

Г. Хакен  
М. Хакен-Крелль

# ТАЙНЫ ВОСПРИЯТИЯ



Hermann Haken  
Maria Haken-Krell

# **Erfolgsgeheimnisse der Wahrnehmung**

Synergetik als Schlüssel zum Gehirn

Ullstein

Г. ХАКЕН, М. ХАКЕН-КРЕЛЛЬ

# Тайны восприятия

Перевод с немецкого А. Р. Логунова



Москва

2002

---

Интернет-магазин

**MATHESIS**

<http://shop.rcd.ru>

- физика
  - математика
  - биология
  - техника
- 

**Хакен Г., Хакен-Крелль М.**

Тайны восприятия. — Москва: Институт компьютерных исследований, 2002, 272 стр.

Главная идея этой книги такова: человеческий мозг является самоорганизующейся системой. И хотя эта система — самая сложная из всех известных нам, она все же соответствует принципам синергетики. Синергетика — это созданная Германом Хакеном наука о взаимодействии. На законах синергетики основан и новый тип компьютера, обладающий основными свойствами человеческого восприятия. Эта книга предлагает нам новый ключ к пониманию важнейших функций головного мозга.

Для широкого круга читателей.

**ISBN 5-93972-141-9**

© der Originalausgabe 1992 by  
Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, Stuttgart

© Перевод на русский язык,  
Институт компьютерных исследований, 2002

<http://rcd.ru>

## Оглавление

Об этой книге . . . . .	7
Предисловие . . . . .	8
<b>Часть I. Синергетика . . . . .</b>	<b>10</b>
1. Дух и материя . . . . .	10
2. Основные принципы синергетики . . . . .	14
3. Синергетика в живой природе . . . . .	34
4. Электрическая активность мозга . . . . .	41
5. Гештальтпсихология . . . . .	45
<b>Часть II. Мозг. Материальный субстрат: от макроскопического к микроскопическому . . . . .</b>	<b>52</b>
6. Мозг и его элементы — нейроны . . . . .	53
а) Исследования мозга: вчера и сегодня . . . . .	53
б) Нейрон — основной элемент нервной системы . . . . .	56
в) Строение и функции мозга . . . . .	64
7. Обучение и память: что нам известно обо всем этом на самом деле? . . . . .	74
8. Глаз и фотоаппарат . . . . .	83
9. Зрительное восприятие пространства . . . . .	89
10. Сетчатка: мозг в миниатюре . . . . .	91
а) Похожа ли сетчатка на фотопленку? . . . . .	91
б) Зрительные клетки — клетки, воспринимающие свет . . . . .	92
в) Архитектура сетчатки . . . . .	98
г) Обработка сигналов в сетчатке . . . . .	102
д) Принципы функционирования рецептивных полей . . . . .	110
е) Рецептивные поля и зрение . . . . .	115
11. Зрительный тракт . . . . .	120
12. Зрительная область коры головного мозга . . . . .	124
а) История исследования . . . . .	124
б) Анатомия зрительной коры головного мозга . . . . .	126
в) Рецептивные поля в коре и в глазах . . . . .	130
г) Восприятие целого . . . . .	140
13. Цветовое зрение . . . . .	142
14. Когерентность в мозге . . . . .	149

<b>Часть III. Самоорганизация восприятия</b> . . . . .	153
15. Что происходит после гиперкомплексных клеток? . . . . .	153
16. Синергетика и распознавание образов . . . . .	155
17. Распознавание образов в синергетическом компьютере . . . . .	158
18. Сетевая архитектура синергетического компьютера — шаг к мозгу . . . . .	162
19. Холмистые ландшафты процесса восприятия . . . . .	163
20. Еще одна сетевая реализация синергетического компьютера: «бабушкины клетки» . . . . .	168
21. Несколько задач на распознавание . . . . .	171
22. Распознавание синергетическим компьютером зашумленных и профильтрованных изображений . . . . .	175
23. Плоские трансформации изображений — первый подход к распознаванию . . . . .	182
24. Плоские трансформации изображений — альтернативное решение . . . . .	194
25. Распознавание сложных сцен . . . . .	198
26. Очарование амбивалентности . . . . .	201
27. Восприятие двойных картинок в компьютерной модели . . . . .	207
28. Колебания периодов восприятия . . . . .	212
29. Восприятие двойственных изображений как зеркало эмоций . . . . .	213
30. Восприятие движения человеком и компьютером . . . . .	214
31. Нейрокомпьютер: традиционный путь . . . . .	219
32. Обучение синергетического компьютера . . . . .	228
33. Мозг и идеал красоты . . . . .	233
34. Восприятие есть создание реальности . . . . .	236
35. Другие вопросы, связанные со зрительным восприятием . . . . .	241
<b>Часть IV. Выводы</b> . . . . .	245
36. Что мы понимаем под «пониманием»? . . . . .	245
37. Немного философии . . . . .	250
38. Синергетика — ключ к пониманию мозга . . . . .	252
<b>Список литературы и примечания</b> . . . . .	255
<b>Именной указатель</b> . . . . .	261
<b>Предметный указатель</b> . . . . .	263
<b>Источники иллюстраций</b> . . . . .	269

## Об этой книге

При восприятии нами мира большая часть информации поступает через глаза в мозг, которому удается как бы играючи познавать и анализировать окружающую нас реальность. Однако если инженер возьмется сконструировать робота, который познавал бы объективный мир подобно человеку, то он столкнется с непреодолимыми трудностями. Биологов и медиков это не удивляет: исследуя мозг под микроскопом, они обнаруживают миллиарды нервных клеток, связанных друг с другом наисложнейшим образом.

Главная идея этой книги такова: человеческий мозг является самоорганизующейся системой. И хотя эта система — самая сложная из всех известных нам, она все же соответствует принципам синергетики. Синергетика — это созданная Германом Хакеном наука о взаимодействии. На законах синергетики основан и новый тип компьютера, обладающий основными свойствами человеческого восприятия. Эта книга предлагает нам новый ключ к пониманию важнейших функций головного мозга.

## Предисловие

Читая эти слова, Вы, конечно же, понимаете, что книга, которую Вы держите в руках — это часть реального мира. Но осознаете ли Вы, что эта книга существует и в Вашем мозге? Скорее всего, Вы согласитесь с этим: да, существует — как идея. Исследователи мозга возразят: нет, книга существует в мозге совершенно материально. Как это возможно? Ну, скажем, в виде электрических и химических процессов. Но разве эти процессы являются чем-то материальным? Да, в той или иной степени . . . примерно так же, как волны на воде. Но ведь вода же и в самом деле материальна! Однако ученые, занимающиеся квантовой физикой, утверждают, что вода состоит из *волн* материи. Весь мир состоит из *событий*, и о том, что эти события происходят, мы можем узнать, только восприняв их, — именно эти субстраты мы и называем материей.

Какое же отношение все это имеет к книге в Вашей голове? Все, что Вы воспринимаете, оказывается в этой самой голове. Но то, что Вы воспринимаете — это еще не весь мир. Кое-что Вы пропускаете, и это может зависеть от Вашего, к примеру, внимания (которое само зависит от многого: от настроения, от гормонального фона и т. п.). Мысль о том, что мир внутри Вас так же реален, как и тот мир, что Вас окружает, возможно, понравилась Вам. Теперь Вы, наверное, захотите узнать, *как* этот внутренний мир существует. Как он выглядит снаружи, мы, пожалуй, знаем. Как он выглядит внутри — внутри Вас — остается загадкой, разгадыванием которой мы и намерены заняться.

Наша книга связана с книгой «Тайны Природы», написанной одним из нас, Г. Хакеном — основателем синергетики, учения о взаимодействии. В ней показано, что синергетика лежит в основе множества разнообразных явлений Природы — как живой (включая человеческое общество), так и неживой — словом, повсюду, где идут фундаментальные процессы самоорганизации.

В настоящей книге речь пойдет о человеческом мозге, самом завораживающем образовании из всех, предоставленных нам Природой. Все знания о человеческом мозге, естественно, затрагивают сущность нашего внутреннего *Я*, а потому оказываются одновременно и захватывающими, и пугающими. Захватывающими — ведь мы, может быть, получаем ключи к

нашему внутреннему миру; пугающими — из-за возможных последствий. Исследования мозга различными методами и на всех доступных уровнях занимают все больше и больше места в науке и имеют все более серьезное значение в общественном сознании. В 1991 году Президент США Дж. Буш объявил последнее десятилетие XX века десятилетием исследований мозга.

Наша книга призвана сделать материалы исследований мозга доступными для всех, кто заинтересуется этими проблемами, причем синергетика сыграет здесь ключевую роль. Опыт показывает, что значение многообразных связей, существующих в мозге, поддается глобальному анализу только в свете принципов синергетики. Таким образом, возникает новая парадигма: мозг с его потрясающими возможностями — это не жесткая конструкция, подобная компьютеру, а живая самоорганизующаяся система. В дальнейшем мы попытаемся поближе познакомить читателя с некоторыми современными исследованиями и отдать тем самым, как и предыдущей нашей книгой, хотя бы часть долга исследователя перед обществом. Общие контуры сегодняшних исследований должны при этом, естественно, проявиться.

Мы выражаем благодарность за создание и подготовку многочисленных иллюстраций Армину Фуксу, Рихарду Хаасу, Роберту Хёнлингеру, Вольфгангу Лоренцу и Мартину Шинделю.

Особой благодарности заслуживает г-жа Ирмгард Мёллер, которая с огромным энтузиазмом и огромным тщанием отнеслась к подготовке нескольких вариантов нашей рукописи.

Ну и конечно же, мы благодарны издательству — и особенно доктору Рейнхарду Лебе и г-же Марго Адрион — за ставшее уже традиционным доброе сотрудничество.

*Штутгарт,  
февраль 1992 года*

*Герман Хакен  
Мария Хакен-Крелль*

# ЧАСТЬ I

## Синергетика

### 1. Дух и материя

Загадочные отношения между духом и материей завораживали людей еще в глубокой древности. Однако кажущаяся нам сейчас столь очевидной связь между мозгом и мышлением оставалась для них тайной. Древние греки, например, называли мозг *encephalos*, что означает приблизительно «то, что содержится в голове». Никаких более точных представлений у них не было. Впрочем, уже Гиппократ пришел к выводу, что мозг имеет отношение к мышлению; Аристотель, однако, придерживался совершенно противоположного мнения, считая местом обитания человеческого духа сердце. И только во II в. н. э. греко-римскому врачу Клавдию Галену удалось окончательно установить, что именно мозг является органом мышления и восприятия. Гален изучал анатомию человека, наблюдая раненных гладиаторов и вскрывая трупы животных. В наш же, просвещенный естественно-научным мышлением век систематическими исследованиями деятельности человеческого мозга занимаются несколько различных дисциплин: психология, лингвистика, психофизика и (в патологических случаях) психиатрия. С другой стороны, мозг как материальное образование сам является объектом интенсивного изучения в нейроанатомии, физиологии, нейрохимии и нейрофизике (последняя занята исследованием электромагнитных полей, генерируемых головным мозгом).

В начале книги мы будем руководствоваться именно таким отдельным подходом к изучению мозга: с одной стороны, исследованием его психической деятельности, а с другой стороны — его физического строения. Мы познакомимся с исследованиями, рассматривающими мозг как невообразимой сложности узор, состоящий из отдельных нервных клеток (так называемых нейронов), обладающих определенными свойствами. И хотя описываемый здесь метод, основанный преимущественно на экспериментальных данных, приводит к поразительным заключениям о том, как функционирует мозг на уровне нейронов, пользуясь лишь этим методом, невозможно понять, как же все-таки протекает процесс восприятия, и ключевой вопрос — как от-

дельные нейроны, *взаимодействуя*, обеспечивают этот процесс — остается без ответа.

Ответ мы попытаемся найти, основываясь преимущественно на принципах синергетики — науки, в которой понятие «взаимодействие» играет центральную роль. В этом и будет заключаться второй — синергетический — подход к изучению мозга, причем границы этого подхода будут подвергнуты всестороннему критическому анализу.

Мы, конечно же, не ожидаем, что наш читатель окажется экспертом в области синергетики; мы предполагаем даже, что само понятие может оказаться для него новым. Уже в следующей главе мы покажем, как просты и одновременно поразительны основные идеи, породившие это направление в науке. При синергетическом подходе к изучению деятельности мозга для нас становится особенно важным выразить наши мысли как можно более конкретно. Поэтому мы не только дадим качественную картину применения синергетики в исследованиях деятельности нейронов, но и представим синергетический компьютер как детализированную модель процессов мышления и восприятия, с помощью которой мы займемся подробным изучением удивительной связи между процессами, протекающими на микроскопическом уровне (нейроны), и макроскопическими процессами, характеризующими восприятие. Здесь нам необходимо оговорить возможные недоразумения. Говоря о синергетическом компьютере, мы не имеем в виду создание некоей усовершенствованной модели уже существующих компьютеров; речь идет, скорее, о том, что теперь модно называть новой парадигмой. Мы определяем мозг как самоорганизующуюся систему; компьютер обеспечивает детальное моделирование процессов самоорганизации такой системы. Это очень похоже на процессы роста и развития, протекающие в живой природе. Мы вполне можем воспроизвести на компьютере целый ряд таких процессов, но вряд ли кто-нибудь возьмется утверждать, что компьютер играет сколько-нибудь важную роль в процессах, реально протекающих в природе.

Что же побуждает нас определить мозг как самоорганизующуюся систему, и что вообще представляет собой самоорганизация? Сделаем для начала несколько вводных замечаний. Как известно, вся наследственная информация передается определенными молекулами, называемыми ДНК. Исходя из этого можно предположить, что ДНК выступает в роли некоего проекта, по которому происходит «строительство» нейронных связей и который с самого начала предопределяет «монтажную схему» мозга. Однако эксперименты, проводившиеся известными нейрологами, выразительнейшим образом доказывают, что формирование синапсов, т. е. межнейронных

связей, в значительной степени определяется влиянием окружающей среды. Опишем в нескольких словах один из подобных экспериментов. Со всем маленькому котенку один глаз завязывают, а второй оставляют открытым; участок мозга, который «в проекте» должен был отвечать за зрение и предназначался для двух глаз, перестраивается таким образом, что весь целиком оказывается занят обработкой зрительной информации, воспринимаемой только одним, оставшимся открытым, глазом. Когда же на более поздней стадии развития котенка освобождают от повязки, информация, воспринимаемая вполне здоровым глазом, уже не обрабатывается мозгом, и котенок остается в некотором смысле «одноглазым», хотя имеет два вполне видящих глаза и должен, казалось бы, пользоваться ими обоими. Результаты этого эксперимента применимы и к человеку: если ребенку, имеющему врожденные дефекты зрения, вовремя не оказана необходимая помощь, в мозге образуются неверные нейронные связи, и ребенку уже никогда не удастся вернуть нормальное зрение. В другом эксперименте котят помещали в окружение, полностью лишённое вертикалей; впоследствии животные оказывались в состоянии воспринимать только горизонтальные линии. Эти факты ясно показывают, что мозг в процессе формирования синапсов выступает как самоорганизующаяся система. Естественно, основные структуры задаются ДНК, однако Природа с успехом поддерживает хрупкое равновесие между предопределенностью структур и процессами их самоорганизации.

Но процессы самоорганизации оказываются значимыми не только во время роста и развития мозга — они оказывают влияние и на формирование мышления. Уместен вопрос: будут ли общие принципы самоорганизации, открытые в рамках синергетики, распространяться и на мозг? Исследования в области синергетики обнаруживают практически повсеместное распространение этих принципов, и было бы, наверное, странно, если бы они остались неиспользованными Природой при создании мозга. Для того чтобы превратить это несколько расплывчатое предположение в реальный ключ к пониманию психической деятельности мозга, вернемся к уже упоминавшемуся синергетическому компьютеру. Такой компьютер оказывается в состоянии воспроизвести основные процессы восприятия человеческим мозгом окружающего мира; построен же этот компьютер на синергетическом принципе самоорганизации.

Здесь, пожалуй, необходимо сказать несколько слов об истории компьютерного моделирования. В связи с развитием электроники особую важность приобрел вопрос о том, способны ли машины достичь человеческого уровня психической деятельности (и не превзойдут ли они нас?!). В 50-е

годы в США этот вопрос даже послужил причиной возникновения совершенно нового научного направления, связанного с так называемым искусственным интеллектом. В наши дни никого не удивляет, что обычные персональные компьютеры способны не только оперировать числами (например, складывать, умножать, делить и т. п.), но и выступать в роли текстовых процессоров, т. е. выстраивать и упорядочивать ряды букв или других символов. Однако в те времена, на заре компьютерной эры, открытие того, что компьютеру подвластны не только числа, но и символы вообще, было подлинной революцией. Ведь что, собственно, представляют собой мыслительные процессы? Да не что иное, как некое упорядочивание символов в соответствии с определенными законами (так тогда полагали). Сегодня вряд ли кто-нибудь станет утверждать, что текстовый процессор способен мыслить; и в самом деле, до сих пор никто не смог добиться ни от одного текстового процессора ни одной оригинальной, лично им сочиненной идеи. Однако обработка символов им дается легко, и уровень ее повышается с каждым годом; программисты собирают дань уважения и восхищения.

И все же сложности остаются. Даже самые быстродействующие из компьютеров оказываются слишком медлительны для того, чтобы воспроизвести некоторые психические способности человеческого мозга. Одна из них — способность к распознаванию образов. И эта медлительность тем более поразительна, что нейроны (отвечающие за обработку информации элементы нашего мозга) обладают меньшей скоростью реакции, нежели соответствующие им элементы компьютерных процессоров. Единственным выходом из этого парадокса может, пожалуй, послужить идея о том, что процессы, связанные с распознаванием образов человеческим мозгом, протекают не последовательно, как это происходит в «голове» компьютера, а параллельно. Уже в 1943 году американскими исследователями У. Маккаллоком и У. Питтсом была представлена математическая модель нейронных связей, которая — при всей ее упрощенности — оказалась способной к осуществлению целого ряда логических операций. Модель имела заслуженный успех, но вскоре оказалась почти совсем забыта — и пребывала в забвении вплоть до 80-х годов. Ренессанс ее был связан с начавшимися в это время интенсивными исследованиями в области создания так называемых нейрокомпьютеров, о которых мы еще будем говорить в этой книге. Исследования эти, как мы увидим позже, были сопряжены с целым рядом принципиальных проблем, само возникновение которых свидетельствовало о том, что избранный учеными путь к пониманию когнитивных способностей человеческого мозга — далеко не единственный. Альтернатива все та же: концепция синергетического компьютера.

Исходным пунктом наших рассуждений служит идея о том, что психическая деятельность мозга протекает в соответствии с основными принципами самоорганизации — законами, которым подчинены и мозг, и синергетический компьютер. На сегодняшний день это предположение является, возможно, лишь смелой гипотезой, которую, впрочем, мы можем постепенно проверить. При этом, конечно, чрезвычайно важно сконцентрировать внимание на таких психических процессах, которые могут быть исследованы с наибольшей возможной точностью и достоверностью. С другой стороны, эти процессы должны быть достаточно сложными, чтобы подтвердить валидность результатов и значимость нашей концепции в целом.

Исходя из этих требований мы решили избрать в качестве объекта исследования область психической деятельности, ограниченную зрительным восприятием. Изучая круг вопросов, касающихся обработки поступающей в мозг визуальной информации, мы ознакомимся и с результатами психологических и психофизических исследований, демонстрирующих удивительную соотнесенность с общей концепцией синергетики. И наконец, мы покажем, как синергетический компьютер в качестве модели самоорганизации оказывается мостом между нейронным микромиром и восприятием, осуществляющимся на макроскопическом уровне.

## **2. Основные принципы синергетики**

Эта книга посвящена человеческому мозгу и некоторым аспектам его психической деятельности; поэтому, на первый взгляд, может показаться странным, что глава, рассказывающая об основных принципах синергетики, снабжена в качестве иллюстраций примерами из физики, относящимися к миру неживой материи. Но в этой главе (а также в главе 5) мы будем рассматривать понятие «образа», и благодаря соответствующим физическим концепциям нам удастся показать связи, характеризующие это, по сути дела, абстрактное понятие. Связи, о которых идет речь, имеют в рамках синергетики строгую математическую формулировку, приведение которой, однако, не является целью нашей книги. Стремясь обойтись без формул, мы попытаемся с помощью относительно простых примеров из области физики показать в действии некие общие закономерности, распространяющиеся не только на мир неживой природы, но и на такие объекты живого мира, как человеческий мозг. Читателям же, желающим глубже проникнуть в тему, мы предлагаем прочесть книги, посвященные этой проблематике: «Тайны

Природы» Германа Хакена<sup>1</sup> и «Самоструктурирование материи» Германа Хакена и Арне Вундерлина<sup>2</sup>. В первой синергетика представлена совершенно без привлечения математики, вторая же потребует математических знаний в объеме высшей школы.

Рассмотрим два физических примера, ставших уже классикой синергетики: подогреваемую снизу жидкость и источник лазерного излучения. При слабом нагревании какой-либо жидкости (например, силиконового масла) в сосуде, имеющем форму параллелепипеда, никаких заметных изменений не происходит. Получаемое жидкостью снизу тепло передается в верхние слои только благодаря ее теплопроводности, сама же жидкость остается в состоянии покоя. Когда температурный градиент достигает некоторого критического значения, в жидкости начинается спонтанное макроскопическое движение, оказывающееся — удивительное дело! — отнюдь не хаотическим, а напротив, строго упорядоченным. Одна из наблюдаемых при этом типичных структур (так называемые цилиндрические ячейки) показана на рис. 2.1. Сформулируем вопрос следующим образом (хотя такая формулировка предполагает некоторый антропоморфизм с нашей стороны): откуда отдельные молекулы жидкости знают, каким именно образом они должны двигаться при повышении температуры? Ведь микроскопические размеры молекул несравненно меньше размеров цилиндрических ячеек, которые образуются при превышении критической разности температур.

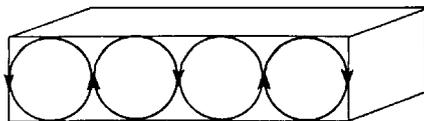


Рис. 2.1. Цилиндрические ячейки, спонтанно образующиеся в силиконовом масле при нагревании снизу до достижения критической разницы между температурами верхнего и нижнего слоев жидкости

Стоит пристальнее рассмотреть механизм возникновения этого движения. Нагреваемая жидкость расширяется, ее плотность уменьшается, и нагретые молекулы устремляются вверх. Пока разность температур нижнего и верхнего уровней жидкости невелика, молекулы, стремящиеся вверх, не в состоянии преодолеть силы внутреннего трения, и жидкость остается в покое. Однако как только температурный градиент достигает критической

<sup>1</sup>*H. Haken. Erfolgsgeheimnisse der Natur.*

<sup>2</sup>*H. Haken, A. Wunderlin. Die selbststrukturierung der Materie.*

величины, подъемная сила возрастает настолько, что жидкость приходит в состояние неустойчивого равновесия. Нагретые частицы устремляются вверх, а те, что находились сверху, направляются теперь вниз, так как обладают более низкой температурой. Это напоминает движение большого количества людей, спешащих вверх и вниз по широкой лестнице. Все мы знаем, как это происходит: одним нужно попасть наверх, другим — вниз, все пихаются и мешают друг другу. Частицы жидкости (снова антропоморфизм) ведут себя разумнее. Одна за другой испытываются различные схемы теплообмена в поисках наилучшей. Математически эти схемы выглядят очень просто, особенно в таких цилиндрических системах, какие показаны на рис. 2.2.

