
83. Hopfield J.J. // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. – 1982. – V. 79. – P. 2554.
84. Hopfield J.J., Feinstein D.T., Palmer R.G. // Nature. – 1983. – V. 304. – P. 158.
85. Huberman B.A., Hogg J. // Phys. Rev. Lett. – 1984. – V. 52. – P. 1048.
86. Hunt E. // Science. – 1983. – V. 219. – P. 141.
87. Hunt E., Dekaban A.S., Macleod C.M. // Science. – 1978. – V. 202, № 8. – P. 1102.
88. Ingber L. // Phys. Rev. – 1984. – V. A29. – P. 3346.
89. Kennesey T.M., Rucker W.B., Mc Diarmid C.G. // Animal learning and behavior. – 1979. – V. 7. – P. 417.
90. Kirkpatrick S., Gellat C.D., Vecchi M.P. // Science. – 1983. – V. 220. – P. 671.
91. Kohonen T. e.a. // Biol. Cybernetics. – 1976. – V. 22. – P. 159.
92. Koshland D.E., Jr. // Science. – 1977. – V. 196. – P. 1055.
93. Koshland D.E., Jr. Bacterial chemotaxis // The bacteria. V. VII / Ed. by Sokatch T.R., Oraston L.N. – N.Y.: Acad. Press, 1979. – V. III.
94. Koshland D.E., Jr. Bacterial chemotaxis as a model behavioral system. – N.Y.: Raven, 1980.
95. Larkin J. e.a. // Science. – 1980. – V. 208. – P. 1335.
96. Lebowitz M. // Artificial Intelligence. – 1983. – V. 21. – P. 363.
97. Levinson S.E., Liberman M.Y. // Sci. Am. – 1981. – V. 244, №4. – P. 56.
98. Little W.A., Shaw G.L. // Math. Biosci. – 1978. – V. 39. – P. 281.
99. London E., Feigenson G.W. // Biochim. Biophys. Acta. – 1981. – V. 649. – P. 89.
100. Lorayne H., Lucas J. The memory book. – N.Y.: Stein and Day, 1974.
101. Luger G.F. // Cognitive Science. – 1981. – V. 5, №1. – P. 55.
102. Manson M.D., Tedesco P.M., Berg H.C. // J. Mol. Biol. – 1980. – V. 138. – P. 541.
103. Mc Keown D.M., Harvey W.A., Mc Dermott J. // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1985. – V. PAMI-7, №5. – P. 570.
104. Metropolis N. e.a. // J. Chem. Phys. – 1953. – V. 21. – P. 1087.
105. Nature. – 1981. – V. 293. – P. 525.
106. "New Scientist". – 15, 22 and 29 November 1984; "За рубежом". – №34(1363). – 1986. – C. 20.

107. "Parallel models of associative memory" / Ed. by Hinton G.E., Anderson J.A. - N.Y.: Erlbaum, 1981.
108. Rabiner L.R., Levinson S.E. // IEEE transactions on acoustics, speech and signal processing. - 1985. - V. ASSP-33, № 3. - P. 561.
109. Rammal R., Toulouse G., Virasoro M.A. // Rev. Mod. Phys. - 1986. - V. 58. - P. 765.
110. Regan D., Beverley K., Cynader M. // Sci. Am. - 1979. - V. 241, № 1. - P. 122.
111. Rumelhart D.E. e.a. // Nature. - 1986. - V. 323. - P. 533.
112. Schimz A., Hildebrand E. // Nature. - 1985. - V. 317. - P. 641.
113. Starry P., Dreyfus G. // J. de Phys. Lettres. - 1984. - V. 45. - P. 39.
114. Springer M.S., Goy M.F., Adler J. // Nature. - 1979. - V. 280. - P. 279.
115. Toulouse G. // Phys. Rep. - 1979. - V. 49. - P. 267.
116. Toulouse G., Dehaene S., Changeaux J.P. // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. - 1986. - V. 83. - P. 1695.
117. Vedenov A.A., Ezhov A.A., Kamchatnov A.M., Knizhnikova L.A., Levenchenko E.B. A study of Hopfield model of associative memory. - M./IAE-4252/1. - 1986.
118. Weidlich W., Haag G. Concepts and models of a quantitative sociology. - Berlin - Heidelberg - New-York: Springer-Verlag, 1983.
119. Willshaw D. Holography, associative memory and inductive generalisation // [107]. - P. 83.
120. Williams D., Phillips G., Sekuler R. // Nature. - 1986. - V. 324, № 6094. - P. 253.