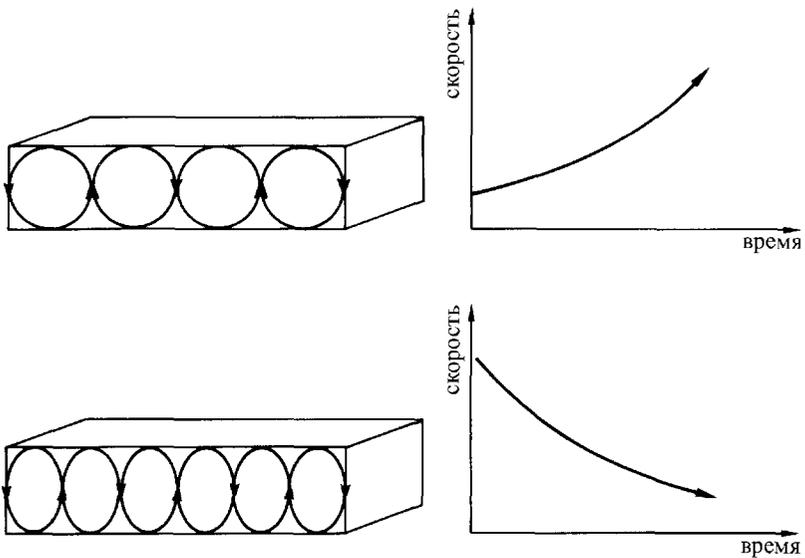


Рис. 2.2. Движение подогреваемой снизу жидкости. Слева изображены схемы движения жидкости в цилиндрических ячейках различной конфигурации, справа — графики зависимости скорости вертикального движения жидкости от времени

Мы видим, что наилучшим образом тепло передается лишь при определенной конфигурации ячеек (первый случай). Скорость со временем растет, а цилиндрические ячейки увеличиваются. Во втором случае все не так благополучно: ячейки либо медленнее растут, либо умирают, едва возникнув,

потому что скорость движения жидкости слишком мала. Между растущими ячейками разворачивается настоящая конкурентная борьба, в которой побеждают те цилиндры, что растут быстрее; перед нами — закон естественного отбора Дарвина в применении к неживой природе.

Растущие ячейки можно определить двумя величинами, что становится особенно наглядным при рассмотрении горизонтального сечения нашего сосуда с жидкостью. График изменения скорости движения жидкости, показанный на рис. 2.4, соответствует схеме движения на рис. 2.3 (стрелками обозначены направления движения жидкости внутри ячеек) и имеет вид синусоиды с амплитудой  $q$ , которая (как следует из сравнения рис. 2.3 и 2.4) представляет собой максимальную скорость движения жидкости. Когда температурный градиент невелик, жидкость находится в состоянии покоя и  $q = 0$ . Когда же разность температур превышает критическое значение,  $q$  становится положительным и образуются цилиндрические ячейки. Таким образом, амплитуду  $q$  можно принять за параметр, характеризующий упорядоченность жидкости, и назвать параметром порядка. Если параметр порядка отличен от нуля, молекулы жидкости образуют особую пространственную структуру, подчиненную параметру порядка.

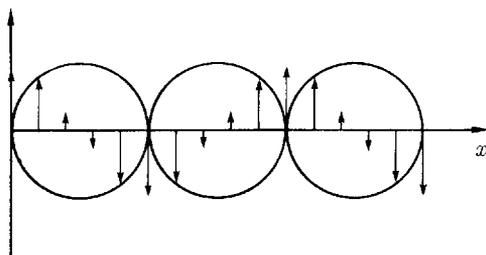


Рис. 2.3. Локальные скорости движения молекул жидкости в цилиндрических ячейках (продольный срез)

Изменение параметра порядка при увеличении температурной разности очень просто моделируется и может быть легко обосновано с помощью строгих математических формул. В качестве иллюстрации мы можем воспользоваться такой (чисто формальной, впрочем) аналогией: сравним «поведение» параметра порядка и некоего шара или мяча. Величину параметра порядка будем интерпретировать как координату мяча, движущегося по холмистой местности под воздействием силы земного притяжения. Пока

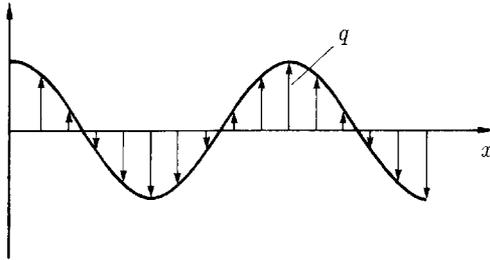


Рис. 2.4. Стрелки, отходящие от координатной оси, символизируют скорости движения жидкости в цилиндрических ячейках; соединив концы стрелок, получаем график в виде синусоиды с амплитудой  $q$

разность температур не достигает критического значения, наш мяч находится в низине (рис. 2.5). Так как состояние системы (покой или движение молекул в цилиндрических ячейках) управляется заданной разностью температур, то именно этот параметр можно считать управляющим. Даже если мяч выведен из состояния покоя толчком вверх, он все равно вернется в точку, где  $q = 0$ . Здесь мяч в конце концов останавливается и пребывает в состоянии устойчивого равновесия; аналогично ведет себя параметр порядка, всегда возвращающийся к значению  $q = 0$ , при котором жидкость обретает покой на макроскопическом уровне.

Если же температурный градиент продолжает расти, наша «холмистая долина» становится все более плоской (рис. 2.6) и в конце концов превращается в две долины, разделенные посередине небольшим «холмом» (рис. 2.7). Это значит, что состояние с  $q = 0$  (и для мяча, и для параметра порядка) становится нестабильным, и малейшего толчка оказывается достаточно для того, чтобы мяч навсегда покинул точку равновесия. Вместо прежнего единственного минимума функция обзаводится уже двумя, что предполагает наличие двух точек устойчивого равновесия, в которых может оказаться мяч (или система, определяемая параметром порядка  $q$ ). Отсюда можно сделать очень важный вывод. Параметр порядка  $q$  (или горизонтальная координата мяча) должен «решиться» выбрать один из двух минимумов, обеспечивающих системе состояние покоя, и, следовательно, испортить симметричность — говоря профессиональным языком физиков, «нарушить симметрию». Решающим здесь оказывается малейшее изменение распределения скоростей отдельных молекул в жидкости (в случае мяча — малейшее касание) —

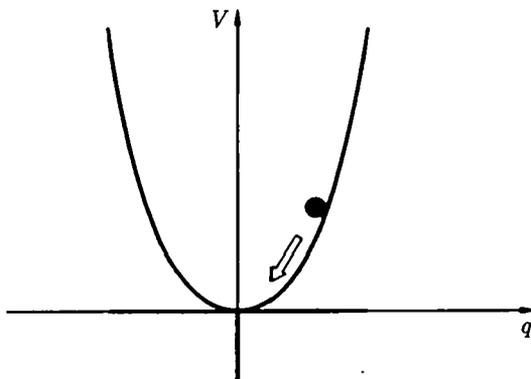


Рис. 2.5. Поведение параметра порядка  $q$ , проиллюстрированное с помощью изменения координаты мяча, движущегося по холмистой местности. Выведенный из состояния покоя мяч движется до тех пор, пока не занимает устойчиво равновесного положения в самой низкой точке долины. При этом предположим, что мяч катится по траве — а значит, скорость его из-за трения быстро падает. Здесь и на следующих иллюстрациях (рис. 2.6 и 2.7) через  $V$  обозначена величина так называемого потенциала. В данном случае достаточно, если потенциал  $V$  будет соотнесен с высотой над уровнем моря некоторой точки воображаемой нами холмистой местности

и симметрия нарушена; самое незначительное воздействие может иметь макроскопические последствия. Правая «долина» символизирует положительную величину параметра порядка; соответствующая схема движения представлена на рис. 2.8.левой же долине соответствует вращение цилиндрических ячеек, показанное на рис. 2.9 (как видите, направления вращения противоположны). Итак, мы наблюдаем макроскопические последствия нарушения симметрии, произошедшего на микроскопическом уровне.

Так как между холмами, изображенными на рис. 2.7, разместились две долины — а значит, функция изменения параметра порядка имеет два минимума, — мы можем говорить о бистабильности. Похожий феномен можно наблюдать и при изучении процесса человеческого восприятия. Посмотрите на рис. 2.10. Физик, взглянув на это изображение, скорее всего, подумает о картине распределения частиц ферромагнетика, где черным обозначены те частицы, северный магнитный полюс которых направлен вверх, а белым — те, чей северный магнитный полюс направлен вниз. Ну а биржевой маклер, возможно, вспомнил бы о том, как толпятся маклеры на бирже. Одна и

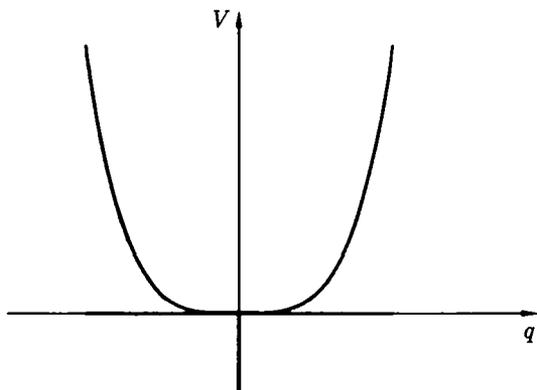


Рис. 2.6. Дальнейший рост температурного градиента приводит к деформации «холмистого ландшафта» — графика, описывающего поведение параметра порядка  $q$ . Вблизи точки перехода долина становится совсем плоской

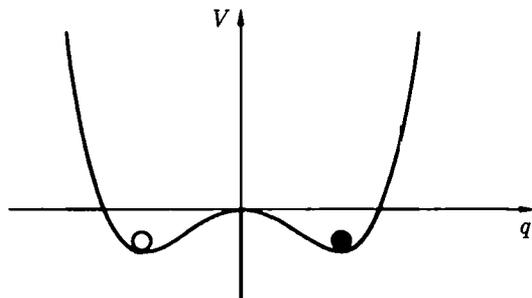


Рис. 2.7. При превышении критической разности температур верхнего и нижнего уровней начинается спонтанный процесс образования уже двух долин. Это означает, что параметр порядка  $q$  (координата нашего мяча) находится в неустойчивом состоянии и для возвращения к устойчивому равновесию может сместиться как вправо ( $q > 0$ ), так и влево ( $q < 0$ ); это ведет к так называемому нарушению симметрии

та же картинка (система) — и две совершенно различные интерпретации! Это и есть бистабильность. Которая из двух «долин» (с рис. 2.7) окажется избрана, зависит от образования и подготовки наблюдателя (а также от его

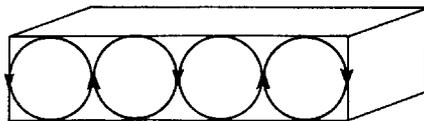


Рис. 2.8. Эта и следующая иллюстрации представляют собой схемы движения при нарушении симметрии, показанном на рис. 2.7. Стрелками показано направление вращения жидкости в цилиндрических ячейках, когда параметр порядка  $q$  (т.е. мяч) движется к точке равновесия в правой долине

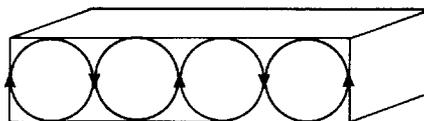


Рис. 2.9. А здесь параметр порядка находится в левой долине (см. рис. 2.7)

предубеждений и пристрастий). Впрочем, связанное с этим экспериментом «нарушение симметрии» уже давно используется психологами в качестве одного из способов разобраться в тайнах «состояний души» человека. Существует картина, на которой изображены две женщины, молодая и старая, причем молодая смотрит куда-то в сторону, а старая в это время — на нее. Лица обеих женщин практически лишены какого бы то ни было выражения, однако некоторые люди, глядя на эту картину, скажут: «Старушка будто чем-то озабочена», другим она покажется исполненной недоверия и подозрительности, третьи увидят в этой женщине что-то еще, связанное с их собственным мироощущением и эмоциональным состоянием (см. рис. 29.1).

Из-за возникающих в жидкости в процессе передачи тепла снизу вверх микроскопических колебаний параметр порядка, который мы сравниваем с положением мяча на горизонтальной оси координат, постоянно изменяется под воздействием микроударов — нечто подобное можно наблюдать во время футбольных матчей, когда футболисты начинают, казалось бы, беспорядочно лупить по мячу. Если сила ударов постоянна — как в случае с жидкостью, — то они (см. рис. 2.5 и 2.7) практически не влияют на картину в целом, так как мяч очень скоро снова скатывается по склону вниз, в «долину». Но в случае, показанном на рис. 2.6, разность высот в области, близкой к  $q = 0$ , минимальна, а это значит, что возвращающая сила также

мала, и любое воздействие на параметр порядка очень сильно сказывается на состоянии системы; в такой ситуации мы имеем дело с *критическими колебаниями*. Мяч в этом случае возвращается в исходное состояние равновесия очень медленно — если вообще возвращается — поэтому мы говорим здесь о *критическом замедлении*.



Рис. 2.10. Пример, демонстрирующий феномен бистабильности в восприятии. Физик усмотрит здесь видимую под микроскопом картину распределения частиц ферромагнетика; другой наблюдатель, возможно, воспринял бы это изображение как вид сверху на толпу биржевых маклеров

Бывают случаи, когда принципиально возможны различные параметры порядка — а значит, и различные конфигурации. В качестве примера приведем жидкость, подогрешаемую снизу в каком-нибудь округлом сосуде. Взгляните на рис. 2.11, где схематично показано движение жидкости в таком случае. Движение жидкости в ячейках может происходить во всех направлениях, причем эти направления абсолютно равноценны, что и делает возможным образование множества различных конфигураций. Отметим, что все эти конфигурации устойчивы. Так как существует множество подобных устойчивых конфигураций, то мы будем говорить о *мультистабильности*. Мультистабильность может проявляться и в процессе восприятия. Посмотрите на рис. 2.12: множество изображенных здесь точек образуют некие круговые узоры, изменяющиеся по мере того, как мы вглядываемся в картинку.

Что же произойдет, если нарушить систему ячеек (например, перемешав жидкость) на одном из участков поверхности? До тех пор пока хоть на

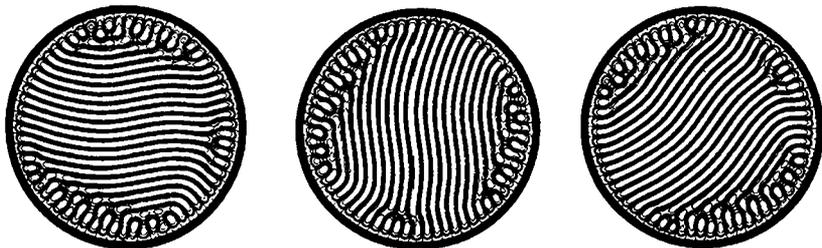


Рис. 2.11. Пример мультистабильности. На рисунке показано движение жидкости в круглой чашке, подогреваемой снизу. Формирующиеся системы ячеек могут оставаться стабильными, образуя при этом самые различные конфигурации

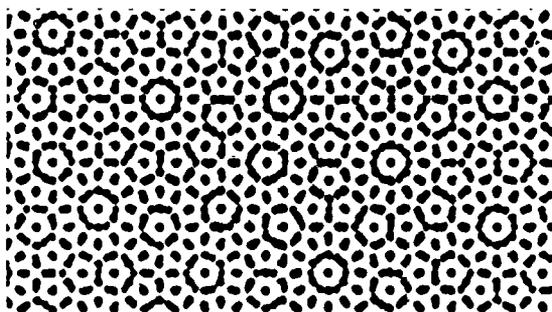


Рис. 2.12. Мультистабильность в восприятии. Из отдельных точек наш мозг выстраивает все новые и новые конфигурации

каком-то участке поверхности ячейки сохраняются «неповрежденными», влияние этого участка будет распространяться на остальную жидкость — и в конце концов система ячеек вернется в прежнее состояние. Особенно наглядно это демонстрируют компьютерные эксперименты, результаты которых представлены на рис. 2.13. Объектом экспериментов является модель жидкости, подогретой до стадии возникновения ячеистой структуры. Рассмотрим иллюстрацию, начав с верхнего левого угла и двигаясь сверху вниз. Для начала возьмем в качестве примера ячейку, ориентированную на рисунке вертикально; остальная жидкость пока еще движется неупорядоченно. В результате внутренних межмолекулярных взаимодействий в жидкости возникает целостная ячеистая структура. Этот процесс можно описать поэтапно: образовавшаяся первой единственная ячейка задает па-

параметр порядка, который «вступает в борьбу» с прочими параметрами порядка, задающими иные направления движения. Победив в этой борьбе, параметр порядка, заданный первой ячейкой, распространяет свое влияние на всю жидкость в соответствии с принципом подчинения.

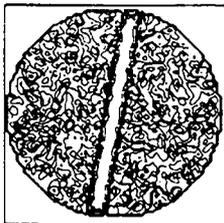
Если начать с ячейки, ориентированной иначе, чем в первом случае (средний столбец), направление движения жидкости определяется влиянием нового параметра порядка, задаваемого этой ячейкой. В последнем столбце приведены результаты эксперимента, в котором жидкость поставлена в своего рода конфликтную ситуацию, когда одновременно сосуществуют две различные разнонаправленные ячейки, каждая из которых задает свой собственный параметр порядка; разница же между этими ячейками заключается в том, что одна из них приблизительно на 10% «сильнее» другой. По окончании некоей промежуточной фазы, во время которой жидкость как бы ищет компромиссный вариант, первая — более сильная — ячейка побеждает, и задаваемый ею параметр порядка подчиняет себе систему, вынуждая жидкость двигаться в соответствии с направлением движения первой ячейки.

Обобщая эти результаты, мы можем вывести кое-какие закономерности. Допустим, существует некая система, находящаяся в определенном состоянии (например, жидкость в состоянии покоя) и определяемая некоторым управляющим параметром. При изменении значения управляющего параметра (в нашем случае это температурный градиент) состояние системы становится неустойчивым и в конце концов изменяется. Это новое состояние обладает более высокой степенью упорядоченности, или, в более общем смысле, является более структурированным, нежели исходное. При

---

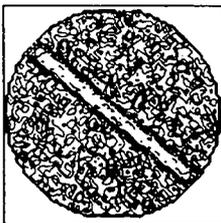
Рис. 2.13. Модель развития системы ячеек в подогреваемой снизу жидкости. Левый столбец: на самом верхнем рисунке представлено продольное сечение цилиндрической ячейки, окруженной хаотично движущейся жидкостью, в условиях превышения критической разности температур. С течением времени жидкости удается создать ячеистую структуру, ориентированную в соответствии с направлением движения, заданным первой ячейкой. Средний столбец: случай аналогичен предыдущему, только исходная ячейка ориентирована иначе. Правый столбец: представленная здесь конфликтная ситуация определяется одновременным сосуществованием двух различно ориентированных ячеек, причем одна из них примерно на 10% «сильнее» другой. На втором сверху рисунке показано, как жидкость пытается найти компромиссный выход из этой конфликтной ситуации. Направление, в котором сорентирована более сильная ячейка, и определяет, в конечном счете, характер движения жидкости в сформировавшейся ячеистой структуре, что отражено на нижнем рисунке правого столбца

а)



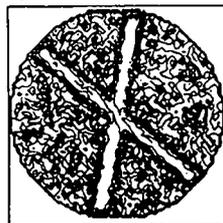
$T=0,0$

б)

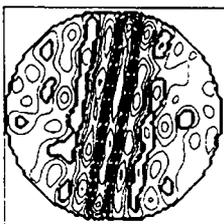


$T=0,0$

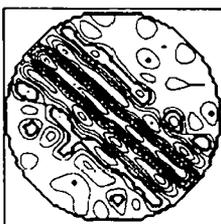
в)



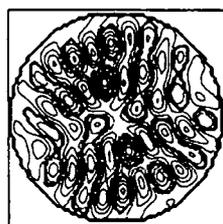
$T=0,0$



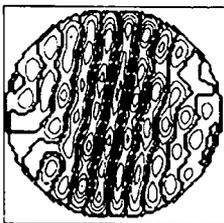
$T=3,0$



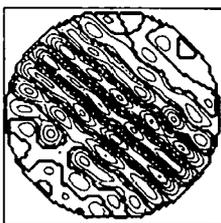
$T=3,0$



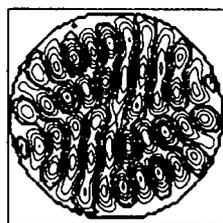
$T=10,0$



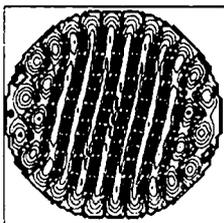
$T=7,0$



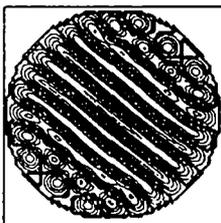
$T=7,0$



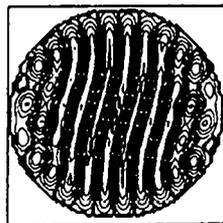
$T=60,0$



$T=200,0$



$T=200,0$



$T=200,0$

переходе системы из одного состояния в другое проявляются различные характеристические феномены. На переходной стадии от одного равновесного состояния к другому система «испытывает» множество возможных моделей движения, и «побеждает» в конечном счете та, что ведет к образованию новой структуры кратчайшим путем; именно эта модель задает параметр порядка, подчиняющий себе всю систему и обеспечивающий возникновение новой структуры.

Принимая во внимание многообразные аналогии, существующие между синергетическими системами в живой и неживой природе, мы решили остановиться на еще одном феномене — гистерезисе, хорошо известном благодаря исследованиям магнетизма. На рис. 2.14 представлен помещенный в магнитное поле ферромагнетик (северный полюс вверх). Пока воздействие магнитного поля слабо, первоначальное положение северного и южного магнитных полюсов сохраняется; когда же напряженность внешнего магнитного поля увеличивается до определенной критической величины  $F_1$ , происходит смена полярности (см. рис. 2.14 и 2.15).

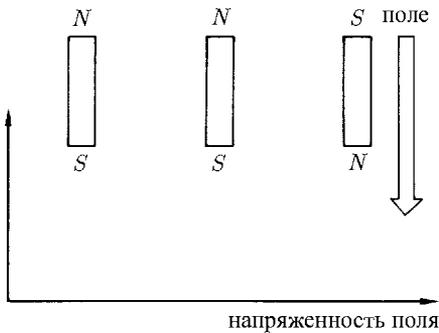


Рис. 2.14. Слева сверху — ферромагнетик до помещения во внешнее магнитное поле (буквами  $N$  и  $S$  обозначены положения соответственно северного и южного полюсов ферромагнетика). После помещения во внешнее магнитное поля (направление поля показано стрелкой) возможны два положения полюсов: слева положение с максимальной энергией, а справа — с минимальной

Если теперь начать уменьшать напряженность поля, то обратная смена полярности произойдет при совершенно ином значении  $F_2 \neq F_1$  (на рис. 2.15 этот случай показан пунктиром). То, при какой напряженности изменяется полярность, зависит от предыдущих значений напряженности! Этот эффект можно описать в несколько более абстрактной форме с помощью уже обсуждавшейся нами ранее модели холмистого ландшафта (см. рис. 2.5, 2.6 и 2.7), подвергнув ее небольшой модификации (с учетом рис. 2.15). Холмистый ландшафт на рис. 2.16 деформируется в результате изменения управляющего параметра (в роли которого раньше выступала разность температур). Минимумы здесь обозначают следующее: первый

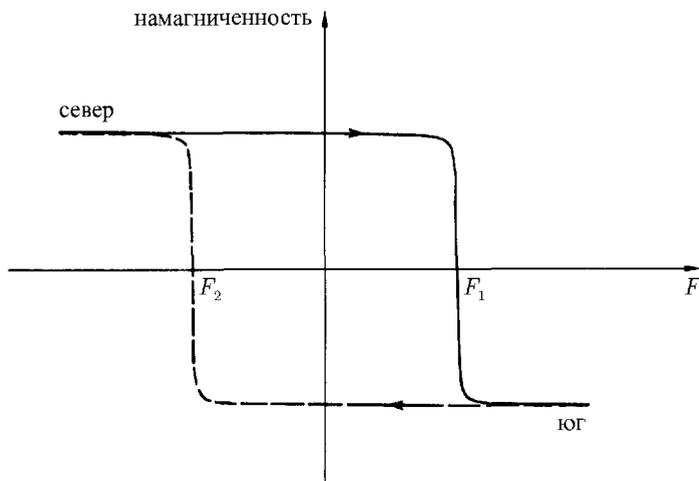


Рис. 2.15. Под воздействием внешнего магнитного поля намагниченность ферромагнетика изменяется. Направление намагниченности при этом зависит от предшествующего состояния системы. Внешнее магнитное поле  $F$  при этом направлено по горизонтали слева направо. В левой части рисунка поле направлено сверху вниз, в правой — снизу вверх. Начнем построение кривой в верхнем левом квадранте; здесь направления магнитного поля и намагниченности совпадают. Затем уменьшим напряженность поля, так чтобы поле в конце концов сменило свое направление и начало возрастать в обратном направлении — намагниченность при этом сохранит свое первоначальное направление, хотя теперь направления поля и намагниченности оказываются противоположными. И только при так называемой критической напряженности  $F_1$  магнитного поля произойдет изменение направления намагниченности, и направления намагниченности и поля  $F$  совпадут. Если же мы и дальше будем уменьшать напряженность магнитного поля, так чтобы оно сменило направление, направление намагниченности сохранится даже после того, как изменится направление поля — смена направления намагниченности произойдет только при некотором значении  $F_2$ . Таким образом, направление намагниченности зависит от предшествующего состояния системы: этот феномен называется эффектом гистерезиса

(левый) минимум соответствует такому состоянию в случае нагреваемой жидкости, при котором в ней образуются цилиндрические ячейки; второй (правый) минимум соответствует состоянию, при котором возникают гексагональные ячейки (см. рис. 2.17), напоминающие по своей структуре пчелиные соты. Нагретая жидкость поднимается вверх вдоль центральной оси

такой ячейки, а затем — охлажденная у поверхности — стекает вниз по ее стенкам. Воспользуемся снова аналогией с движением мяча по холмам: на рис. 2.16 (а) мяч находится в единственной точке минимума; такой ландшафт соответствует состоянию, в котором реализуется система цилиндрических ячеек. При любых деформациях ландшафта мяч (горизонтальная координата которого соответствует у нас значению параметра порядка) переходит во вторую, более глубокую, долину только на рис. 2.16 (д), вверху; при таких условиях в жидкости образуются гексагональные ячейки. Будем теперь изменять величину управляющего параметра в обратном направлении; соответствующие этим изменениям состояния представлены в нижнем ряду рисунков, с 2.16 (д) до 2.16 (а). При этом обнаруживается следующая особенность: мяч остается в точке второго минимума даже тогда, когда эта точка оказывается выше точки первого минимума. И только при деформации 2.16 (б) мяч вновь возвращается в свое первоначальное положение (первый минимум). Переход от первого минимума ко второму совершается при ином значении управляющего параметра, нежели то, при котором становится возможным обратный переход — от второго к первому. Налицо проявление эффекта гистерезиса.

Тот же самый феномен, проявляющийся в процессе восприятия, мы проиллюстрируем двумя примерами. Если рассматривать приведенную на рис. 2.18 последовательность изображений от левого верхнего угла к правому нижнему, мы видим мужское лицо, которое постепенно замещается фигурой девушки. Если же мы начнем с правого нижнего изображения и будем двигаться в обратном направлении, то смена образа произойдет относительно позднее (у некоторых мужчин этой смены вообще уже не происходит!).

То же случается, когда мы читаем на рис. 2.19 слово «хаос» (Chaos), двигаясь по строчкам сверху вниз, — и в последней вдруг обнаруживаем вместо хаоса «порядок» (Order). При чтении снизу вверх порядок обращается в хаос столь же неожиданно, но позже.

Являются ли приведенные нами примеры бистабильности, мультистабильности и гистерезиса лишь поверхностными аналогиями, или за ними кроется что-то большее? Ответить на этот вопрос мы попытаемся в следующей главе; затем подробнее остановимся на толковании понятия «гештальт». Сейчас же приведем еще один пример из синергетики — лазер. Нам представляется, что это заинтересует читателей, ожидающих от нас модели нейронных процессов.

Устройство лазера, в принципе, крайне просто. На торцах стеклянной трубки устанавливаются два зеркала. Трубка заполняется газом. Затем

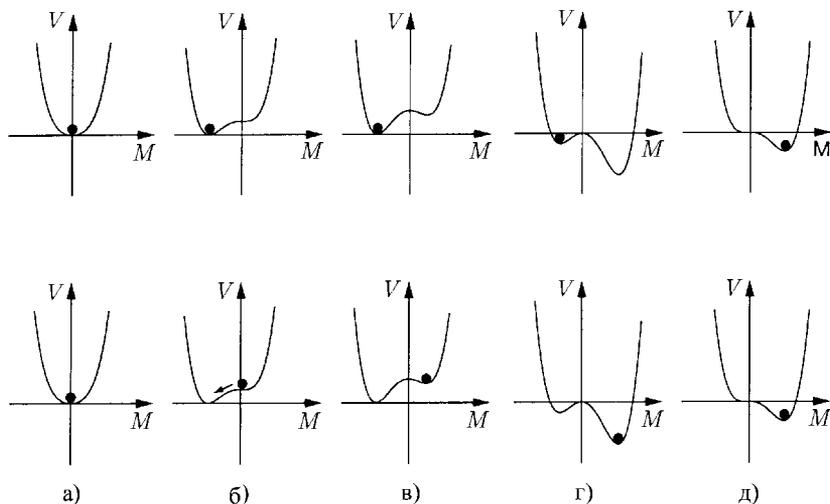


Рис. 2.16. Эффект гистерезиса на примере движения мяча по холмистой местности. Под воздействием силы притяжения, направленной вниз, мяч всегда скатывается в ближайшую доступную долину. Представим себе, что ландшафт в результате какого-то внешнего воздействия изменяет свою форму (для ферромагнетика таким внешним воздействием является внешнее магнитное поле) в последовательности, показанной на рисунках от (а) до (д) (верхний ряд). Очевидно, что мяч сохраняет свое исходное положение (в точке первого минимума) вплоть до рис. (г) и скатывается во вторую долину только на рис. (д). Изменяя ландшафт в обратном направлении (от (д) до (а), нижний ряд), убеждаемся в том, что положение мяча в точке второго минимума сохраняется до рис. (в); в первоначальное положение (первая долина) мяч возвращается только на рис. (б). То есть положение мяча на каждом этапе (в первой долине или во второй) зависит от его предыдущего положения

через трубку пропускается ток; отдельные атомы или молекулы газа, возбуждаясь, испускают световые волны (вернее, последовательности волн, или цуги), причем эти волны никак не зависят друг от друга (нечто подобное происходит, если бросить в воду пригоршню гальки). Такие волновые цуги показаны на рис. 2.20 слева. При увеличении силы тока возникает совершенно новое явление: отдельные, до сих пор независимые друг от друга, последовательности волн превращаются в один гигантский высокоупорядоченный цуг (рис. 2.20, справа). Возникающая при этом когерентная световая волна служит своего рода параметром порядка, подчиняя себе отдельные атомы и вынуждая их осциллировать в такт. Отдельные атомы ведут себя

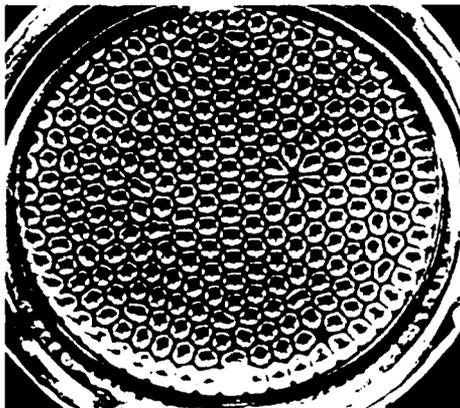


Рис. 2.17. Структура, образующаяся в нагретой снизу жидкости, напоминает пчелиные соты. Жидкость вдоль центральной оси каждой ячейки поднимается вверх, а затем, охладившись у поверхности, возвращается вдоль стенок вниз

теперь как одинаково настроенные антенны, и испускаемые ими волны накладываются друг на друга, в результате чего мы получаем многократно усиленные синхронизированные по фазе макроскопические световые волны, что с лихвой компенсирует некоторое ослабление, вызванное тем, что часть волн, не задержанная зеркалами, покидает трубку. Здесь мы имеем дело с так называемой циклической причинностью. С одной стороны, световая волна (параметр порядка) подчиняет себе атомы; с другой стороны, эта же волна (параметр порядка) сама оказывается результатом взаимодействия отдельных атомов. Совершенно аналогичную картину мы наблюдали, когда рассматривали пример с нагреваемой жидкостью. Для чего же мы заговорили о лазерах, раз картина, которую мы наблюдаем здесь, совершенно аналогична той, что мы видели раньше? Дело в том, что при дальнейшем увеличении силы тока равномерно испускаемые волны превращаются в короткие световые вспышки чрезвычайной интенсивности (см. рис. 2.21) или же вырождаются в неупорядоченное движение, которое нынче принято называть детерминированным хаосом (см. рис. 2.22). Кроме того, были обнаружены и другие типы поведения лазера.

Итак, отметим следующий факт: при изменении такого, на первый взгляд, неспецифичного управляющего параметра, как сила тока в нашем примере, одна и та же система может повести себя качественно различным

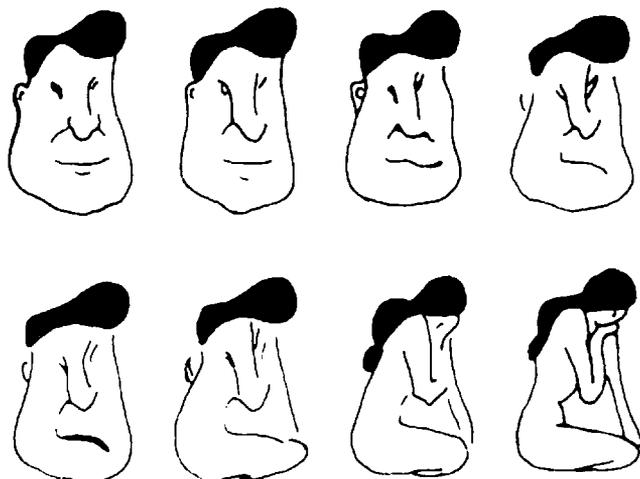


Рис. 2.18. Гистерезис в зрительном восприятии. Если рассматривать последовательность рисунков, начиная с левого верхнего, мы увидим, как мужское лицо вдруг превратится в фигуру девушки; произойдет это примерно в середине нижнего ряда. Разглядывая картинку в обратном порядке (т.е. снизу справа), мы обнаружим, что фигура девушки различима еще и в верхнем ряду, и только под конец она вновь становится мужским лицом

образом. Это утверждение явно противоречит представлениям, основанным на ньютоновской механике: если удвоить силу, действующую на некое тело, ускорение этого тела также удвоится. Но когда мы удваиваем силу тока в трубке лазера, поведение лазера полностью изменяется. И такие молниеносные изменения в поведении типичны для нелинейных систем. Изучением общих закономерностей таких изменений и занимается синергетика; именно поэтому она оказывается столь подходящим инструментом для раскрытия тайн психической деятельности мозга.

Изменения, подобные вышеописанным, обнаруживаются в психических процессах всех уровней. Например, у морских зайцев (аплизий) были найдены нейроны, ведущие себя подобно лазеру. Эти нейроны способны работать в самых различных режимах: генерировать неупорядоченные импульсы, соответствующие хаотическим на микроскопическом уровне волновым пугам, излучаемым обычной лампой, упорядоченные импульсы, соответствующие свету лазера, регулярные короткие импульсы, подобные ла-

Chaos  
 Chaos  
 Chaos  
 Order

Рис. 2.19. Еще один пример гистерезиса в восприятии. Начиная читать с верхней строки, мы видим три строки со словом *Chaos* («хаос») и лишь в последней «хаос» обращается в «порядок» (*Order*). Теперь начнем с нижней строки: «порядок» снова становится «хаосом» лишь в самом конце

зерным вспышкам, и, наконец, детерминированно хаотические импульсы. Исследования нервных клеток аплизий приводят нас к интересным предположениям: возможно, их нейроны имеют совершенно одинаковое строение и разнятся только количеством рецепторов.

В свете этого предположения понятнее становятся изменения в поведении людей. В качестве иллюстрации приведем пару примеров. Когда мы пьем какой-нибудь стимулирующий напиток типа кофе, наше поведение изменится. Единственным «управляющим параметром» при этом изменении системы (человеческого мозга) оказывается концентрация кофеина в крови. Для читателей, ближе знакомых с нейронами и их медиаторами, уточню: кофеин блокирует рецепторы серотонина. Число рецепторов также является неспецифичным управляющим параметром. При лечении шизофрении часто используется сильнодействующий медикамент «халдол», вызывающий

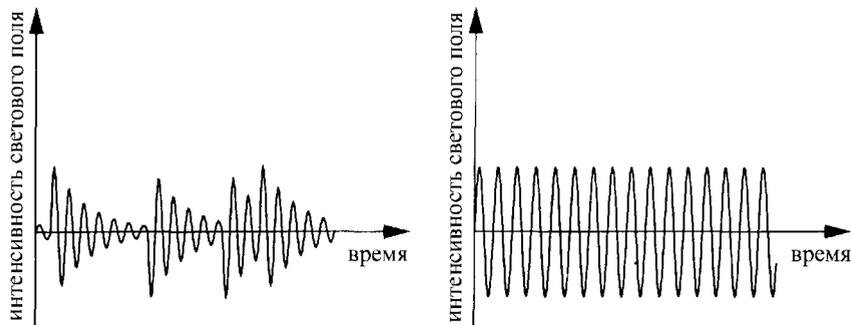


Рис. 2.20. Основное отличие между световым излучением лампы (слева) и лазера (справа). Лампа испускает абсолютно некоррелированные отдельные короткие волновые цуги, хаотичные на микроскопическом уровне. Испускаемые лазером волны, напротив, высокоупорядочены, однородны и когерентны

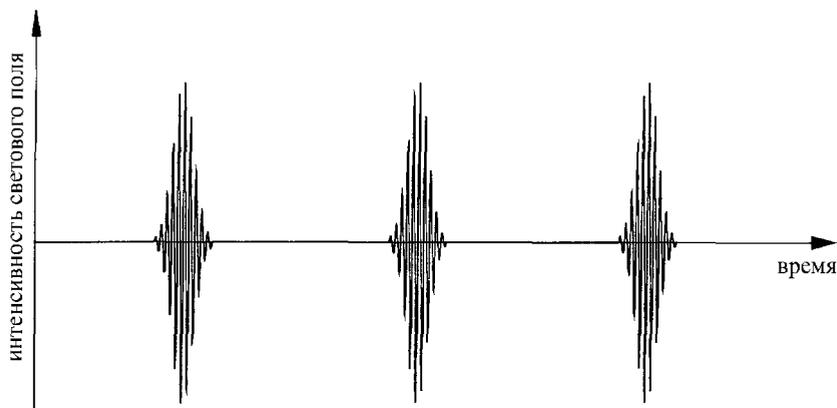


Рис. 2.21. При увеличении подводимой к лазеру мощности достигается так называемый порог лазерной генерации, что приводит к возникновению регулярных ультракоротких световых вспышек

изменения в поведении: он блокирует так называемые дофамин-2-рецепторы. Аналогия с лазером, правда, не объясняет такие изменения в поведении, однако дает возможность предположить, что речь идет о возникновении новых параметров порядка, подчиняющих себе всю систему в целом. Отсюда

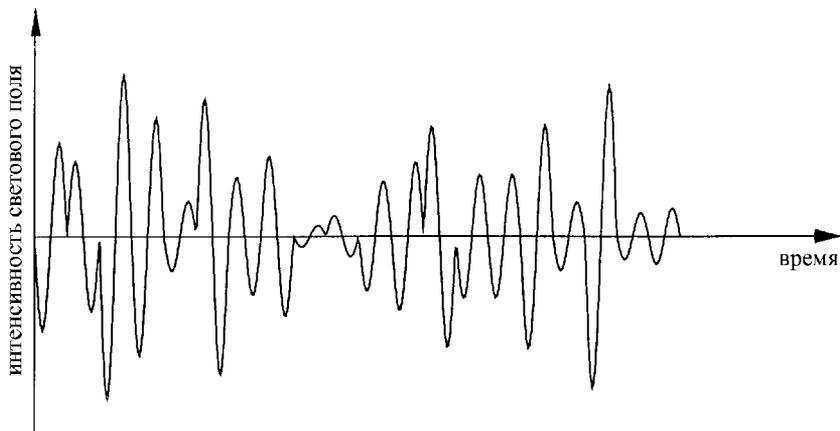


Рис. 2.22. При других условиях возбуждения и ином расположении зеркал излучение лазера становится совершенно неупорядоченным. Однако в данном случае речь идет не о хаотичности на микроскопическом уровне (как на рис. 2.20, слева), а о детерминированном хаосе

становится очевидным, насколько важна оказывается дозировка препаратов подобного типа, ведь, следуя нашей аналогии, мы должны быть готовы к тому, что один и тот же препарат в различных дозах может оказать совершенно различное действие на организм пациента.

В приведенных примерах мы коснулись, естественно, лишь самой вершины айсберга, которому можно уподобить синергетику. Что же представляет собой его большая часть, скрытая от глаз? Синергетика, собственно, занимается комплексным исследованием процессов возникновения новых свойств в сложных системах, или — говоря научным языком — эмергенцией новых качеств упомянутых систем. Получив таким образом первое представление о системах высокой степени сложности, мы намерены в дальнейшем это представление углубить и развить.

### 3. Синергетика в живой природе

Как мы уже отмечали в начале предыдущей главы, применение синергетики для объяснения биологических феноменов вовсе не означает, что мы льем воду на мельницу физикализма и стремимся все биологические процессы свести к феноменам физическим. Смысл существования синергетики

состоит как раз в обратном: выяснить природу эмергенции, ведущей к качественным изменениям сложных систем. Итак, имеются феномены, вполне совместимые с законами физики и химии, но никоим образом не «вытекающие» из этих законов с достаточной определенностью. Таким образом, речь идет, скорее, об открытии неких новых общих закономерностей, не связанных напрямую с физикой. Однако прежде чем применить синергетику к исследованию мозга, мы должны, по крайней мере, продемонстрировать на нескольких простых примерах суть синергетического подхода к биологическим задачам.

Заметим, что некоторые примеры уже были использованы нами в книге «Тайны Природы»<sup>3</sup>. Одним из важнейших в биологии считается следующий вопрос: каким образом происходит рост и развитие растений и животных, и как отдельные клетки узнают, какие именно органы они должны сформировать. Очень удачен в этой связи частный вопрос об образовании двухцветных полос у зебры (рис. 3.1).

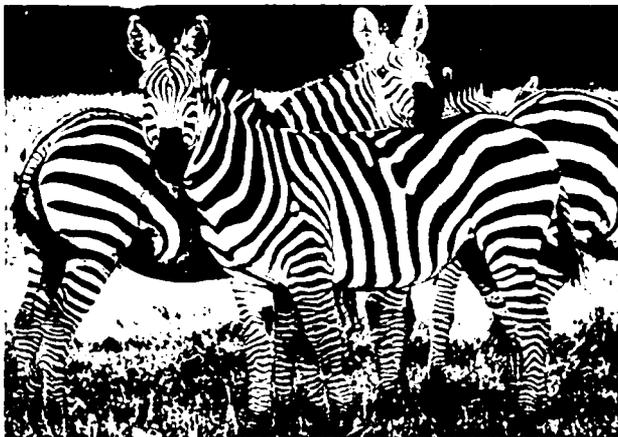


Рис. 3.1. Полосатые зебры — пример действия биологического параметра порядка

Воспользуемся идеей, принадлежавшей английскому математику Алану Тьюрингу, который предположил, что отдельные, поначалу не дифференцированные клетки производят определенные химические вещества, которые могут вступать в обмен друг с другом. Там, где концентрация этих веществ

<sup>3</sup>См. прим. к с.15. — *Прим. перев.*

достигает определенной величины, в работу включаются гены, которые и определяют дальнейшую судьбу клетки, т. е. дифференцируют ее как, например, нервную клетку или клетку глаза. На основании выводов, сделанных нами в предыдущих главах, мы можем считать эти морфогенетические поля не чем иным, как параметрами порядка. Пользуясь этим положением, можно объяснить не только полосы у зебр, но любую подобную «периодическую» структуру (например, позвоночный столб, элементы которого — при переменных размерах — очень точно повторяют друг друга).

Обсудим еще один пример, обнаруженный нами в ходе последних исследований; пример этот позволяет увидеть фундаментальные проблемы биологии в новом свете. Как известно, человеческое тело состоит из миллиардов отдельных клеток, среди которых есть клетки, образующие костные ткани, мышечные ткани, нервные клетки и т. д. Все эти клетки тесно взаимодействуют друг с другом и обеспечивают протекание процессов, характерных для высших организмов: дыхание, движение, кровообращение и т. п. Рассмотрим процесс движения. Конечности (руки и ноги) должны двигаться совершенно особым образом, в соответствии с неким «паттерном движения», в равной степени присущим человеку при ходьбе или беге и скачущей любым из аллюров лошади. Каким образом можно обобщить результаты наблюдений за столь различными, казалось бы, типами поступательного движения? Как раз здесь и вступает в игру синергетика — она поможет нам разобраться с качественными отличиями между всеми упомянутыми (и неупомянутыми) типами движения. Американским физиологом Скоттом Келсо был проведен очень простой и в то же время красивый эксперимент, который мы сейчас и опишем. Каждый читатель легко может повторить действия, которые выполнялись испытуемыми в ходе этого опыта. Келсо просил испытуемых двигать указательными пальцами, расположенными, как показано на рис. 3.2. Пальцы двигались параллельно до тех пор, пока Келсо не давал указания ускорить движение. К величайшему удивлению участников эксперимента, изменение ритма движения неожиданно — и при этом совершенно произвольно! — изменяло положение пальцев относительно друг друга. Пальцы больше не двигались параллельно; они сходились и расходились с различной степенью симметричности, но никак не параллельно! (См. рис. 3.3.)

Несколько лет назад, услышав о наших работах по синергетике, в которых рассматривались фазовые переходы, Скотт Келсо приехал к нам в Зиндельфинген и предложил объяснить обнаруженный им феномен. Мы (Г. Х.) решили применить к этому случаю синергетический подход. Первый

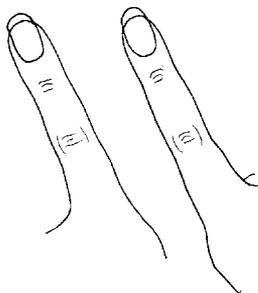


Рис. 3.2. Исходное — параллельное — положение пальцев в эксперименте С. Келсо

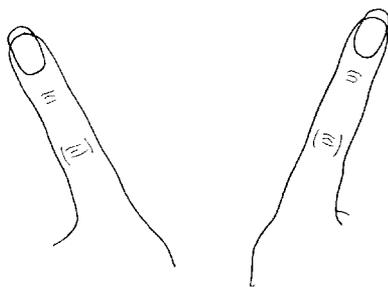


Рис. 3.3. Конечное положение пальцев в эксперименте С. Келсо: пальцы расположены уже не параллельно, а симметрично

вопрос, на который следовало ответить, касался определения параметра порядка. Это должна быть величина, определяемая на макроскопическом уровне, и кроме того, очевидно, что искомый параметр порядка связан с положением пальцев относительно друг друга — сдвигом по фазе, выражаясь на профессиональном жаргоне.

Теперь, после бесед с голландским физиологом Онно Мейером, я понимаю, что подобное заявление оказалось для физиологов настоящим потрясением, ведь такой «параметр порядка», управляющий мышечной тканью по принципу подчинения себе ее клеток, есть совершенно абстрактная величина, которую, правда, можно измерить с помощью угловой меры, но за которой не стоит ничего материального. С точки зрения синергетики, ничего удивительного в этом нет: ведь цилиндрические ячейки, возникающие в нагреваемой жидкости, тоже, по сути, являются абстракцией — они представляют собой форму для движения материи, не будучи при этом материей сами.

Как мы уже видели, рассматривая пример с жидкостью, поведение параметра порядка — по крайней мере, в несложных случаях — можно смоделировать движением мяча по холмистой местности. Но что же выступит в данном случае в роли «холмистой местности»? Здесь нам придется воспользоваться законом симметрии. Как и «холмистый ландшафт» на рис. 2.7, наш новый ландшафт должен быть симметричен относительно вертикальной оси; т. е. его правая и левая части должны быть зеркальным отражением друг друга, так как пальцы правой и левой рук оказываются в данном случае совершенно равноправны. Кроме того, колебания фазы должны быть пери-

одичными. Этих несложных условий вполне достаточно для достижения нашей цели.