---

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Адаптация 13  
Алгоритм 118  
Аналогия 103  
Ансамбль нейронов 36  
Антитеза 125  
Аплизия 26  
Ассоциация 58, 100  
АтTRACTант 12  
Афазия 91  
  
Бактерия 11  
Бинарное дерево 124  
  
Вебера – Фехнера закон 61  
Вспоминание 111  
  
Габитуация 29  
Гермиссенда 30  
Глаз 66, 95  
Голография 37  
Голофон 39  
  
Дезадаптация 13  
Диалоговая система 117, 124  
Дихотомическая таблица 125  
  
Естественные науки 143  
  
Жизненная роль 127  
Жуки 71  
  
Зона Брока 90  
– Вернике 90  
Зрение 62  
  
Игры 124, 129  
Идеал 127  
Иерархия памяти 121  
Инструкция 118  
Интуиция 114  
Искусственный интеллект 9  
Исторический процесс 142
- "Карлик Пенфилда" 63  
Категоризация 20  
Климат 136  
  
Линнеевская классификация 114  
Логический вывод 100  
"Ложные образы" 48  
  
Макрокосм 144  
Математика 144  
Микромир 144  
Мнемонические правила 116  
Модели мира 134  
Мозг 63  
Моллюски 26  
Моторика 88  
Муравьи 32  
Мышление 97  
Мышца 30  
  
Насекомые 32  
Науки 136, 143  
Нейрон 22  
Нервная система 28, 30, 34  
Нервный импульс 24  
  
Обобщение 59, 100  
Образ 21  
Обучение 18, 30, 43, 45, 56  
Оптимизация 99, 129  
Осознание 81  
– человека 85  
– моделирование 87  
  
Память 20, 31, 39  
План 118  
Пластичность памяти 20  
Понимание 116  
Поток сознания 97  
Привыкание 29  
Прототип 53  
Простейшие 62

- Разобучение** 147  
**Распознавание образов** 43, 45  
– речи 72  
**Растения** 125, 137  
**Релаксация стимула** 40  
**Репеллент** 12  
**Решение задач** 118, 129  
**Рефлекс** 18  
**Речь** 90  
**Робот** 87, 89, 95  
**Рука** 88
- Сенситизация** 29  
**Сенсорная система** 61  
**Сеть нейронная** 40  
**Синал** 23  
**Скорпион** 82  
**Словарь** 114, 147  
**Слух** 71  
**Сознание** 97  
**Спиновое стекло** 55  
**Стереотип поведения** 28, 30, 33  
– социальный 127  
**Стимул** 45  
**Сцена** 68, 117  
“Сценарий” 109
- Тактильное восприятие** 81  
**Теза** 125  
**Тема** 101
- Улитка внутреннего уха**  
– морская 26, 30  
**Умственное усилие** 99  
**Условный рефлекс** 18
- Фонемы** 74  
**Фотосинтез** 137  
**Фототаксис** 11, 62
- Хемотаксис** 12
- Цели** 127
- Человека первобытного словарь** 147
- ЭВМ, распознавание образов** 43, 45  
**Эволюция** 143  
**Экономика** 141  
**Экспертная система** 117  
“Энергия” стимула 40
- Язык** 7, 114

**Александр Алексеевич Веденов**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МЫШЛЕНИЯ**

**Серия "Современные проблемы физики"**

Редактор *Л.П.Русакова*

Художественный редактор *Т.Н. Кольченко*

Технические редакторы: *С.В. Геворкян, О.Б. Черняк*

Корректоры: *Т.В. Обод, Т.А. Печко*

Набор осуществлен в издательстве  
на наборно-печатывающих автоматах

ИБ № 32453

Сдано в набор 18.06.87. Подписано к печати 08.10.87. Т-19682  
Формат 84 X 108/32. Бумага тип.

Гарнитура Пресс-Роман. Печать офсетная

Усл.печ.л. 8,4. Усл.кр.-отт. 8,61. Уч.-изд.л. 9,44

Тираж 8700 экз. Тип. зак. 1022 Цена 80 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени  
издательство "Наука"

Главная редакция физико-математической литературы  
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Четвертая типография издательства "Наука"  
630077 г. Новосибирск-77, ул.Станиславского, 25

**80 коп.**