На рис. 3.4 приведена последовательность рисунков, на которых представлены интересующие нас ландшафты. По горизонтальной оси каждой системы координат откладывается фаза, а по вертикальной — высота холмов, по которым скатывается мяч. Рассмотрим каждый рисунок отдельно, начиная с верхнего левого. Каждый последующий рисунок отличается от предыдущего тем, что описывает изменения в движении пальцев с увеличением скорости. Начальному медленному движению пальцев (рис. 3.2) соответствует положение мяча, показанное на рис. 3.4 вверху справа; фаза при этом равна  $\pi$ . По мере того как скорость движения пальцев увеличивается, верхняя долина деформируется и становится все более плоской — в конце концов, мяч с нее скатывается. Так как скорость продолжает увеличиваться, мяч остается лежать в нижней долине; это положение соответствует движению пальцев, показанному на рис. 3.3, а фаза при этом равна нулю.

Продемонстрировав Келсо эту нехитрую последовательность, мы еще и сделали несколько прогнозов, верность и точность которых он вскоре смог проверить с помощью новых экспериментов. Мы утверждали, например, что если процесс запустить в обратном направлении, то мяч так и не сможет покинуть глубокую долину. Для испытуемых это выглядело так: они начинали быстрое движение пальцами из положения, показанного на рис. 3.3, и постепенно снижали скорость, однако — как бы медленно ни двигались пальцы — возвращение в положение, показанное на рис. 3.2, не происходило; раз за разом в ходе эксперимента Келсо наблюдал эффект гистерезиса. Кроме того, следует обратить внимание на так называемые критические флуктуации, столь часто встречающиеся в синергетике при исследовании параметров порядка переходных процессов. Возникновение флуктуаций связано с изменением верхних долин; мы предложили Келсо измерить колебания фаз, при которых у испытуемых совершался переход от одного положения пальцев к другому — хоть и произвольный, но всегда зависящий от скорости движения. Келсо удалось экспериментально подтвердить существование неких критических колебаний. Это, в свою очередь, превосходно согласуется с выводами синергетики относительно самоорганизующихся систем (кроме того, мы с вами уже рассмотрели несколько примеров из физики, наглядно подтверждающих это положение).

Однако мы можем сделать и куда более значительный вывод. Исходя из представлений о том, как именно происходит управление движением пальцев и переход от одних движений к другим, можно утверждать, что популярная сегодня модель функционирования мозга неверна. Предполагая,

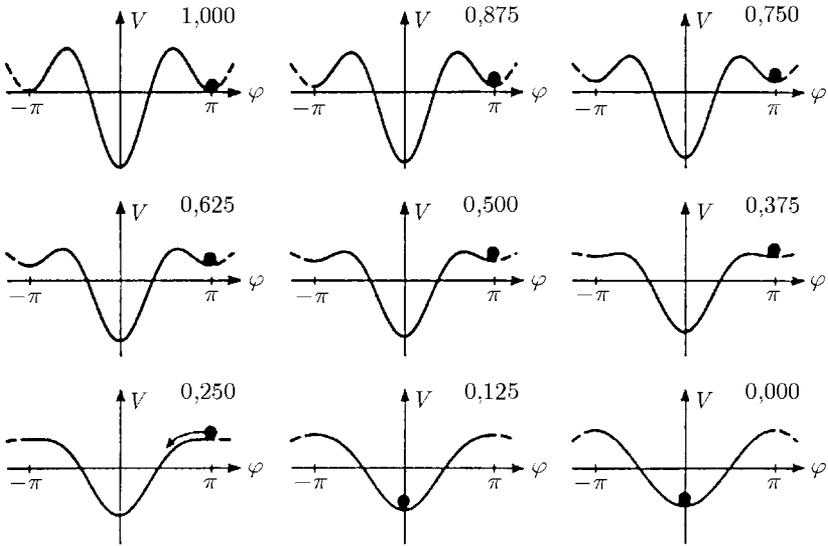


Рис. 3.4. Поведение параметра порядка «сдвиг по фазе» проиллюстрировано серией рисунков, на которых изображен катящийся по холмистому ландшафту мяч. Ландшафт на каждом рисунке определяется значением фазы  $\varphi$ . По мере того, как скорость движения пальцев возрастает, ландшафт начинает деформироваться, что отражено в последовательности рисунков, которые следует рассматривать, начиная с верхней строки и слева направо. На верхнем левом рисунке мяч находится в абсолютно устойчивом положении в одной из долин; этот рисунок соответствует медленному «параллельному» движению пальцев. На нижнем правом рисунке эта долина исчезает совсем, и мяч находится в единственной точке минимума; этот рисунок отражает ситуацию, в которой пальцы уже совершили переход к «симметричному» движению

что мозг работает подобно электронному компьютеру, приходится согласиться с тем, что существуют некие «моторные программы», управляющие движениями отдельных конечностей, и при переходе от одного вида движения к другому мозгом осуществляется некое «переключение» с одной программы на другую. Такого рода переключения, действительно производимые компьютером при переходе от программы к программе, ни в какой мере не связаны с какими бы то ни было колебаниями (машины колебаниям не подвержены). Появление критических колебаний в данном случае является признаком того, что речь идет не о механической смене заложенных в машину программ, а о протекающих в нервной системе процессах само-

организации. Иными словами, эксперимент и его теоретическое обобщение указывают на то, что мозг является самоорганизующейся системой.

Эффект самоорганизации, описанный на примере движения пальцев — лишь первый пример интерпретации координации движений с помощью синергетики. Вообще же существует целый ряд других координационных процессов, при которых происходит переход от одного вида движения к другому; среди них исследованные тем же Келсо движения плеча, предплечья и кисти (рис. 3.5), или эксперименты, в которых два сидящих человека покачивают правыми ногами, сначала медленно и в противофазе; с увеличением скорости движения ноги начинают двигаться параллельно. На конференции, которая проходила в 1991 году в Амстердаме и была посвящена биомеханике человека, выяснилось, что эксперименты Келсо и наши теоретические работы по синергетике вызвали целую лавину других исследований в этой области.

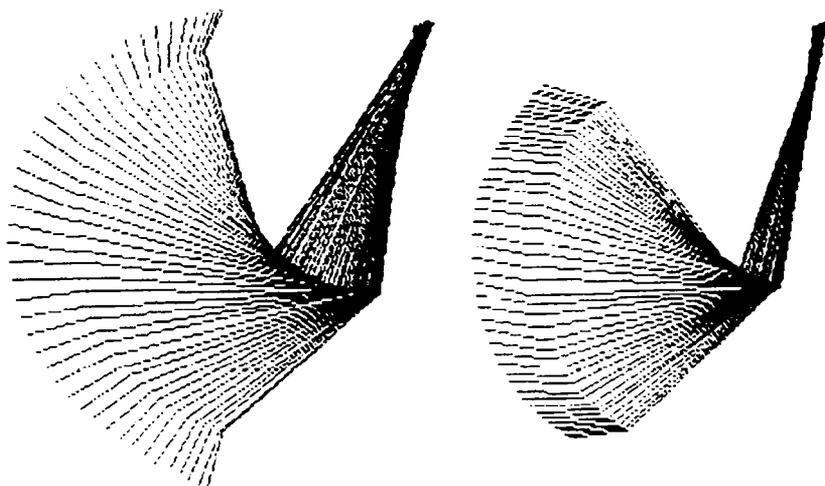


Рис. 3.5. Два различных типа движения руки: плеча, предплечья и кисти (линиями показаны положения руки через равные промежутки времени)

Естественно, имея перед глазами ту картину мира, что была порождена механистическим мировоззрением и все еще не сдает позиций, невольно задаешься вопросом: каким же образом параметр порядка — столь нематериальное нечто — способен управлять вполне материальными клеточными

тканями? Однако и при синергетическом взгляде на мир этот вопрос остается ключевым. Такой параметр порядка, как «сдвиг по фазе», представляет собой, в сущности, показатель кооперации всех отдельных клеток, которые, с одной стороны, сами создают этот параметр, а с другой — подчиняются его воздействию. Это воздействие распространяется на отдельные клетки, но не как на материальные сущности (как в примере с лазером), а, скорее, на некие нематериальные состояния, как в случае нагреваемой жидкости. Для нашего мышления это весьма серьезное препятствие, само существование которого показывает, насколько радикального переворота в мировоззрении требует путь, которым синергетика ведет нас к созданию новых понятий и концепций.

#### 4. Электрическая активность мозга

Рассмотрим еще один пример, который показывает, насколько адекватными оказываются концепции синергетики при исследовании мозга, и в то же время «подберемся поближе» к самому мозгу. Речь идет об анализе ЭЭГ, т. е. электроэнцефалограмм. При проведении экспериментов на черепе испытуемого крепятся электроды, измеряющие электрическое напряжение (рис. 4.1).

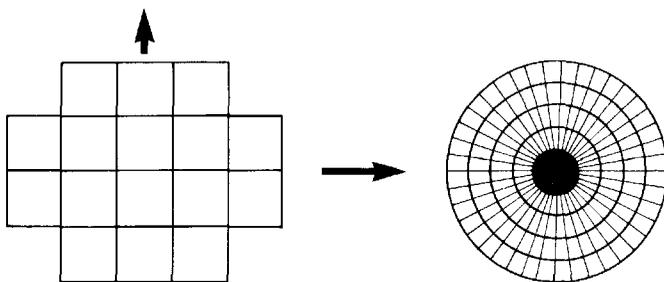


Рис. 4.1. Схема (вид сверху) закрепления электродов на черепе испытуемого

Показания каждого электрода отображаются в виде кривой, выражающей зависимость изменения напряжения от времени; эти кривые выводятся на экран. Врачи и исследователи давно обнаружили, что целесообразно записывать не просто точную микроструктуру этих кривых, а отфильтровывать так называемые частотные диапазоны. Это означает, что кривые

определенным образом сглаживаются. В зависимости от способа сглаживания (т. е. частотной фильтрации) различают определенные волны, о которых и пойдет речь в нашем анализе экспериментальных данных, полученных Дитрихом Леманом (Цюрих, Швейцария).

Каждому участку (с закрепленным на нем электродом) головы испытуемого соответствует определенный квадрат на схеме, выводимой на экран, где и отображаются все изменения альфа-волн, излучаемых мозгом во время эксперимента. Глядя на схему (рис. 4.2), мы можем получить представление об этих изменениях. По вертикали нанесены значения напряжения, а по горизонтали — временные интервалы. Представленные графики несколько абстрактны и не дают наглядного представления о стоящих за ними процессах. Однако используя их, мы можем реконструировать общую картину распределения напряжений, возникающих в мозге в каждый момент времени (рис. 4.3). На рисунке показаны бегущие волны электрической активности, которые, однако, способны совершать в направлении своего распространения нерегулярные колебания и отчасти стоять на месте. То есть наблюдается постоянное движение в обе стороны таких волн.

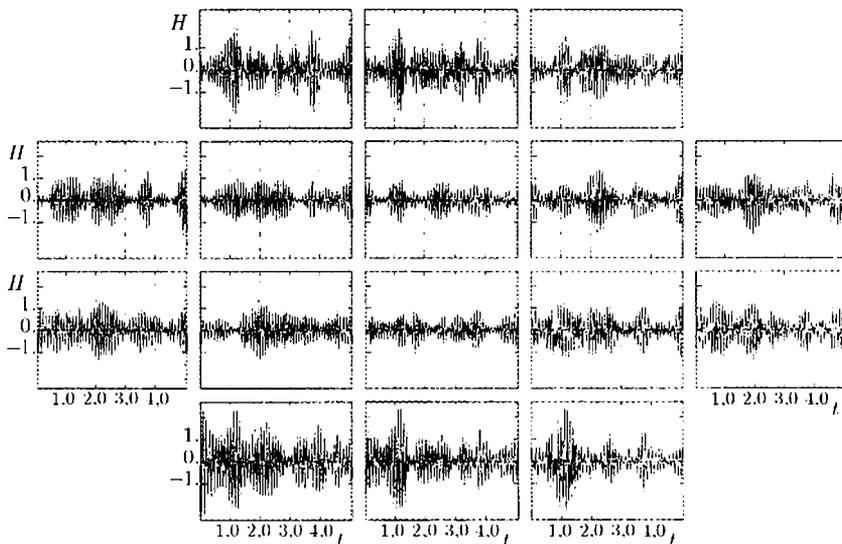


Рис. 4.2. Каждому из электродов (схема 4.1) соответствует серия, изображенная в соответствующих квадратах

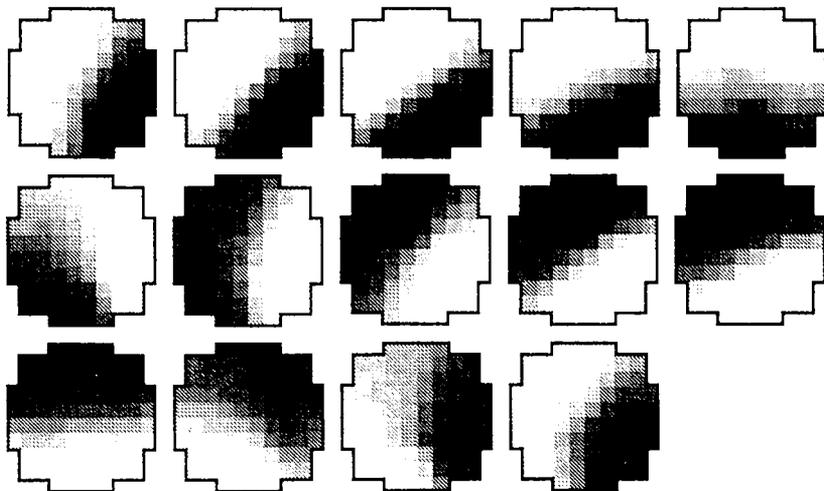


Рис. 4.3. Реконструкция пространственно-временных структур, представленных на рис. 4.2

Так каким же образом синергетика вносит порядок в этот хаос? Для начала выскажем одну довольно-таки смелую гипотезу. Анализируемые ЭЭГ были сняты Дитрихом Леманом с испытуемых, находившихся в состоянии полного покоя с закрытыми глазами, но не спящих. Наше предположение заключается в следующем: «система» мозга, находящегося в подобном неустойчивом состоянии (соответствующем точке неустойчивого равновесия), способна очень быстро и спонтанно начать действовать, изменяя свое состояние. А синергетика как раз и занимается изучением подобных процессов в сложных системах.

Возникают определенные кластеры активности, очень схожие с аналогичными структурами в гидродинамике, причем каждая такая структура выстраивается из очень небольшого количества основных элементарных структур. Отсюда можно сделать вывод, что волны сложной природы, издаваемые мозгом, также могут быть построены на основе немногих первоэлементов. Эту гипотезу мы даже смогли впоследствии частично подтвердить — как на примере так называемых альфа-волн (положенных в основу настоящего рассмотрения), так и на примере эпилептических припадков.

Каждая из элементарных структур управляется неким параметром порядка. Сочетание действий этих параметров и дает нам целостную картину

наблюдаемой сложной структуры. Какова же динамика параметров порядка? Неожиданное открытие в этой области было сделано Агнес Баблюянд (Брюссель).

Используя теорию хаоса для анализа эпилептических припадков, она обнаружила, что — говоря языком синергетики — в действии участвуют только три параметра порядка. Динамика этих трех параметров была изучена Рудольфом Фридрихом, Арнимом Фуксом и нами (Г. Х.), в результате чего было установлено, что в данном случае можно говорить о так называемом детерминированном хаосе, т. е. о детерминированных, начисто лишенных случайности процессах (такие процессы можно воспроизвести с помощью электронного компьютера). Альфа-волны же оказались крепким орешком: мы столкнулись с большими трудностями, пытаясь добиться от них того детерминизма, какой присущ компьютерным процессам. Многие указывало на то, что структура ритма волн совершенно случайна. Наблюдаемые нами колебания представляли собой, по сути дела, проявление процессов самоорганизации.

Почему именно мозг человека, находящегося в состоянии полного покоя, оказывается воплощением нестабильности? Разве не должно наше тело как раз в таком состоянии быть особенно «стабильным»? В последние годы мы много дискутировали на эту тему с физиологами Хансом-Петером Кёпхеном и Хольгером Шмид-Шёнбайном. Их исследования подтверждают, что именно в состоянии полного покоя испытуемых особым колебаниям подвержены такие величины, как кровяное давление, частота сердечных сокращений и частота дыхания. Для сохранения способности к быстрой адаптации система вынуждена пребывать в состоянии нестабильности. Так картина, представляющая человека в состоянии полного покоя, обретает совершенно новые краски не только для физиологов, но и для психологов. Только когда телу предложены специальные задачи, оно начинает реагировать на них определенным — «стабильным» — образом. Особенно яркое подтверждение это предположение находит в новых экспериментах американского физиолога Скотта Келсо. Келсо исследовал магнитное поле мозга и обнаружил, что — выражаясь в терминах синергетики — в процесс оказываются вовлечены особые, причем немногочисленные, «параметры порядка», или «моды», управляющие функциями мозга. Флуктуации при этом исчезают, сменяясь вполне однозначной картиной мозговой деятельности, которая воплощается в генерируемых мозгом магнитных полях.

Итак, мы выяснили, насколько применима синергетика в области психофизиологического эксперимента. Движения пальцев рук, электро- и магнитоэнцефалограммы являются наглядными и поддающимися измерению

внешними проявлениями протекающих в мозге процессов. Однако мы должны обратить внимание и на другие, отличные от описанных, процессы, характеризующие деятельность нашего мозга. Речь идет о совершенно особом мире — мире человеческого восприятия, связанном, в первую очередь, с работой сознания, которую — несмотря на ее очевидность — очень сложно исследовать непосредственно. Именно этому направлению исследований и посвящена следующая глава, в которой будет показано, насколько тесно связаны между собой концепции синергетики и гештальтпсихологии.

## 5. Гештальтпсихология

Идея образа имеет собственную долгую историю, и нас до сих пор продолжают волновать слова Гёте:

«"Морфология" покоится на убеждении, что все существующее должно также обнаруживаться и показываться. Это основное положение имеет для нас значимость, начиная от первых физических и химических элементов до самого духовного проявления человека.

Мы сейчас же обращаемся к тому, что имеет образ. Неорганическое, растительное, животное, человеческое — все само обнаруживается, оно является тем, что оно есть, нашему внешнему, нашему внутреннему чувству.

*Образ есть нечто подвижное, становящееся, исчезающее. Учение об образах есть учение об изменениях. Учение о метаморфозе — ключ ко всем обнаружениям природы.»<sup>4</sup> (Курсив наш. — Г. Х., М. Х.-К.)*

В естественно-научной форме идея образа («гештальта») особенно ярко воплощена в концепциях гештальтпсихологии, основоположниками которой считаются Макс Вертгеймер и Вольфганг Кёлер. Уже в 1912 году Вертгеймер говорил об «образах движения», а в 1920 Кёлер публикует свою работу «Физические образы в состоянии покоя и в стационарном состоянии»<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup>Перевод с немецкого дается по изданию: *И. В. Гёте. Избранные сочинения по естествознанию. Перевод и комментарии И. И. Канаева.* М.: Изд-во АН СССР, 1957 (Серия «Классики науки»). — *Прим. перев.*

<sup>5</sup>W. Köhler. *Die physischen Gestalten in Ruhe und im stationären Zustand.* Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1920.



Рис. 5.1. Картина кисти Джузеппе Арчимбольдо: лицо ... или фрукты и овощи?

После того, как в 1933 году Вертхеймер и Кёлер вынуждены были эмигрировать, идеи их оказались преданы забвению; и лишь недавно это направление в психологии вновь получило признание благодаря работам бременских исследователей Петера Крузе и Михаэля Штадлера, внесших важный вклад в процесс возрождения принципов гештальтпсихологии. Эти психологи указывали (как, кстати, и один из авторов настоящего труда, — Г. Х.) на несомненное сходство гештальтпсихологии и синергетики. Как ту, так и другую науку прекрасно характеризует одна фраза: «Целое больше суммы составляющих его элементов». Как приверженцы этой идеи Вертхеймер и Кёлер оказались в оппозиции распространенному тогда — да, возможно, и теперь — структуриализму, последователи которого пытались через исследование частных прийти к пониманию целого. Утверждение «Целое больше суммы составляющих его элементов» можно интерпретировать еще и вот каким образом: целое есть не что иное, как взаимодействие элементов, ведущее к эмергенции новых качеств. Некоторое представление о степени правоты Вертхеймера и Кёлера можно получить, рассматривая картину средневекового художника Арчимбольдо (рис. 5.1). На первый, поверхностный, взгляд, здесь изображено человеческое лицо. Однако при более тщательном рассмотрении становится очевидным тот факт, что элементы этого портрета суть не что иное, как фрукты и овощи.

Концепция гештальта включает в себя и понятие прегнантности (*Prägnanz*), в соответствии с которым процесс восприятия подчиняется относительно простым правилам, проиллюстрированным на рис. 5.2 и 5.3. По-видимому, человек при восприятии стремится к «разложению» сложных конфигураций на более простые. Следует также упомянуть и об устойчивости — или, если можно так выразиться, независимости — восприятия от различных помех. Начнем с простого примера. Мы способны узнавать лица вне зависимости от их положения в пространстве, их величин, ориентации и освещенности. Мы способны узнать даже искаженные или «смазанные» изображения лица (рис. 5.4, 5.5, 5.6, 5.7). Художники часто используют подобные трансформации как стилистический прием (рис. 5.8).

Рассмотрим поразительную картинку, созданную Г. Канижей (рис. 5.9). Здесь мы странным образом обнаруживаем «несуществующие» треугольники. Наш мозг при восприятии дополняет изображение деталями, которых в действительности на рисунке нет. Но ведь и жидкость, о которой мы говорили в главе 2, «в действительности» не содержит никаких цилиндрических ячеек.

Немалый интерес для психологов представляют и так называемые двойственные, или амбивалентные, изображения (рис. 5.10 и 5.11). На зна-

менитом кубе Некера каждую из вертикальных граней мы попеременно принимаем то за переднюю, то за заднюю; так же попеременно — одновременно здесь исключается — на рис. 5.11 мы обнаруживаем то изображение вазы, то двух мужских лиц в профиль. Даже при всем желании невозможно сосредоточиться только на одном из «способов восприятия»; смена изображений происходит совершенно произвольно: ваза — профили — ваза — . . . и т. д. Наше восприятие постоянно колеблется между этими двумя состояниями, т. е. наблюдается процесс, который повсеместно происходит в системах, изучаемых синергетикой. Итак, мы убедились в том, что аналогии между функционированием мозга и давно известными в синергетике явлениями далеко не случайны и многочисленны; перед нами снова встает вопрос: насколько велик диапазон применимости этих аналогий?

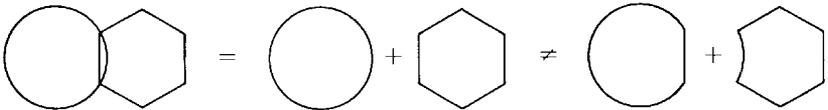


Рис. 5.2. Пример беременности. Фигура, показанная слева, воспринимается как сочетание двух выпуклых фигур — круга и шестиугольника, а не каких-либо других

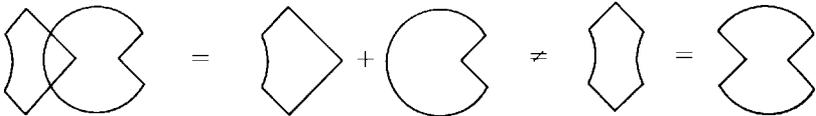


Рис. 5.3. Еще один пример беременности

До сих пор мы были заняты, в определенном смысле, макроскопическими «продуктами» деятельности мозга и не касались самого материального субстрата. Следующая часть нашей книги посвящена именно этому субстрату.



Рис. 5.4. Зашумленное черно-белое изображение



Рис. 5.5. Изображение, полученное с помощью низкочастотного фильтра

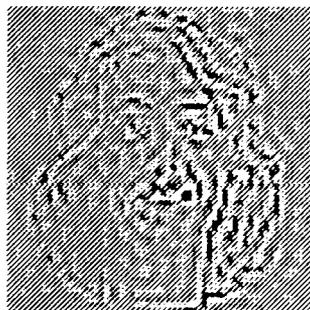


Рис. 5.6. Изображение, полученное с помощью высокочастотного фильтра. Результат такой фильтрации очень напоминает карандашный набросок или карикатуру



Рис. 5.7. Искаженное изображение



Рис. 5.8. «Частотная фильтрация» в искусстве: «Руанский собор» Клода Монэ

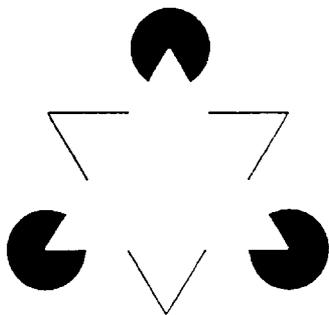


Рис. 5.9. Наша система восприятия дополняет фигуры Канижи фигурами, которых в действительности на рисунке нет

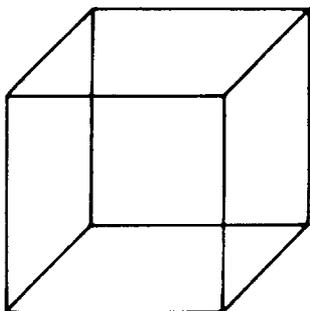


Рис. 5.10. Знаменитый куб Некера: передняя грань куба становится задней, и наоборот

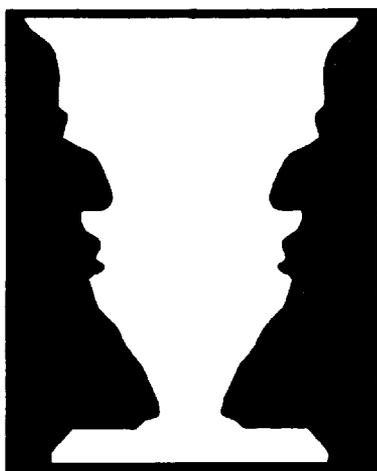


Рис. 5.11. Ваза или два профиля?

## ЧАСТЬ II

# Мозг. Материальный субстрат: от макроскопического к микроскопическому

В основе западного научного мышления лежит убеждение в том, что все непосредственно доступные восприятию макроскопические явления объясняются процессами, происходящими на микроскопическом уровне. История развития физики — отличная тому иллюстрация. Макроскопический феномен электрического тока сводится к движению мельчайших частиц, электронов, а магнетизм — к взаимодействию «элементарных магнетиков», т. е., по существу, тех же электронов, обладающих магнитным моментом. Интересно, что почти для всех макроскопических явлений сначала были открыты феноменологические законы — такие, например, как закон Ома, согласно которому сила электрического тока в проводнике пропорциональна поданному на него напряжению; позднее этот закон мог бы быть выведен уже в рамках учения о движении электронов в металлах. «Погружение» в микромир обогатило нас поистине сенсационными открытиями: электроны, о которых уже упоминалось, оказалось, обладают свойствами не только частиц, но и волн. Впрочем, обнаруживается, что не менее потрясающие идеи может подарить человечеству и возвращение из глубин микромира в макромир — но об этом несколько позже.

Сначала остановимся на аналитическом методе, имеющем фундаментальное значение не только для изучения мозга, но и для науки вообще. Вооружившись таким образом, мы попытаемся исследовать «элементарные частицы» мозга. Начнем с того, что проследим, насколько это возможно, связи между «элементами» и выполняемыми ими функциями на примере глаза. Избрать именно процессы зрительного восприятия нас побудили две веские причины. Во-первых, эти процессы на данный момент оказываются лучше всего исследованными. Во-вторых, мы полагаем, что зрительные процессы могут послужить нам в качестве модели при исследовании высокоуровневых, абстрактных процессов мышления; выражаясь конкретнее, можно высказать предположение такого рода: мозг в процессе мышления использует принципы, во многом схожие с принципами зрительного восприятия. Об этом свидетельствует и такое прижившееся в языке словопотребление, как «рассмотреть проблему», «вести себя осмотрительного»,

«видеть смысл» и т. д. Математики говорят: «Как можно легко увидеть, . . . » вместо «Как можно легко доказать, . . . » (хотя любому сколько-нибудь разбирающемуся в математике человеку, конечно же, ясно, что доказательства очевидными не бывают).

Естественно, одно лишь словоупотребление не в состоянии подтвердить истинность нашего предположения; однако оно может послужить в некотором смысле «отправной точкой», ведь такого рода устойчивые словосочетания несут в себе подчас гораздо более глубокое философское содержание, нежели то, что вкладывается в них в повседневной речи.

Итак, попробуем «взглянуть» на мозг и начнем с нейронов.

## 6. Мозг и его элементы — нейроны

### *а) Исследования мозга: вчера и сегодня*

Человеческий мозг является, пожалуй, самой завораживающей структурой из числа предоставленных в наше распоряжение Природой. Обладая весом около полутора килограммов, мозг содержит в себе невообразимое количество нервных клеток, называемых нейронами; их число — порядка 100 миллиардов — сопоставимо с числом звезд в Млечном Пути. Получить наглядное представление об этом числе можно таким, например, способом. Вообразим себе, что в объеме размером с наперсток могут разместиться ровно 100 нейронов. Ну а чтобы расположить таким образом 100 миллиардов нейронов, понадобится куб со стороной 10 метров, до отказа набитый наперстками, в каждом из которых, как мы вообразили, содержится по 100 нейронов. Наш мозг по сравнению с этим кубом очень мал; и настоящие нейроны — совсем крошечные. Более того: помимо нейронов в мозге находятся еще и так называемые глиальные клетки, а также кровеносные сосуды, обеспечивающие все клетки питательными веществами, кислородом, гормонами и т. п. Нельзя забывать и о многочисленных связях между нейронами, которые пронизывают мозг и — подобно телефонным проводам — обеспечивают связь между нейронами. Если подумать о том, что каждый нейрон может быть таким образом связан с десятком тысяч своих собратьев, то перед нашим мысленным взором непременно возникнет образ чрезвычайно плотной сети — поистине неимоверного чуда миниатюризации. Все это приводит нас к мысли о том, насколько сложно строение мозга и, соответственно, насколько трудновыполнимы задачи, связанные с исследованием столь сложного объекта — и еще колоссальной выглядит идея создания подобной конструкции. В качестве иллюстрации используем

такой факт: ежесекундно мозг обрабатывает огромные объемы получаемой в процессе восприятия информации (сюда входят любые проявления внешнего мира: живописные картины, зажигательные мелодии, приятные запахи и т. д.) и делает это с молниеносной быстротой, а кроме того, еще и сохраняет результаты обработки в гигантском объеме памяти порядка  $10^{10}$  бит.

Однако связь мозга с мышлением и чувствами не всегда была для людей столь уж очевидной. В древние времена эти функции приписывались сердцу. Отголоски такого взгляда на природу мышления мы и по сей день находим в речи: «с открытым сердцем», «тяжело на сердце», «затаить в сердце обиду» и т. п. Прошло немало времени, прежде чем роль мозга в мышлении, чувствовании и восприятии стала общепризнанной. История древних исследований мозга очень показательна: до тех пор, пока не появится и не закрепится верная теория, очень трудно порой бывает постичь суть исследуемого явления.

Знаменитый греческий врач Гиппократ (460–370 г. до н. э.), стремившийся поставить медицину на естественно-научный фундамент, уже имел взгляды на мозг, схожие с сегодняшними, однако они не получили признания современников и потомков — ведь этим взглядам противостояли воззрения не менее прославленного грека, великого философа Аристотеля (384–322 г. до н. э.), утверждавшего, что мышление порождается сердцем. Уже после смерти Аристотеля, около 300 г. до н. э. в Александрийской академии собрались ученые и врачи, объединенные интересом к изучению функций мозга и нервной системы. Двое из этих античных ученых мужей — Герофил (335–? г. до н. э.) и Эрасистрат (300–240 г. до н. э.) — вошли в историю медицины как основоположники новой науки и первооткрыватели мира человеческой анатомии. Не взирая на запрет, касавшийся вскрытия тел умерших, они занимались изучением внутреннего строения человеческого тела; более того, они проводили эксперименты на людях, приговоренных к смерти, выяснив с помощью этих экспериментов множество фундаментальных фактов (обнаружилось, например, что человек теряет способность видеть, если нарушена связь между глазами и мозгом). Исследования привели Герофила и Эрасистрата к убеждению, что человеческое тело обладает обширной нервной системой, центром которой является мозг. Они предположили, что мозг, кроме того, служит местом обитания души и связан с процессами мышления. Тем самым, собственно, и были заложены первые камни фундамента, на котором выстроена вся современная теория мозга. Впрочем, авторитет Аристотеля был настолько высок, что и после открытий, сделанных александрийскими анатомами, взгляды его незыблемо продержались еще в течение нескольких веков.

Окончательный перелом в теории произошел только во II в. н. э. благодаря трудам греко-римского врача Клавдия Галена. Гален использовал для своих опытов раненных гладиаторов и трупы животных, однако до современного уровня исследований мозга было еще далеко. Более тысячи лет продолжался «застой» в экспериментальной медицине, жившей все это время за счет знаний, полученных древними греческими и римскими учеными, подобными Галену.

Вплоть до эпохи Возрождения ученые не нарушали табу; с приходом Ренессанса началась новая эпоха открытий. Анатомы того времени уже знали, как выглядит мозг, укрытый от глаз в черепной коробке: серо-белая масса, напоминающая формой извилин грецкий орех. После изобретения голландцем Антони ван Левенгуком микроскопа (а произошло это в 1677 году) ученые получили возможность заняться изучением структуры мозга и нервных клеток. Итальянскому нейрологу Камилло Гольджи мы обязаны изобретением метода, позволяющего рассмотреть под микроскопом отдельные нервные клетки, особым образом окрашенные. Благодаря этому методу перед учеными открывались все новые и новые детали строения как всего мозга, так и его отдельных составляющих; к этому времени относится знакомство анатомов со строением нервных клеток. Параллельно с этими исследованиями шло развитие и других дисциплин. Примерно с середины XIX в. начали бурно развиваться методы электрофизиологии, а с ними — неперенные электрические измерения при изучении нервных клеток. Эти работы заложили фундамент для дальнейших исследований нейронов, причем прогресс в этой области часто бывал напрямую связан с открытиями физиков и химиков.

Современные исследования мозга преследуют несколько различных целей. Во-первых, эти исследования, естественно, направлены на решение медицинских задач, а значит, изучаются, прежде всего, болезни мозга: шизофрения, маниакально-депрессивные состояния, а также болезни Паркинсона, Альцгеймера, опухоли головного мозга, кровоизлияния в мозг и т. п. Найдя причины этих недугов, ученые-медики, вероятно, смогут научиться излечивать и предотвращать такие заболевания. Кроме того, в процессе исследований постоянно совершенствуются и методы диагностики, как это произошло, например, при изучении опухолей мозга и кровоизлияний. Следующее, не менее важное направление исследований мозга определяется чисто научными интересами ученых, т. е. нацелено оно на получение фундаментальных знаний о строении и функционировании мозга, о принципах, на которых основана почти невероятная — хотя, безусловно, кажущаяся — легкость, с которой человеческий мозг собирает и обрабатывает инфор-

мацию. Какова природа впечатлений — зрительных, обонятельных и т.п.? Каким образом происходит обработка информации, переданной ощущениями? Как работает память? Что определяет способность человека чему-либо обучаться? Существенно сложнее понять, что стоит за такими чувствами, как ярость, печаль, радость; каким образом протекает процесс проективного мышления, и как все это влияет на развитие планов действий, в конечном счете приводящих желание к исполнению . . . Перечисление способностей человеческого мозга, естественно, можно продолжить и дальше — перед учеными простирается гигантское, почти необозримое поле деятельности. Наконец, назовем еще одно направление в науке, занятое раскрытием тайн мозга: теория вычислительных систем, напрямую связанная с исследованием «принципов действия» человеческого мозга. Уже сейчас существуют компьютеры, работающие по принципу нейронных сетей (подробнее об этом мы расскажем в главе 31) — природного феномена, воспроизведенного человеческими руками, попытка, так сказать, «подсмотреть» кое-что у Природы.

Естественно, ни одно из названных направлений не может существовать изолированно: все три тесно переплетаются друг с другом. Медицина нуждается в фундаментальных теориях, а информатика может, со своей стороны, привести нечто новое в понимание основных принципов функционирования человеческого мозга.

Наша книга посвящена, в основном, общим вопросам всех трех направлений, т. е. некоторым фундаментальным проблемам исследований мозга. Сначала попытаемся разобраться, насколько понимание природы отдельных его элементов — нейронов — может помочь нам проникнуть в тайну целого, в тайну человеческого мозга. Итак, начнем с рассмотрения строения и свойств нейрона.

### *б) Нейрон — основной элемент нервной системы*

Собственно говоря, нервная система представляет собой единство двух взаимосвязанных компонентов: центральной нервной системы, состоящей из головного и спинного мозга, и так называемой периферийной нервной системы, к которой относятся нервные волокна, связывающие мозг с органами чувств и мышцами.

Используя метод окрашивания, о котором уже упоминалось, нейроны можно наблюдать с помощью микроскопа. На рис. 6.1 представлена фотография окрашенной таким образом нервной клетки. Продолжительное изучение нервных клеток дает ученым основание предполагать, что все они



Рис. 6.1. Нервная клетка зрительной коры головного мозга кошки при значительном увеличении. В центре хорошо видно тело клетки, или *сóма*

имеют одинаковое строение. Это, разумеется, ни в коем случае не означает, что все нервные клетки выглядят одинаково; здесь, скорее, можно провести некоторую аналогию с ... цветами. Цветы, как известно, очень разнообразны: и высокие, на плотных стеблях, и вьющиеся, и цветущие всеми цветами радуги, с листьями самых причудливых форм и размеров. И все же каждый цветок непременно обладает корнем, стеблем, листьями и т. п. Похоже обстоит дело и с «внешним видом» нервных клеток (см. рис. 6.2):

в центре всегда находится тело клетки, или *сóма* (а), в котором происходят все процессы обмена веществ. От тела клетки отходят многочисленные разветвленные отростки, называемые за их форму дендритами<sup>1</sup> (б), которые осуществляют прием и интеграцию информации, поступающей от других нервных клеток. Среди отростков выделяется один очень длинный, называемый аксоном (в), функцией которого является передача информации от нейрона к структурам мозга или органам. Связь между нервными клетками осуществляется через синапсы (г). Соотношение размеров на рис. 6.2 соответствует действительному (за исключением аксона, который значительно укорочен). Таким образом, устроена нервная клетка относительно просто. Различные типы нервных клеток представлены на рис. 6.3. В дальнейшем нам еще предстоит убедиться в том, насколько велико разнообразие этих типов; клетки сетчатки глаза, например, обладают поистине экзотической формой.

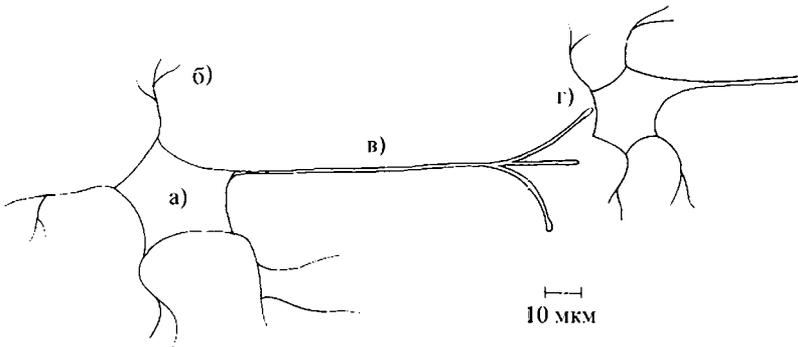


Рис. 6.2. Схематическое изображение нервной клетки (1 мкм = 1/1000 мм): (а) тело клетки (*сóма*); (б) дендрит; (в) аксон; (г) синапс. Аксон на этой схеме значительно укорочен

Теперь, когда мы познакомились со строением нервных клеток, перед нами встает принципиальный вопрос: каким образом передаются сигналы в нервной системе? Самым известным примером передачи сигнала в повседневной жизни является телефонная связь, в которой сигналы передаются посредством электрических импульсов. Еще в 1791 году итальянский врач и естествоиспытатель Луиджи Гальвани установил, что электрические про-

<sup>1</sup>От греч. *δενδρον* «дерево». — *Прим. перев.*

цессы имеют место и в нервной системе. Открытие это произошло совершенно случайно. Лягушачьи лапки, вывешенные им на балконной решетке, к величайшему удивлению ученого, дергались всякий раз, касаясь металлических прутьев. Дело было в том, что чугунная решетка и медные крючки, на которых висели лапки, образовали в совокупности нечто вроде гальванического элемента (этакую батарейку). Электрический разряд возбуждал мышцы лапки, вынуждая их сокращаться. Последующие опыты привели Гальвани к выводу о том, что в нервных волокнах протекают некие процессы, имеющие электрическую природу. Конечно, с помощью имевшейся в то время аппаратуры невозможно было точно измерить молниеносные изменения напряжения, возникавшие в ходе экспериментов. С тех пор методы измерения значительно усовершенствовались, и это позволяет ученым осуществлять подобные замеры не только в изолированных препаратах, но и в тканях живых организмов. Принципиальная схема проведения измерений показана на рис. 6.4. Внутри аксона осторожно вводится очень тонкий стеклянный электрод. Диаметр электродов, используемых в таких экспериментах, составляет примерно 0,5 микрометров (1 мкм = 0,001 мм. Для сравнения: толщина человеческого волоса — от 40 до 100 мкм!). Второй электрод вводится в окружающую аксон жидкость; он называется электродом сравнения. Напряжение, возникающее между этими двумя электродами, измеряется вольтметром, а результаты измерений в реальном времени записываются регистрирующим прибором.

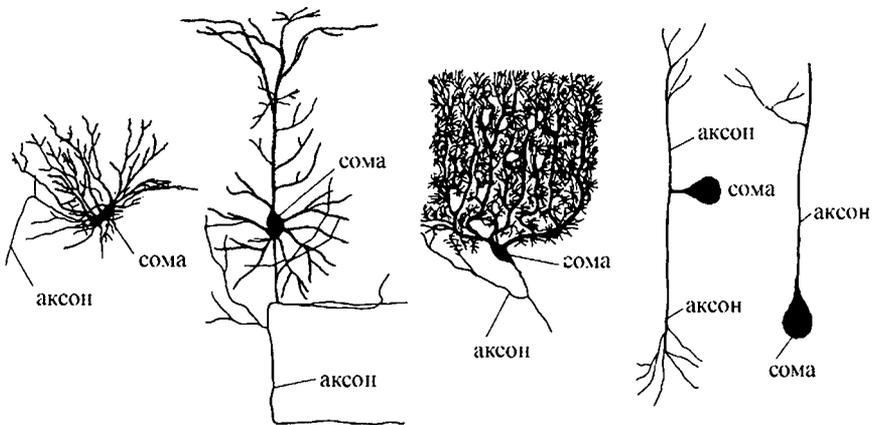


Рис. 6.3. Различные типы нервных клеток

Объектом опытов становились аксоны различных животных. При этом было установлено, что нервная система использует при передаче сигналов особого рода язык, или код, с помощью которого и осуществляется согласованная деятельность всей системы. В мозг поступают кодированные сигналы (например, боль от ушибленного пальца); в ответ мозг передает по соответствующим нервным волокнам некие управляющие сигналы нужным мышцам, на что они тем или иным образом реагируют. Интересно, что такого рода «передача информации», характерная для всех живых организмов, осуществляется у людей и животных по одному и тому же принципу.

Электрическое напряжение в аксоне возникает не только в момент передачи сигнала, но существует и тогда, когда аксон «не при исполнении» и находится в спокойном, не возбужденном состоянии. По отношению к окружающей его жидкости аксон заряжен отрицательно. Разница потенциалов между ними, разумеется, чрезвычайно мала, что-то около 70 милливольт (мВ). При возбуждении аксона происходит мгновенная смена зарядов, т. е. аксон приобретает по отношению к окружающей его жидкости положительный заряд. Этот весьма кратковременный процесс называется нервным импульсом (рис. 6.5), и обусловлен он прохождением заряженных частиц (ионов) сквозь поверхность аксона. Длительность одного такого нервного импульса составляет величину порядка одной миллисекунды, т. е. тысячной доли секунды. Скорость поистине молниеносная! Регистрирующее устройство отображает поступающие нервные микроимпульсы в виде характерных коротких вертикальных полос. После аксона нервный импульс отправляется далее, к синапсу.

Все нервные импульсы, проходящие через аксон, имеют постоянную длительность и интенсивность и протекают с одной и той же скоростью, которая зависит от диаметра и структуры этого конкретного аксона. Медленно проводящие аксоны обеспечивают импульсу скорость порядка 1 м/с ( $\approx 3,6$  км/ч); высокоскоростными проводниками считаются аксоны, в которых импульс достигает скорости порядка 100 м/с (т. е. 360 км/ч). На такой скорости сигнал преодолевает путь от мозга до кончика большого пальца на ноге примерно за  $1/50$  секунды. Нервные импульсы перемещаются по аксону, оставляя за собой участки, совершенно лишенные какого бы то ни было возбуждения и готовые принять следующий импульс (рис. 6.5). Такой механизм препятствует случайному перекрытию двух отдельных импульсов. Нервные импульсы играют в языке нервной системы роль знаков или букв. Учитывая, однако, что длительность и интенсивность нервных импульсов постоянна, остается только удивляться языку, обходящемуся всего лишь одной буквой. Как с помощью единственного знака можно передать хоть

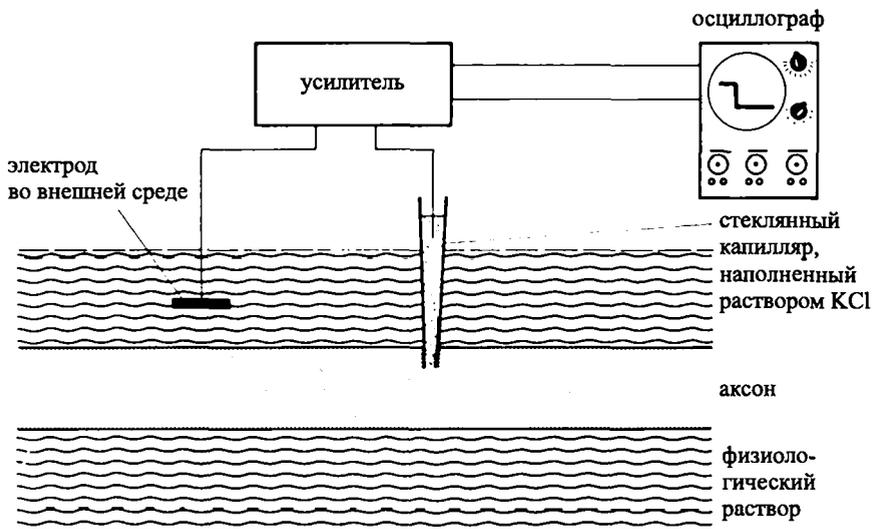


Рис. 6.4. Измерение напряжения на отдельном аксоне

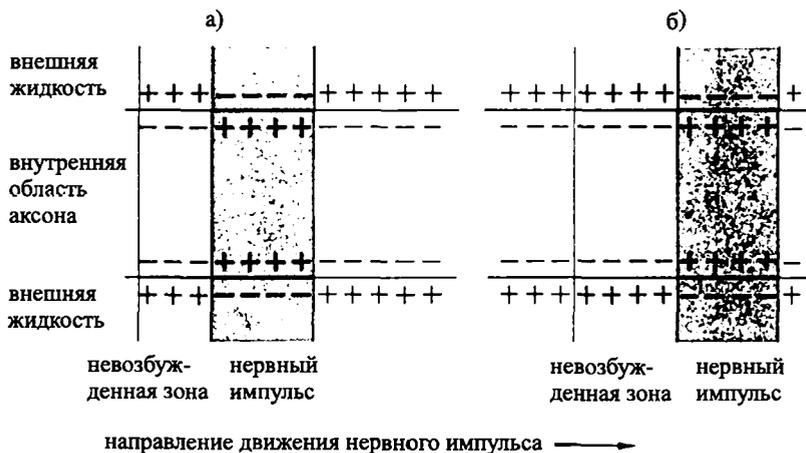


Рис. 6.5. Схематическое изображение нервного импульса в аксоне. На рис. (б) нервный импульс продвинулся несколько дальше, чем на рис. (а). Позади импульса движется невозбужденная зона

какую-то информацию? В латинском алфавите 26 знаков, в азбуке Морзе — три знака (точка, тире и пауза), компьютеры используют всего два знака, ноль и единицу (так называемый двоичный код).

Микроэлектродные исследования помогли найти ответ на этот вопрос. Дело в том, что нервные импульсы следуют друг за другом на различном расстоянии, т. е. частота импульсов может изменяться. Чем сильнее возбуждение аксона, тем ближе друг к другу располагаются импульсы и тем выше, следовательно, частота. В этом случае можно говорить об *интенсивности* передаваемого аксоном возбуждения.

Нервный импульс проделывает путь от сôмы через аксон к синапсу, т. е. к месту связи между данной и соседней нервной клеткой (рис. 6.5). Здесь сигнал передается химическим путем, посредством так называемых медиаторов. Работа химического механизма передачи сигнала между синапсами показана на рис. 6.6: одна из клеток выделяет особые химические вещества (нейромедиаторы), которые преодолевают узкую синаптическую щель и вызывают в соседней клетке соответствующую реакцию, которая, в свою очередь, приводит к возникновению в принимающей клетке электрического возбуждения.

Важно отметить, что в зависимости от осуществляемой функции различают возбуждающие и тормозные синапсы. Например, некая возбужденная нервная клетка, генерируя нервный импульс через тормозный синапс, может «погасить» возбуждение в другой клетке. Роль тормозных синапсов мы рассмотрим позднее, при обсуждении сетчатки. Бывает, хотя и весьма редко, что какая-то отдельная нервная клетка связана с одной-единственной соседкой; в большинстве же случаев каждый нейрон соединен с десятками и сотнями тысяч других нейронов, результатом чего является очень сложная сеть, основанная на синаптических связях (рис. 6.7). Сигналы возбуждения или торможения, поступающие в нервную клетку от других нервных клеток, вынуждают ее определенным образом реагировать: импульс возникает в аксоне только в тот момент, когда электрическое возбуждение в теле клетки достигает некоторой критической величины, которая гарантирует надежную передачу сигнала; такой механизм препятствует возникновению нервного импульса в результате случайного изменения электрического потенциала клетки.

«Специализированные» нервные клетки органов чувств предназначены для преобразования воздействия различных внешних раздражителей (например, света, изменения температуры и т. д.) в электрический сигнал. Эти рецепторные клетки являются, таким образом, посредниками между внешними раздражителями и нервной системой; единственное их предназначе-

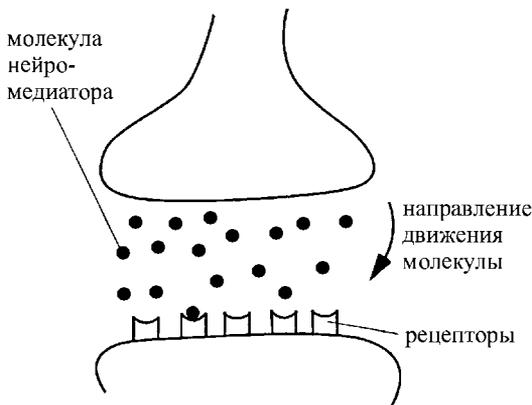


Рис. 6.6. Схематическое изображение процесса, происходящего в синапсах. Нервная клетка выбрасывает через синапс нейромедиатор. Преодолев синаптическую щель (она представлена здесь без соблюдения масштаба, в действительности ее ширина значительно меньше), медиатор достигает синапса соседней нервной клетки, где вступает в химическую реакцию, которая благодаря свойствам мембраны синапса преобразует этот химический стимул в электрический сигнал. (Более подробные объяснения имеются в тексте)

ние — обеспечение прохождения информации от внешнего мира к нервной системе. При этом каждая группа таких клеток реагирует только на совершенно определенные раздражители, т. е. имеет свою специфическую область применения: для клеток глаза это восприятие света, для клеток кожи (тактильных и терморецепторных) — изменения давления и температуры. Иногда, впрочем, возникают ситуации, приводящие к «смещению обязанностей»: если, например, ударить человека в глаз, он увидит «звезды» вследствие того, что нервные клетки глаза испытали сильное воздействие «не того» раздражителя. Тот факт, что нервные клетки реагируют только на определенные (или, скажем, адекватные) раздражители, представляется очень важным, так как нервные импульсы сами по себе могут передать только интенсивность раздражения, но не указать на его источник. Именно исходя из того, какая группа нервных клеток отреагировала на раздражение и по каким передающим каналам сигнал достиг мозга, можно судить о раздражителе: например, аксоны, связывающие мозг с сетчаткой глаза, передают информацию о световом раздражении — именно ими мы намерены заняться более подробно.

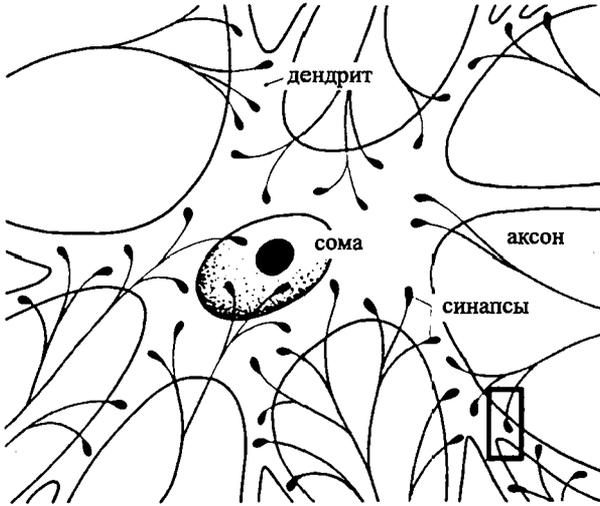


Рис. 6.7. Нервная клетка с несколькими синапсами

Рассмотрев вкратце нейроны, обратимся от частей к целому, т. е. попытаемся выяснить, что же представляет собой собственно мозг.

#### в) *Строение и функции мозга*

В предыдущем разделе мы ознакомились с микроскопической структурой мозга, образуемой нейронами. Теперь пришло время обратиться к некоторым фундаментальным проблемам, встающим перед исследователями мозга на макроскопическом уровне. Относительно просто изучить анатомию мозга, опираясь на наши познания о различных типах нервных клеток. Однако какую функцию выполняют эти клетки, располагаясь в определенных областях мозга? Каково назначение (и значение) отдельных областей? На этот счет к началу XIX века имелась одна занятная теория. Занимавшийся исследованием мозга врач Франц Йозеф Галль обнаружил, что различные участки коры головного мозга имеют различную толщину. Это, по его мнению, свидетельствовало о том, что и выпуклости на наружной поверхности черепа позволяют делать заключения о характере обладателя головы. Галль уверовал в свою теорию сам и привлек к ней внимание множества людей. Сегодня мы можем лишь посмеяться над этой теорией, но все же некое

зерно истины она в себе несла: различные участки коры действительно выполняют различные функции.

Как показано на рис. 6.8, мозг можно разделить на большие отделы в соответствии с обнаруженными исследователями анатомическими и функциональными особенностями. Различают продолговатый мозг, мозжечок, средний мозг, промежуточный мозг и, наконец, передний мозг, или собственно головной. При анатомическом сравнении человека с другими живыми существами было установлено, что мозг человека значительно больше по своим размерам; кроме того, большое количество извилин на поверхности мозга существенно увеличивает ее площадь, а значит, и число нервных клеток. Действительно, головной мозг играет совершенно особенную роль: здесь сосредоточены центры зрения, слуха, обоняния и т. д., т. е. все, что непосредственно участвует в процессе осознанного восприятия. С головным мозгом связан также процесс сознательного мышления. С чисто анатомической точки зрения головной мозг можно разделить на несколько долей: лобную, две височных, две теменных и затылочную (рис. 6.9). Помимо этого, выделяют еще и правое и левое полушария, которые связаны между собой так называемым мозолистым телом.

Как же распределены функции мозга между этими отделами? Мы знаем точно, что при кровоизлиянии (инсульте), поражающем различные участки головы, могут возникать различные повреждения. Так, например, одни пациенты вследствие инсульта теряют речевые навыки, другие перестают узнавать знакомое, казалось бы, окружение, третьи оказываются полностью или частично парализованы. Существуют разнообразные методы, позволяющие выяснить, какие именно функции закреплены за тем или иным отделом мозга. Старейший из этих методов как раз и сводится к тому, чтобы сопоставить наличествующие физические повреждения с последовавшими функциональными расстройствами. Так в 1861 году французский врач Поль Брока исследовал мозг трупов двух человек, при жизни страдавших нарушением речевой функции. Брока обнаружил, что в обоих случаях оказались сильно повреждены определенные участки в левом полушарии, из чего можно было заключить, что именно в этой области находится речевой центр. В те времена только после смерти пациента можно было анатомическим путем выяснить, какой именно участок мозга имеет повреждения. Теперь все иначе; к моменту начала операции по поводу, скажем, опухоли уже точно известно, какая именно область мозга поражена. Экспериментируя на животных, ученые порой целенаправленно разрушают какую-то определенную область мозга с тем, чтобы затем изучить результаты про-

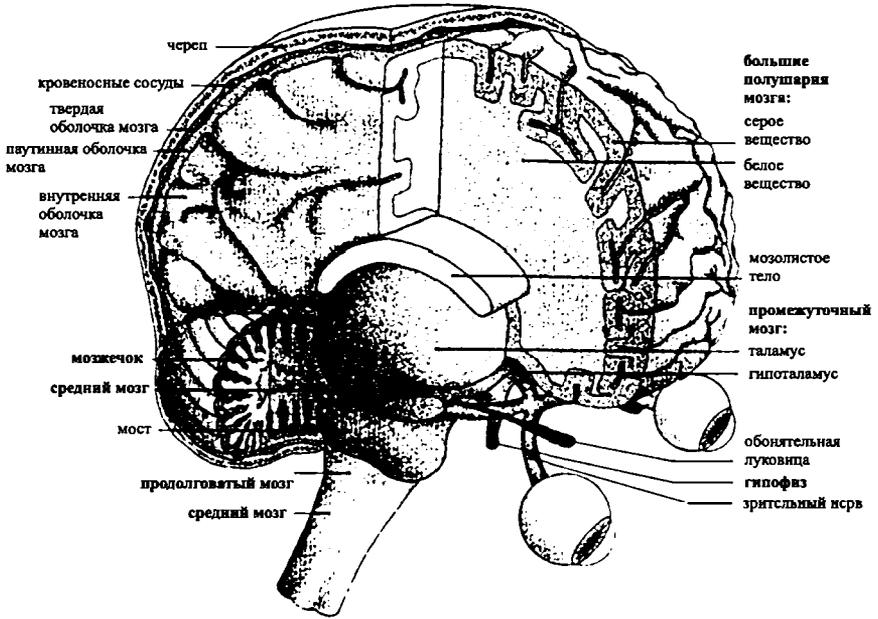


Рис. 6.8. Строение мозга

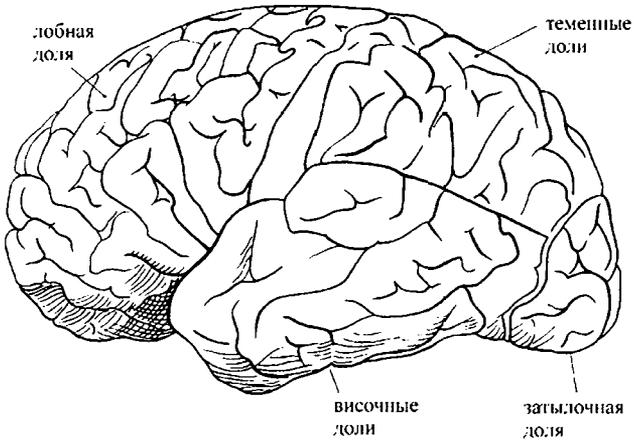


Рис. 6.9. Отделы коры головного мозга

изведенного вмешательства. Методы эти, впрочем, не отличаются особой точностью.

Обратимся к самым современным методам, куда более тонким и точным. Таков, к примеру, микроэлектродный метод: безболезненно введенные под черепную коробку электроды служат для измерения показателей электрического возбуждения, возникающего от того, что испытуемый в это время подвергается воздействию различных внешних раздражителей. Электрод вводится в определенную область мозга, и в зависимости от того, в ответ на какой именно раздражитель происходит повышение электрической активности мозга, делается вывод о том, какие функции выполняет данная область. Если ожидаемая реакция возникла в тот момент, когда испытуемый слушал музыку, то, следовательно, участок мозга, в который введен электрод, является слуховым центром. В опытах с животными был использован и обратный прием: с помощью электрода производилось электрическое раздражение определенных участков мозга. При этом отмечалось, что подопытные животные реагируют на такие раздражения свойственным им способом: курицы, например, начинали бегать или хлопать крыльями. В сороковые-пятидесятые годы нашего столетия подобные эксперименты проводились и с людьми. Во время операций на открытом мозге эти пациенты находились в полном сознании и были способны рассказать о своих ощущениях, возникающих при раздражении определенных участков мозга. Например, если при таком воздействии у пациента появлялся зуд в правой руке, то становилось ясно, что именно данный участок мозга ответственен за осязание правой рукой.

Совершенно иные принципы лежат в основе метода компьютерных исследований мозга, который позволяет наблюдать за изменениями кровоснабжения мозга при различных видах деятельности (рис. 6.10). Испытуемым вводится в кровь микродоза слаборадиоактивного вещества в безопасной для здоровья (по уверению изобретателя) концентрации. При разработке эксперимента исследователи исходили из того, что «задействованные» области мозга снабжаются кровью интенсивнее, чем те, что в данный момент пребывают в состоянии покоя. Одно из первых упоминаний об этой взаимосвязи относится еще к 1890 году, когда было установлено, что перед эпилептическим приступом мозг больного буквально переполняется кровью, а значит, имеет место несомненное усиление кровотока. Чем интенсивнее кровоснабжение определенной области мозга, тем больше радиоактивных частиц можно обнаружить в этой области. Внешние детекторы регистрируют повышение радиоактивности, и на основании этих данных компьютерная программа моделирует цветную схему, которая позволяет судить об

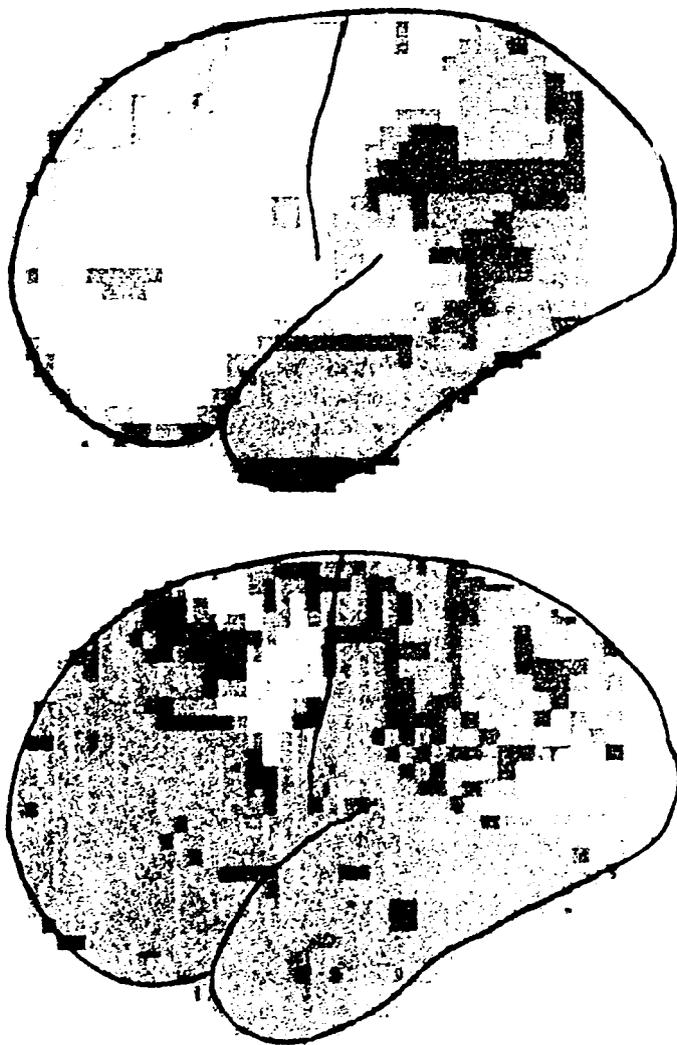


Рис. 6.10. Полученное с помощью компьютера изображение, свидетельствующее об изменении кровоснабжения отдельных участков мозга при смене деятельности. Вверху: состояние покоя; внизу: испытуемый следит глазами за движущимся объектом. Интенсивность серого цвета соответствует интенсивности кровотока

интенсивности кровотока. Наблюдения, проводимые описанным методом, дают исследователям возможность собрать гораздо более полные и точные данные о деятельности мозга в целом, нежели метод микроэлектродов, который сужает область наблюдения до небольшого участка мозга. Данный метод оказывается очень хорош для наблюдения переходных состояний мозга: например, при переходе испытуемого от состояния покоя к тому или иному виду деятельности или при смене типов раздражителей. Предположим, что испытуемый неподвижно лежит с закрытыми глазами и при полном отсутствии каких бы то ни было внешних раздражителей. Интересно отметить, что при этом снабжение кровью лобной доли приблизительно на 20–30% выше, чем среднее значение (по всему мозгу в целом). Результаты исследований, проводимых другими методами, говорят о том, что эта область не имеет никаких специфических функций, а несет на себе, по большей части, ответственность за личностные свойства человека. Установлено, что в результате кровоизлияния в эту область могут происходить изменения структуры личности. С этой областью мозга связывают способность человека к сознательному мышлению и перспективному планированию. Такие, не имеющие специальных функций, области называются ассоциативными полями.

Когда испытуемый открывает глаза, чтобы проследить за движущимся объектом, картина кровотока абсолютно меняется. Теперь особенно интенсивно снабжаются кровью — как, собственно, и ожидалось — зрительные центры, находящиеся в затылочной доле, а кроме того, фронтальное зрительное поле и моторное поле, ответственные за сознательное движение глаз. Еще более высокоорганизованной деятельностью (такой, как речь или чтение) заведует центр чтения, сенсорный центр речи и моторный центр речи.

Рассмотрим в качестве примера такой вид деятельности, как чтение вслух. Какие центры оказываются вовлечены в этот процесс? Сначала сигнал поступает в зрительный центр. Воспринимаемая просто как картинка буква анализируется центром чтения, а затем, уже распознанная, благодаря сенсорному и моторному центрам речи может быть произнесена. Этот пример недвусмысленно указывает на то, что для многих процессов необходимо подключение не одного, а нескольких центров мозга, взаимодействующих друг с другом. С помощью описанных методов исследования мозга ученые смогли составить своеобразную «географическую карту», на которой нанесены зоны, ответственные за определенные функции (рис. 6.11). Например, в области затылочной доли головного мозга находится зрительный центр (с которым мы ознакомимся подробнее в последующих главах) определена область, в которой расположен центр обоняния, сенсорное поле коры го-

ловного мозга, анализирующее ощущения, и моторное поле, управляющее мускулатурой.

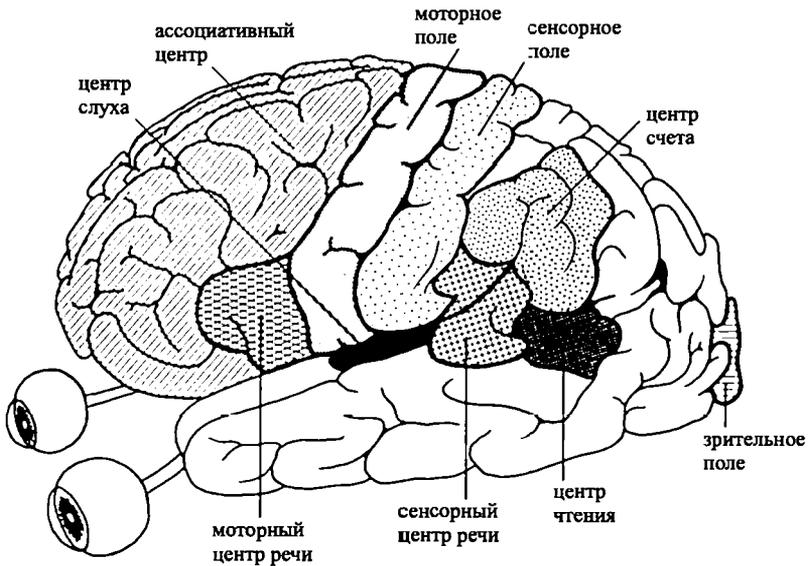


Рис. 6.11. Области коры головного мозга

Как уже упоминалось, головной мозг состоит из двух полушарий, соединенных мозолистым телом. Но являются ли полушария зеркальным отражением друг друга? Одинаковые ли функции они выполняют? Некоторые ответы были получены в ходе экспериментов, проводившихся с людьми, у которых оперативным путем было рассечено мозолистое тело, и тем самым нарушена связь между полушариями. Такие операции назначаются обычно больным эпилепсией с целью смягчения приступов. Во время эксперимента пациенту закрывали повязкой попеременно правый и левый глаз и с помощью проекционного аппарата предъявляли различные изображения. Когда открытым оставался правый глаз, испытуемый мог назвать показанные ему на картинках предметы и правой рукой выбрать такие предметы из числа предложенных (рис. 6.12). Если вместо предметов проецировались слова, то испытуемый мог прочесть их вслух и выбрать предмет, соответствующий показанному слову. Чтобы верно оценить результаты этого эксперимента, следует знать, что все, видимое правым глазом, анализируется левым полу-

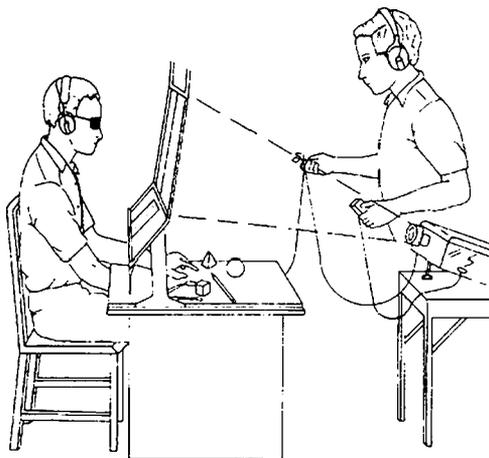


Рис. 6.12. Экспериментальное исследование деятельности полушарий головного мозга пациента, у которого оперативным путем было рассечено мозолистое тело



Рис. 6.13. Функции полушарий головного мозга

шарием; то же относится и к правой руке. Аналогично действует и правое полушарие, контролирующее и анализирующее сигналы, поступающие от левого глаза и левой руки. Как мы увидим далее, нервные тракты в мозге скрещиваются. Этот эксперимент показывает, что левое полушарие, даже будучи изолированным от правого, способно обеспечить человеку пусть не полную, но все же достаточную свободу действий.

Еще более интересные результаты получаются, когда открытым остается левый глаз. Испытуемый, правда, по-прежнему способен отыскать среди предложенных названный или показанный предмет, однако он оказывается не в состоянии, даже при успешном отыскании предмета, прочесть его название с экрана или назвать этот предмет вслух. Становится ясно, что правое полушарие не может в одиночку выполнить задачи, связанные с речевыми или письменными функциями. Таким образом, очевидно, что левое и правое полушария не идентичны, и функции их разделены (рис. 6.13).

Остановимся вкратце и на некоторых других отделах мозга. В ходе сравнения мозга различных животных было установлено, что те животные, которые обладают способностью к сложному поступательному движению (сюда относятся и птицы), имеют особенно развитый мозжечок. Именно эта часть мозга ответственна за координацию движений. Еще одна часть мозга, играющая важную роль в обработке сигналов, получаемых от органов чувств — промежуточный мозг, а в нем — область таламуса. Помимо всего прочего, у млекопитающих таламус служит коллектором нервных трактов, соединяющих органы чувств с корой головного мозга. Подробнее эту связь мы рассмотрим в последующих главах, посвященных зрительному тракту.

Итак, на сегодняшний день известно, что каждая зона мозга связана с исполнением определенных функций; однако у читателя не должно сложиться ложного представления о природе этой связи. Разделение функций между определенными отделами мозга в действительности подразумевает отнюдь не жесткое закрепление за каждой зоной, представляющей собой некую замкнутую целостность, каких-то определенных задач, но существование множественных связей, обеспечивающих прежде всего скоординированное взаимодействие отдельных частей, составляющих в совокупности мозг. Можно сравнить работу отделов мозга с работой консультантов в каком-нибудь большом учреждении: несмотря на то, что эти люди физически находятся в разных помещениях, они постоянно обмениваются информацией и выполняют каждый свою часть общей работы.

Для понимания природы психической деятельности важно знать, каким образом распределяются задачи между отдельными частями мозга. Однако одного этого знания еще не достаточно. Истинное понимание возможно

лишь в том случае, когда исследования психической деятельности ведутся представителями многих отраслей науки. Можно рассматривать деятельность мозга как макроскопическое явление и исследовать внешние результаты процессов, протекающих в системе (например, способность к звуко- и световосприятию или способность к обучению, оцениваемая при различных условиях). Богатый материал для таких исследований дает работа с пациентами, у которых определенные способности деформированы или вовсе отсутствуют, а также эксперименты с животными (например, с крысами, которых дрессируют таким образом, чтобы они обучались отыскивать еду в определенной формы лабиринтах), наблюдая за поведением которых ученые могут делать выводы о психической деятельности мозга.

При изучении мозга на микроскопическом уровне наука движется несколько иным путем. Исследуя все более мелкие элементы мозга, добываясь до отдельных нервных клеток и изучая связи между ними, биохимики установили, например, посредством каких именно химических веществ осуществляется связь между синапсами. Открытие это привело к созданию медикаментов, способных восполнить отсутствие или недостаток у больного человека медиаторов, с помощью которых происходит взаимодействие нейронов, и таким образом помочь людям, страдающим различными заболеваниями мозга. С другой стороны, можно исследовать воздействие на мозг различных медикаментозных препаратов, причем наиболее интересным представляется изучить реакции, вызываемые теми препаратами, которые аналогичны вырабатываемым самим организмом веществам.

Поскольку мозг, являясь исключительно сложным образованием, занят осуществлением огромного количества разнообразных функций (восприятие, запоминание и обучение, мышление и управление деятельностью различных органов), немисливо вместить в одну небольшую книгу подробное изложение всех аспектов психической деятельности. Поэтому мы и выбрали всего один пример — деятельность зрительной системы, о которой уже упоминалось как о наиболее подробно изученной. Рассказ о зрительной системе поможет нам ознакомиться с самыми современными методами исследования мозга и в то же время выйти за рамки этих методов, представив систему не только в виде самостоятельного целого, но и как часть зрительного аппарата, выходящего за пределы мозга, т. е. познакомить читателя с механизмами взаимодействия различных частей, осуществляющих в конечном счете целостный процесс восприятия. Ошибки на любом уровне системы восприятия могут приводить к очень значительным искажениям результата. Читателю, возможно, покажется несколько странным то, что главным действующим лицом главы 10 будет сетчатка, — ведь мы обещали

посвятить нашу книгу исключительно исследованию мозга. Однако в этом «отклонении от темы» нет ничего удивительного: в ходе исследований эмбрионального развития было установлено, что сетчатка в действительности является в некотором роде частью мозга, так как глазные яблоки развиваются из так называемых мозговых пузырьков.

С точки зрения исследователей, у сетчатки (в сравнении с собственно мозгом) есть одно преимущество: она относительно тонка и состоит всего из нескольких слоев клеток, которые «удобно» изучать. Действительно, анатомы досконально исследовали как строение сетчатки, так и принципы, на которых основана ее деятельность. Более того, в ходе изучения сетчатки были обнаружены некоторые феномены, уже известные ученым, занимавшимся зрительным центром головного мозга; здесь эти феномены поддаются научному объяснению гораздо проще, нежели в случае наблюдения их непосредственно в мозге. Таким образом, рассматривая сетчатку как мозг в миниатюре, мы можем добыть немало очень важных сведений для дальнейших научных изысканий. Однако прежде чем приступить к рассмотрению процессов, протекающих в зрительном центре мозга, необходимо вкратце описать тот путь, по которому сигнал от сетчатки поступает в мозг. Восприятием цвета мы займемся отдельно (в главе 13), так как оно, по всей вероятности, осуществляется независимо от восприятия формы и представляет собой особый вид деятельности зрительной системы. Наконец, следует выяснить, как происходит развитие зрительной системы. Эксперименты доказывают, что узнавание предметов, будь то скрипка или карандаш, возможно лишь при наличии факта знакомства с этими предметами в прошлом, т. е. чтобы «признать» в карандаше именно карандаш, необходимо хотя раз до этого увидеть карандаш и в общих чертах знать, какая, собственно, сущность стоит за обозначением «карандаш». Таким образом, процесс узнавания предполагает участие памяти и неких «обучающих» элементов. Именно об этих участниках процесса узнавания мы и расскажем вкратце, прежде чем вплотную займемся зрительной системой.

## **7. Обучение и память: что нам известно обо всем этом на самом деле?**

Когда мы встречаемся с кем-то из своих знакомых, наша зрительная система воспринимает лицо этого человека, и мы его узнаем. Мы легко отличаем это лицо от других — если, конечно, речь не идет об однояйцевых близнецах. Итак, восприятие связано, в общем случае, с узнаванием неких

предметов, людей, образов и т. д. Узнавание предполагает, что прежде состоялось некое обучение, т. е. произошло «знакомство» с данным предметом, явлением или человеком. Именно потому, что при узнавании в результате зрительного восприятия решающую роль играют обучение и память, мы сейчас и займемся рассмотрением связанных с ними психических процессов на примере животных и человека.

При исследованиях функций памяти и процессов обучения можно, как и прежде, условно выделить два уровня: макроскопический и микроскопический. На макроскопическом уровне психологи заняты изучением результатов человеческой деятельности, связанной с процессами обучения, и попытками выяснить, при каких условиях эти процессы протекают в оптимальном режиме. Когда и при каких обстоятельствах человек обучается быстрее всего? Чему именно он обучается особенно хорошо? Вот некоторые заключения, полученные в результате таких исследований. Успешность обучения зависит от степени нагрузки (слишком низкие — равно как и слишком высокие — нагрузки ограничивают способность человека научиться чему-либо, в то время как некий «средний» уровень нагрузок помогает овладеть предметом). Интерес, мотивация обучаемого также играют огромную роль; кроме того, велика роль внимания, которое обучаемый сосредоточит на предмете. Исследование всех этих моментов, связанных с процессами обучения, вплотную приближается к исследованию психических состояний мозга, наиболее благоприятных для обучения. Опытным педагогам и методистам известно, что частое повторение или обучение с помощью так называемых «ключевых слов» и ассоциативного ряда увеличивает вероятность успешного усвоения материала учащимися.

Специальные исследования были посвящены определению механизмов запоминания, участвующего в процессе обучения. Так, к примеру, группе испытуемых было предложено с определенной скоростью прочесть вслух сорок простых коротких слов. Сразу после прочтения испытуемые должны были записать запомнившиеся им слова. График на рис. 7.1 иллюстрирует полученные в ходе исследования результаты. Мы видим, что первые несколько слов (в среднем — три) запоминают практически все испытуемые. Последующие слова воспроизводятся реже, но — что интересно! — четвертый десяток предложенных слов вновь воспроизводится большинством участников эксперимента вполне успешно. Здесь же показан результат другого теста, отличающегося от первого тем, что прочитанные вслух сорок слов испытуемым предлагалось записать по памяти не сразу после прочтения, а лишь через некоторый промежуток времени (порядка 20 с); в течение этих нескольких секунд испытуемые были заняты несложными

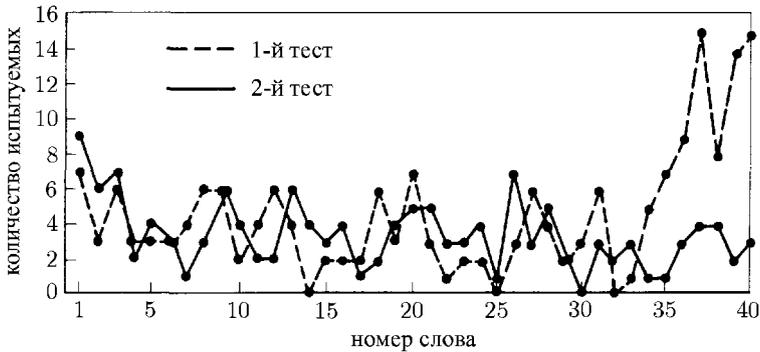


Рис. 7.1. Результаты эксперимента по исследованию кратковременной памяти. Пунктирная линия: испытуемые записывают слова сразу после прочтения; сплошная линия: испытуемые записывают слова с задержкой в 20 секунд

счетными заданиями, которые необходимо было решить «в уме». Последний десяток слов, как мы видим, воспроизведен на этот раз отнюдь не столь успешно, как в условиях первого эксперимента.

Сравнение двух кривых позволяет сделать вывод о том, что кратковременная память способна сохранять информацию примерно десяти последних секунд. Именно благодаря кратковременной памяти так высок процент запоминания последних десяти слов. Когда же испытуемым были предложены сразу после прочтения слов еще и задачи, требующие несложных устных вычислений, объем кратковременной памяти оказался занят именно результатами этих вычислений, а слова к этому времени были уже «стерты». В обоих случаях испытуемые довольно успешно могли вспомнить несколько первых из сорока прочитанных ими слов: это объясняется тем, что информация от временного промежутка, в течение которого были прочитаны эти начальные слова, была сохранена уже в так называемой среднесрочной памяти, обладающей меньшей емкостью, но большим «сроком хранения», нежели кратковременная память. Информация может сохраняться в среднесрочной памяти на протяжении нескольких часов или даже суток; некоторая часть такой информации переходит затем в так называемую долговременную память и может оставаться там очень продолжительное время, порой даже всю жизнь.

В долговременной памяти находится информация, полученная человеком либо посредством множественных повторений (так, например, мы пользуемся умением говорить на родном языке или писать), либо благодаря

единичному, но очень сильному впечатлению — таковыми часто оказываются впечатления детских лет. Эксперименты позволяют провести границу между долговременной и кратковременной памятью и продемонстрировать различия между этими двумя типами памяти. Известно, что вследствие применения электрошокотерапии или наркоза, после переохлаждения или вдыхания воздуха с избытком кислорода, а также при несчастных случаях, сопровождающихся сильным шоком, из памяти пациентов исчезает информация, хранившаяся в кратковременном объеме памяти; однако все, что содержалось в долговременной памяти, остается нетронутым, даже если с человеком произошло что-либо из вышеперечисленного.

На рис. 7.2 представлена модель процессов, посредством которых информация, воспринимаемая нами через органы чувств, достигает мозга. Следует понимать, что через органы чувств на мозг постоянно, ежесекундно обрушивается поистине гигантская лавина самой разнообразной информации. Глаза воспринимают сложнейшую постоянно изменяющуюся «картину окружающего мира», состоящую из многообразия цветов, форм и образов; уши улавливают всевозможные шумы, шорохи или музыку. Если мы при этом сидим на стуле, мозг получает сигнал от тактильных рецепторов. Возможно, в комнате еще и тикают часы, а за окном шумят автомобили — однако лишь очень ограниченная часть всего этого потока информации достигает сознания. Ведь если вы, например, поглощены каким-то интересным разговором, вы уже не слышите ни уличного шума, ни тиканья часов, вас больше не занимает жесткость стула, вам важно лишь выражение лица вашего собеседника. Прежде чем достичь сознания, поступающая информация попадает сначала в кратковременную память, которая обладает, образно говоря, очень малой емкостью. Большая часть информации здесь теряется; то, что осталось, проходит дальше, в среднесрочную память, где и может сохраняться несколько часов или даже суток. На этом этапе вновь происходит потеря некоторого количества информации; затем совсем уже небольшая часть (от первоначального объема) достигает поистине колоссальных хранилищ долговременной памяти, где человек в течение всей своей жизни собирает огромную коллекцию лиц, предметов, явлений, событий и т. п. — т. е., несмотря даже на многочисленные «потери», невообразимо огромное количество информации.

Однако зададим себе вопрос: каким же образом осуществляется обучение? Как протекают процессы обучения на микроскопическом уровне? Если вспомнить об огромном числе нервных клеток, содержащемся в человеческом мозге, станет ясно, что исследования такого рода представляют собой чрезвычайно сложное (и даже в каком-то смысле рискованное) предприятие.

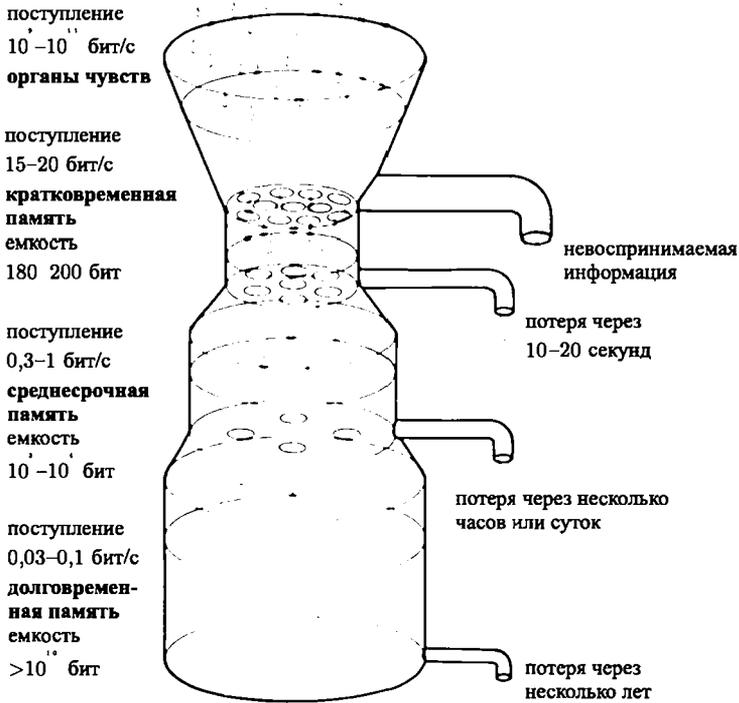


Рис. 7.2. Модель фильтрации памяти (схематично). 1 бит соответствует количеству информации, получаемой при приеме сообщения об осуществлении одного из двух равновероятных событий

Именно поэтому первыми были изучены очень простые организмы — такие, как *Aplysia* (аплизии, или морские зайцы) и *Hermisenda*. Эти морские моллюски, естественно, способны научиться лишь очень и очень простым вещам. Надо заметить, кстати, что под «научением» биологи понимают изменение поведения под воздействием нового опыта, приобретенного испытуемым. Отсюда следует, что в случае, когда испытуемым оказывается какое-нибудь животное, об успешности обучения можно говорить только если в ходе эксперимента наблюдаются какие-то конкретные изменения в поведении этого животного. В ответ на раздражение дыхательной трубки аплизия втягивает жабры; при постоянном повторении этого раздражения наблюдается ослабление реакции. Если же механическое раздражение со-

проводилось болевым воздействием, то при многократном раздражении упомянутая реакция, напротив, усиливалась. Моллюск *Hermisenda* во время эксперимента «обучался» установлению взаимосвязи между вспышкой света и возникновением водоворота в окружающем его (моллюска) объеме воды; результатом этого «обучения» стало уменьшение скорости движения моллюска.

Эти представители животного мира замечательно подходят для роли «испытуемых», поскольку, обладая очень простой нервной системой, структура которой описывается несложной схемой, они все же способны демонстрировать недвусмысленные изменения в своем поведении, что позволяет исследователям точно установить в ходе экспериментов произошедшие в результате «обучения» перемены. Специфические изменения были обнаружены у подопытных моллюсков и на микроскопическом уровне; например, у аплизий происходили изменения в передаче возбуждения через синапсы. На первом этапе эксперимента, пока аплизия «привыкала» к постоянному раздражению, передача возбуждения замедлялась; затем, при введении болевого раздражителя, чувствительность аплизий повышалась, и передача возбуждения ускорялась. Биохимические механизмы наблюдаемых изменений вполне объяснимы, однако в силу того, что объяснения эти все же довольно сложны, мы не будем здесь на них останавливаться. Заметим лишь, что важную роль во всех этих процессах играют кальций, определенные химические вещества и ферменты. В случае же с моллюском *Hermisenda* наблюдалась повысившаяся после «обучения» чувствительность отдельных нервных клеток.

Мозг млекопитающего и человека настолько сложен, что создание простой и точной модели для описания деятельности нервной системы представляется невозможным. Следовательно, для обнаружения принципиальных механизмов обучения и прочих связанных с памятью процессов следует избрать иной путь. На основании результатов изучения воздействия на человека уже упоминавшихся наркоза и электрошока можно предположить, что для каждого типа памяти существуют различные биохимические механизмы: для краткосрочной — один, для долгосрочной — другой. Существует гипотеза, согласно которой кратковременное сохранение информации обеспечивается циркуляцией нервного импульса в замкнутых цепях нейронов (рис. 7.3). При охлаждении или воздействии электрошока такие замкнутые цепи могут быть разрушены, что вызывает нарушение кратковременной памяти. Существование замкнутых нейронных цепей уже довольно давно получило подтверждение на анатомическом уровне: электрофизиологические исследования и клинические эксперименты, про-

веденные в 60-е годы XX века, свидетельствуют, что подобный механизм позволяет сохранять сигнал в течение весьма продолжительного времени. Но более сложные процессы — такие, например, как восприятие человеком лиц — наверняка не могут быть обусловлены простой циркуляцией сигнала по замкнутой цепи из нейронов, для этого требуется куда более сложная пространственно-временная модель нейронной активности. Эта гипотетическая пространственно-временная модель должна включать в себя одновременную активизацию большого числа нервных клеток, передающих поток импульсов другим группам нервных клеток в результате возникновения между ними временной связи. Картина пространственно-временного распределения нейронов иначе называется динамической энграммой, или «памятным следом». Можно представить себе нервные клетки в виде крошечных электрических лампочек, которые определенным образом размещены в пространстве и вспыхивают и гаснут в определенном ритме, так что получаемый в результате световой узор дает совершенно определенную пространственно-временную картину (энграмму).

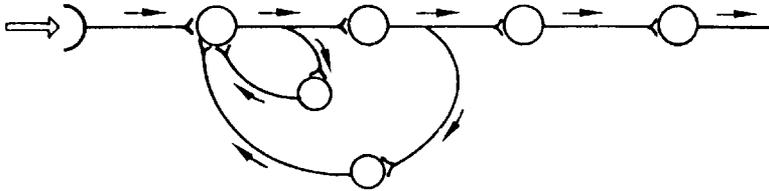


Рис. 7.3. Циркуляция нервных импульсов по замкнутым цепям нейронов

Каким же образом фиксируется содержание довольно-таки быстро исчезающего памятного следа? Эксперименты с отдельными нервными клетками показывают, что различные типы синапсов головного мозга начинают производить с этой целью большие количества химических веществ, служащих медиаторами. Это означает, что если некий синапс принимает нервные импульсы очень часто, то с течением времени сила воздействия этих импульсов на синапс увеличивается; выделение медиатора синапсами также увеличивается, и соседней клетке передается соответственно усиленный импульс. Кроме того, был обнаружен и еще один феномен: клетка становится чувствительнее даже при неизменном количестве выделяемого в синапсе медиатора. И все же оба описанных феномена имеют определенные временные рамки. Импульс и впрямь может сохраняться довольно долго, даже

до 10 часов, что, впрочем, никак не объясняет природы долгосрочной памяти; упомянутый эффект можно было бы считать неким переходным этапом между краткосрочной и долгосрочной памятью.

Эксперименты дают четкое представление о той роли, которую играют в механизме долгосрочной памяти биохимические процессы. В качестве примера можно привести сравнительные данные по такому химическому соединению, как рибонуклеиновая кислота (РНК). Для эксперимента были взяты две группы крыс: одна группа была «обучена» находить в лабиринте пищу, вторая же использовалась в качестве контрольной. Результат сравнения содержания в клетках мозга этих крыс рибонуклеиновой кислоты таков: у крыс первой группы ее оказалось на 60–100% больше. РНК является важным элементом процесса белкового синтеза — она «содержит» в себе информацию, в соответствии с которой выстраивается молекула белка. Интересные результаты дают опыты с впрыскиванием крысам веществ, тормозящих процесс синтеза белка. Сначала крысы, которым была сделана инъекция, выучиваются проходить лабиринт так же хорошо, как и крысы из контрольной группы. Однако сохранить приобретенные во время обучения навыки подопытные крысы не могли — по прошествии примерно трех часов они начисто забывали путь через лабиринт и уже не могли отыскать в нем пищу. Если же инъекция производилась спустя два часа после завершения обучения, все крысы отлично сохраняли приобретенные навыки прохождения лабиринта и ничем не отличались от крыс из контрольной группы. Этот эксперимент показывает, какое значительное влияние оказывают биохимические процессы (в частности, синтез белка) на сохранение информации в долгосрочной памяти.

После того как этот факт был окончательно установлен, появилась теория, в соответствии с которой содержание памяти должно фактически определяться химическим составом молекул медиатора, подобно тому, как химическим путем передается по наследству информация, необходимая для синтеза белка. Один ученый даже утверждал, что ему удалось выделить такое химическое соединение, которое обуславливает у животных страх перед темнотой. Это соединение он получил в результате эксперимента, в ходе которого у животных развивался страх перед темнотой, и назвал «скотофобин» (скотофобия — боязнь темноты). Охватившая общество эйфория позволила поверить в возможность получения соединений, которые определяли бы содержание памяти. Перед взорами людей предстало чудесное видение: в будущем детям больше не придется ходить в школу, достаточно будет лишь принять нужные таблетки! Однако в конечном счете эта теория

обнаружила свою несостоятельность. Эксперименты оказались невоспроизводимыми, т. е. другим исследователям не удалось подтвердить существование особых соединений, определяющих содержание памяти. Очевидно, связь белкового синтеза с процессом запоминания объясняется как-то иначе. Сегодня предполагается, что если синапсы подвергаются частому возбуждению, то изменения в них происходят на микроструктурном уровне, и синапсы оказываются способны увеличивать проводимость. При ограниченном же использовании синаптические связи разрушаются, а синапсы вырождаются. Итак, предполагается, что активизация процессов белкового синтеза необходима для повышения эффективности уже существующих и образования новых синапсов, а кроме того, возможно, и для увеличения количества производимых синапсами медиаторов.

В последнее время было выяснено, что на синапсах, которые часто используются, молекулы группируются в упорядоченные волоконистые структуры; группы таких молекул называются ганглиозидными (рис. 7.4). Чем чаще на синапс передается возбуждение, тем большее количество волокон объединяется вместе; вероятно, они облегчают прохождение медиатора и повышают проводимость нужных синапсов, улучшая связь между ними и образуя нечто вроде хорошо сплетенной нервной сети, удерживающей в себе памятный след.

Возможно, содержание памяти и впрямь можно закодировать с помощью определенных специфических межнейронных связей. И все же сомнительно, что каждому сохраненному в памяти сигналу соответствует некая определенная схема связей. Как мы уже упоминали в предыдущей главе, объекты окружающего мира чрезвычайно разнообразны: деревья, например, могут быть очень различными по высоте, форме и т. д., однако они легко распознаются нами именно как деревья. Остается по-прежнему неясно, каким же образом происходит отбор существенных особенностей из воспринятого целостного образа? Или: как работает подобный сортирующий механизм у животных? С точки зрения синергетики, действие этих механизмов основано на принципе самоорганизации. Как только объект воспринят, в мозге создается некий образ, подобный воспринятому объекту, так что в данном случае имеет место не простое сопоставление воспринятой реальной действительности с сохраненными в памяти шаблонами, а именно самоорганизация.

Принцип изменения проводимости синапсов пригодился и создателям компьютерной техники, о чем мы расскажем подробнее в третьей части нашей книги. Сейчас же обратимся к уже неоднократно привлекавшимся

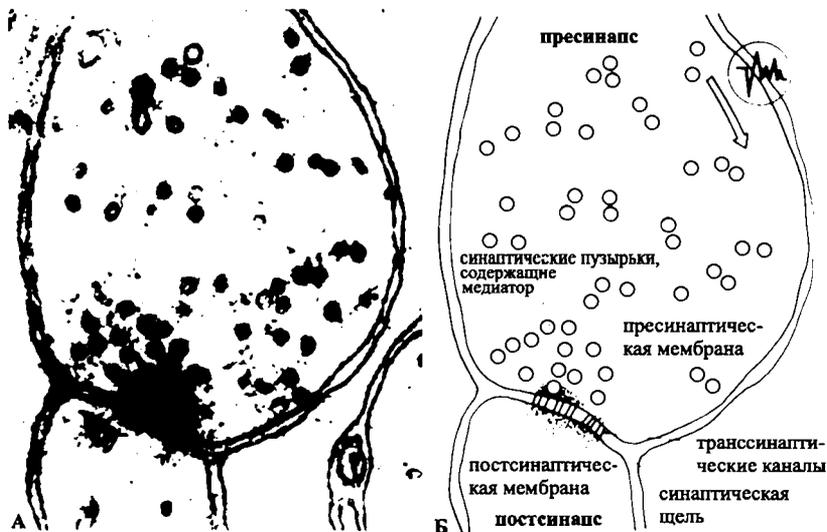


Рис. 7.4. Транссинаптические каналы. А: фотография, полученная с помощью электронного микроскопа; Б: схематическое изображение

нами в качестве примеров зрительным процессам, описание которых является главной задачей этой книги. Начнем с устройства человеческого глаза.

## 8. Глаз и фотоаппарат

Глаза — это входные врата для всей зрительной информации, которую может получить об окружающем нас мире наша нервная система. Поэтому именно с глаз мы и начнем. Следует, впрочем, оговориться: эта книга ни в коей мере не является учебником анатомии, и мы намерены ограничиться описанием лишь самого необходимого минимума фактов, касающихся устройства глаза.

Зрительное восприятие возможно лишь тогда, когда в глаза попадает свет — при этом совершенно не важно, исходит он от Солнца или от электрической лампы. Свет может достичь глаза непосредственно от источника (вдоль прямой линии), как случается, если мы, например, посмотрим прямо на Солнце. Однако гораздо чаще глаз направлен на объекты, которые сами по себе не являются источниками света. Видим же мы их благодаря тому,

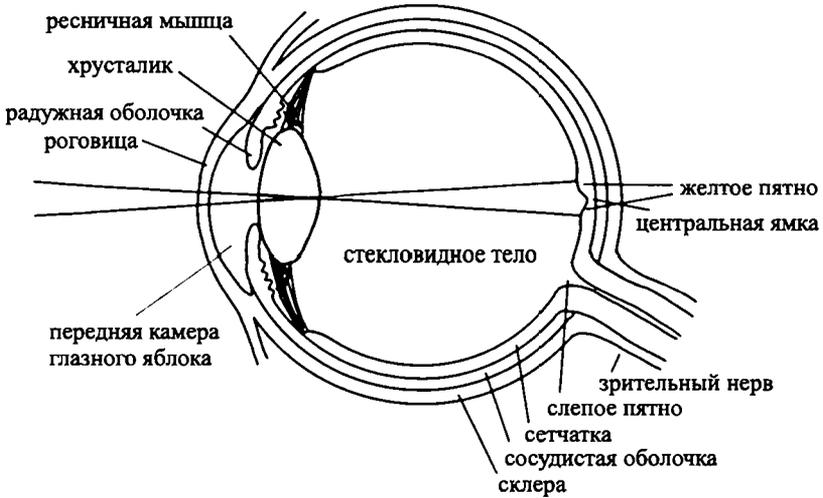


Рис. 8.1. Схема строения глаза

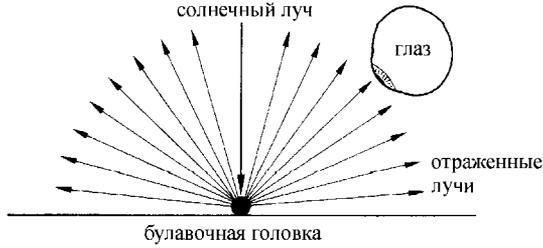
что поверхность этих объектов отражает излучаемый неким источником свет, и некоторая часть отраженного таким образом света попадает в глаз (рис. 8.2). Что же при этом происходит со светом? Обратимся к анатомическому строению глаза. На рис. 8.1 схематически представлен продольный разрез человеческого глаза; ниже мы рассмотрим каждую из составляющих его частей.

Очень удобным представляется сравнение глаза с фотоаппаратом. И тот, и другой выполняют одинаковую функцию, которая заключается в отображении на некую двумерную поверхность уменьшенной картины окружающего нас трехмерного мира. Фотоаппарат проецирует эту картину на пленку, глаз — на сетчатку. Впрочем, различие все же есть: фото-

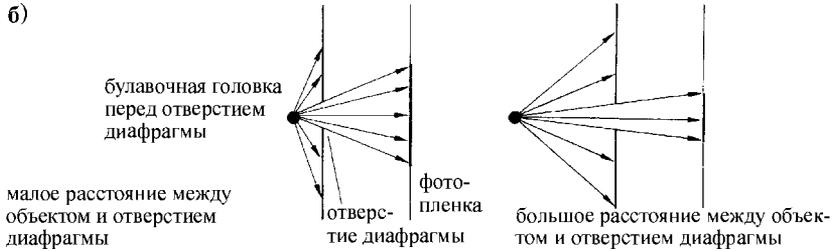
Рис. 8.2. Распространение световых лучей.

- Солнечный свет отражается во все стороны.
- Лучи, проходящие сквозь отверстие диафрагмы: чем ближе к отверстию диафрагмы находится объект, тем сильнее рассеиваются световые лучи.
- Настройка резкости за счет изменения расстояния между объективом и пленкой или между хрусталиком и сетчаткой.
- Настройка резкости за счет изменения оптической силы объектива.

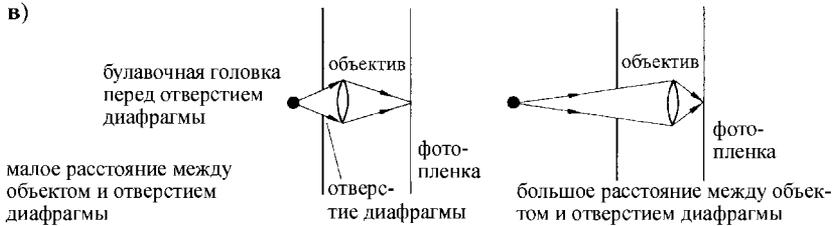
а)



б)

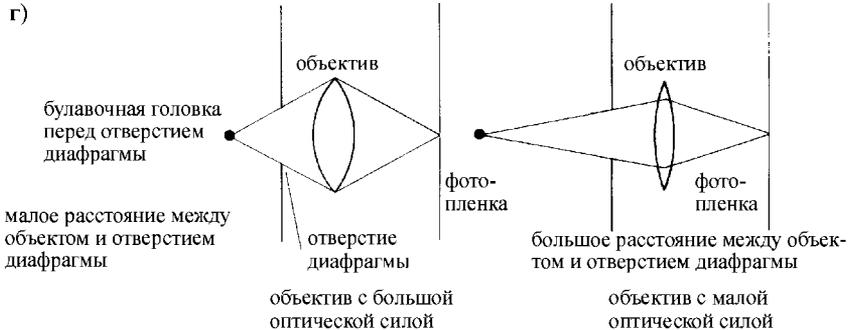


в)



оптическая сила объектива в обоих случаях одинакова

г)



пленку можно считать плоской, а сетчатка представляет собой внутреннюю поверхность пустотелого шара. Шарообразная форма глаза позволяет ему вращаться (в известных пределах) внутри глазной впадины.

Еще одна общая черта: в обоих случаях луч света попадает внутрь сквозь некое малое отверстие. У фотоаппарата это отверстие диафрагмы, у глаза — зрачок. Фотолюбители знают, что чем меньше в момент съемки отверстие диафрагмы, тем четче получается фотография; с другой стороны, это отверстие должно все же быть достаточно большим, иначе изображение окажется слишком темным. Размер отверстия определяется либо самим фотографом — с учетом освещения, чувствительности фотопленки и выбранной выдержки, либо автоматически (как во многих современных фотоаппаратах). Человеческий глаз также располагает подобной автоматикой, и в этом каждый из нас может легко убедиться, посмотрев в зеркало: если в глаза попадает отраженный луч света, зрачки моментально сужаются, ограничивая количество света, достигающего сетчатки, если же уменьшить уровень освещенности, зрачки снова расширятся — таким образом нервная система человека регулирует количество падающего на сетчатку глаза света. Регулировка размера зрачка осуществляется с помощью мелких мышц, сжимающих или расширяющих радужную оболочку. Сама радужная оболочка может быть окрашена в различные цвета, и именно цвет радужки мы имеем в виду, когда говорим о цвете глаз того или иного человека.

В то время как светочувствительность фотопленки постоянна, чувствительность глаза может изменяться. При очень ярком свете не только сужается зрачок, но и снижается чувствительность сетчатки; и наоборот, при плохом освещении чувствительность сетчатки повышается, а зрачок расширяется. Все это хорошо известно нам из повседневного опыта. Когда вы возвращаетесь домой с лыжной прогулки (иначе говоря, от белого снега и яркого солнца), ваша комната кажется вам поначалу какой-то сумеречной, однако проходит несколько минут, глаза «привыкают» к меньшей освещенности, и комната предстает перед вами в своем «обычном свете». Процесс «привыкания», или адаптации, длится дольше, чем изменение величины зрачка. Устройство глаза не предусматривает возможности установки выдержки, как при фотографировании, и свет попадает в глаз до тех пор, пока человек его не закроет. Естественно, для возникновения зрительного ощущения необходимо некоторое время, но оно невелико; кроме того, и исчезает зрительное ощущение не сразу после того, как прекратилось раздражение. Это свойство человеческого глаза используется в кино: короткие паузы между кадрами не воспринимаются глазом, и перед нами возникает иллюзия непрерывного движения.

«Кадры», возникающие на сетчатке, изменяются непрерывно. Даже когда человек смотрит на неподвижный объект (например, на картину), глаза скачкообразно движутся от одной точки объекта к другой, так что образ на сетчатке находится в почти непрерывном движении. Далее мы увидим, что такое движение играет существенную роль в процессе обработки информации, воспринимаемой органами чувств. Как нам известно из зоологии, некоторые животные замечают свою добычу только если она движется. Так, например, лягушка видит добычу только в темных движущихся объектах определенной величины, а на лежащую у нее буквально «под носом» мертвую муху не обращает никакого внимания.

Вернемся теперь к свету, проходящему сквозь зрачок внутрь глаза, и к тому, что с этим светом происходит. В каждом фотоаппарате есть линзы. Нечто подобное имеется и в глазу, только здесь линза называется хрусталиком. Какую же функцию выполняет эта глазная линза? Вспомним о том, что упавший на какую-либо поверхность свет отражается от всех ее точек (даже если эта поверхность размером с булавочную головку) и рассеивается во всех направлениях. В глаз попадает как раз такой, рассеянный (или диффузный), свет. На сетчатке же упомянутая булавочная головка должна отображаться не иначе, чем в виде маленькой точки. Для этого рассеянные лучи света необходимо снова собрать в тонкий пучок — чем, собственно, и занимается хрусталик. Он работает так же, как самое обыкновенное увеличительное стекло, которое собирает солнечные лучи в одну точку, причем в этой точке становится так горячо, что вспыхивает бумага. Для образования пучка лучей, впрочем, одной лишь линзы недостаточно. На помощь приходят и роговица, и внутриглазная жидкость, заполняющая глазную камеру, и стекловидное тело (рис. 8.1). Так, точка за точкой, на сетчатке отображается окружающий нас мир. При этом изображение оказывается уменьшенным, зеркально отображенным и перевернутым «с ног на голову». Тем не менее, нам обычно удается верно ориентироваться среди окружающих объектов и правильно воспринимать явления и события. Все это становится возможным благодаря тому, что принятое изображение подвергается последующей обработке в мозге.

Для того чтобы получить четкую фотографию, необходимо предварительно определить расстояние от объектива фотоаппарата до объекта съемки. Телерешные фотоаппараты научились делать это автоматически. Причина возникновения такой необходимости объясняется на рис. 8.2 (б). Мы видим, что лучи, отраженные близко расположенными объектами, рассеиваются гораздо сильнее тех, что отражены объектами более отдаленными. Однако и в том, и в другом случае лучи следует собрать в пучки с таким

расчетом, чтобы на фотопленке или на сетчатке они сошлись в точку. В фотографии для достижения этого результата изменяют расстояние от линзы до пленки: чем ближе находится объект съемки, тем дальше должна оказаться от линзы пленка (рис. 8.2 (в)). Такой механизм встречается и в животном мире — например, у рыб хрусталик с помощью особых мышц может перемещаться, приближаясь к сетчатке или удаляясь от нее. У человека эта настройка происходит иначе. Оптическая сила линзы-хрусталика изменяется посредством изменения формы самой линзы. Чем более выпукла линза, тем сильнее она преломляет свет. Чем ближе находится рассматриваемый предмет, тем больше должна быть оптическая сила хрусталика, и, соответственно, более выпуклым должен стать сам хрусталик. Процесс изменения формы хрусталика называется аккомодацией (рис. 8.2 (г)). Изменение степени выпуклости хрусталика осуществляется с помощью произвольно сокращающейся мышцы; это означает, что нам не приходится прикладывать никаких сознательных усилий для того, чтобы изменить «настройку» наших глаз — обо всем этом совершенно самостоятельно заботится наша нервная система. Со временем эластичность хрусталика уменьшается, и человек с возрастом начинает хуже видеть близкие предметы — в конечном счете это приводит к старческой дальнозоркости. И дальнозоркость, и близорукость встречаются, конечно же, и у молодых людей, но это, как правило, объясняется ненормальной формой глазного яблока. При близорукости продольная ось глазного яблока слишком длинна, и удаленные предметы оказываются «не в фокусе», который должен располагаться на сетчатке (в данном случае фокус смещен в стекловидное тело); при дальнозоркости также происходит смещение главного фокуса, но в противоположном направлении, так как продольная ось глазного яблока слишком коротка.

Итак, с точки зрения оптики, глаз вполне можно сравнить с фотоаппаратом. Оба состоят из похожих «деталей», позволяющих получить четкую и контрастную картину трехмерного мира на двумерной поверхности — правда уменьшенную, зеркальную и перевернутую. Для фотоаппарата работа на этом и заканчивается; остальное — дело фотолаборатории. А вот с глазами все обстоит иначе: получение изображения является лишь первым шагом в таинственном процессе восприятия. Чтобы понять природу этого процесса, нам придется пробраться через настоящие нейронные джунгли ... но это чуть позже. Сейчас же коротко коснемся еще одного вопроса, имеющего отношение к зрительному восприятию.

## 9. Зрительное восприятие пространства

Почему правая фигура на рис. 9.1 кажется нам значительно больше, нежели левые — ведь если измерить их высоту, то обнаружится, что они абсолютно одинаковы? Ответ, если вдуматься, совершенно очевиден: из-за линий, обозначающих перспективу, нам кажется, что правая фигура находится гораздо «дальше». Имей этот человек тот же рост, что и «ближний» к нам персонаж, его удаленная фигура казалась бы гораздо меньше, что и отразилось бы на рисунке. Этот оптический обман очень ярко демонстрирует, насколько неосознаваемо при восприятии пространства и оценке расстояния до предметов и их величины мы используем перспективу — ведь именно известная нам величина объекта (человека, автомобиля на дороге, пасущейся на лугу коровы) позволяет нам оценить расстояние до него. Кроме того, важно распределение света и тени на поверхности объекта. Герман фон Гельмгольц однажды заметил: «В нашем распоряжении находятся, по сути дела, те же самые вспомогательные средства, какими пользуется художник для придания изображенным на его полотнах предметам иллюзии объемности и различной удаленности».

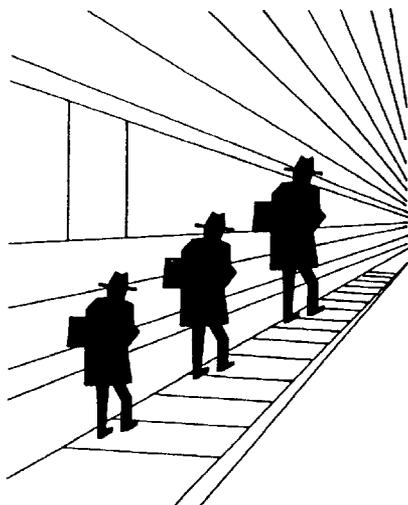


Рис. 9.1. Оптическая иллюзия, создаваемая линиями перспективы

Для приблизительной оценки расстояния упомянутые средства (т. е. оценка по известной величине или распределению света и тени) вполне хороши, однако с их помощью нельзя определить расстояние точно — примером может послужить такая достаточно тонкая процедура, как продевание нити в игольное ушко. В этом нет ничего сложного, если вы пользуетесь обоими глазами, однако стоит лишь закрыть один глаз, и попасть ниткой в крошечное отверстие становится почти невозможно. Наблюдения показывают, что предмет, рассматриваемый только одним глазом, теряет объемность. Для получения объемной картины окружающего мира необходима совместная работа *двух* глаз; особенно ярко это проявляется при просмотре так называемых стереофильмов. Такие фильмы, как известно, смотрят сквозь специальные очки, благодаря которым плоская картина чудесным образом преобразуется, приобретая весьма выразительную трехмерность. Можно создать, например, иллюзию парящего посреди комнаты камня — иными словами, реальные оптические условия воспроизводятся в стереофильмах силой искусства. В действительности же в наших глазах возникают две разные, но легко совместимые друг с другом картинки; при этом относительная разница между ними становится тем меньше, чем дальше от нас находится объект наблюдения, и наоборот — чем ближе рассматриваемый предмет, тем большей становится разница между его изображениями, возникающими на сетчатках глаз. Убедиться в этом читатель легко может сам. Вытяните перед собой руку и зафиксируйте положение большого пальца относительно какого-либо ориентира на заднем плане; теперь посмотрите на палец одним — скажем, правым, — глазом, второй же на это время прикройте. Если вы затем откроете его, а правый закроете, палец переместится относительно отметки на заднем плане, причем это кажущееся перемещение будет тем больше, чем меньше было расстояние от пальца до глаз. При показе стереофильма нам демонстрируется два слегка смещенных относительно друг друга изображения, каждое из которых предназначается только для одного глаза (для выполнения этого требования и необходимы особые очки).

Проходя по зрительным трактам, сигналы, полученные каждым из глаз, соответствующим образом обрабатываются и преобразуются в зрительной области коры головного мозга в единое зрительное ощущение, обладающее пространственной глубиной. Подробнее об этом мы поговорим в главе, посвященной зрительному тракту и зрительной области коры головного мозга.

## 10. Сетчатка: мозг в миниатюре

### а) *Похожа ли сетчатка на фотопленку?*

Вернемся ненадолго к нашему маленькому экскурсу в область искусства фотографии и сравним процессы, происходящие на фотопленке, с подобными им на сетчатке. Сначала выясним, что же происходит с пленкой в момент экспозиции и при последующем проявлении. Световое излучение несет в себе немалое количество энергии и способно изменять материальные объекты: цветные вещи, оставленные на долгое время на солнечном свету, выцветают (т.е. теряют свой цвет), а белая бумага желтеет. Поверхность фотопленки покрыта слоем светочувствительного вещества, которое при попадании на него света темнеет. На данном этапе изменение цвета пленки почти незаметно невооруженным глазом. При проявке пленки контраст в достаточной степени увеличивается, и становится возможным разглядеть изображение (негатив) во всех подробностях. Полученное изображение следует теперь закрепить с помощью специальных химических веществ, удаляющих с пленки оставшееся незачерненным исходное покрытие. Затем с негатива печатают обычные позитивные фотографии. Итак, главным процессом при фотографировании является химическая реакция, происходящая в светочувствительном слое на поверхности пленки, и функция фотоаппарата состоит в обеспечении только этого процесса. Проявление, закрепление и печать фотографий фотограф производит уже без применения фотоаппарата (исключение представляют, пожалуй, лишь фотоаппараты «полароид»). Таким образом, непосредственно на пленке имеют место лишь физические и химические процессы.

Читателю может показаться, что процессы, происходящие в сетчатке глаза, даже в грубом приближении совсем не так просты. В конце концов, речь ведь идет о биологической структуре. Биологические процессы, конечно же, тоже следуют всем химическим и физическим законам, однако биологические системы вдобавок еще и чрезвычайно сложны. Действительно, сложность строения сетчатки до сих пор поражает исследователей и служит источником неожиданных открытий. Сетчатка является частью нервной системы, и при ближайшем рассмотрении, как мы уже знаем, оказывается даже частью мозга. Этим, собственно, и объясняется столь сложное ее строение. Состоящая — подобно любому другому органу — из отдельных клеток, сетчатка, тем не менее, отличается сложной структурой связей между этими клетками. Некоторые клетки сетчатки содержат особые светочувствительные соединения, изменяющиеся под воздействием световых лучей. Среди

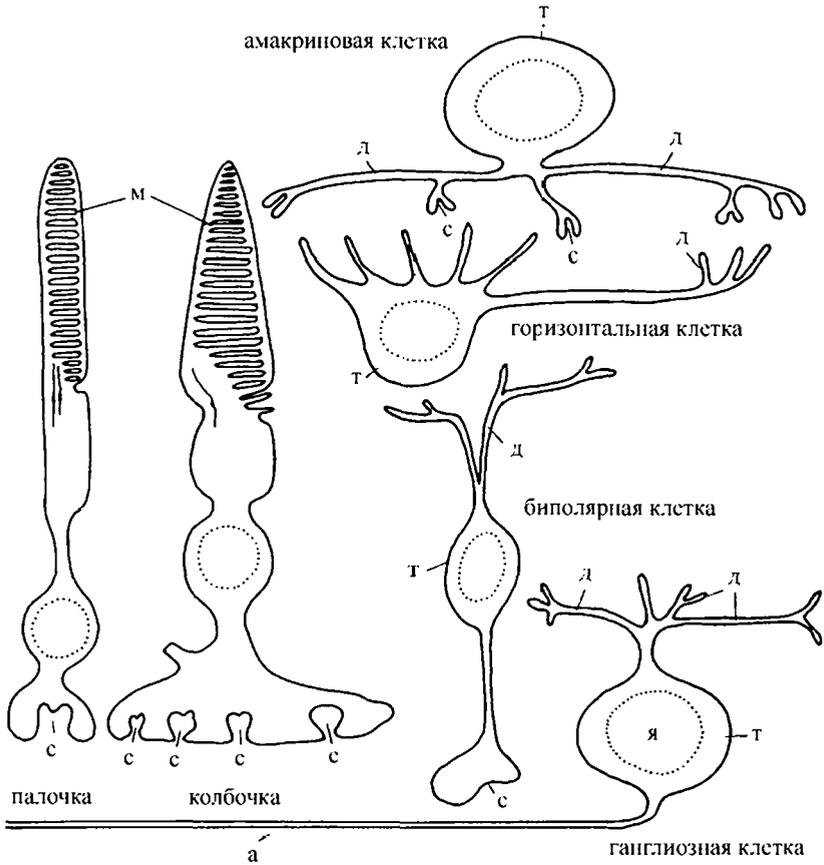
них — родопсин, или зрительный пурпур, для выработки которого организму необходим витамин А. Известно, что при нехватке этого витамина наступает так называемая куриная слепота (гемералопия). Итак, мы видим, что основной процесс — химическая реакция в светочувствительном веществе — имеет место и на фотопленке, и в сетчатке. Однако глубже эта аналогия уже не простирается.

Сетчатка как бы «переводит» получаемые ею сигналы от внешнего раздражителя (источника света) на язык, понятный нервной системе. Переведенная, или кодированная таким образом информация передается дальше в головной мозг. Однако, как мы вскоре увидим, еще в сетчатке внешние сигналы проходят весьма существенную обработку.

*б) Зрительные клетки — клетки, воспринимающие свет*

Исследуя сетчатку с помощью микроскопа, ученые обнаружили, что она состоит из нескольких слоев клеток. Рассмотрим сначала фоторецепторные клетки, т. е. клетки, непосредственно реагирующие на свет.

В результате микроскопических исследований было установлено, что человеческий глаз содержит фоторецепторные клетки двух различных типов. В соответствии с формой их называют палочками и колбочками (рис. 10.1). Диаметр и тех, и других составляет всего несколько микрометров ( $1 \text{ мкм} = 1/1000$  миллиметра), а длина — около 50 мкм. Эти клетки обладают сходным строением: в центре находится тело клетки, от которого отходит короткий отросток (аксон), образующий терминали в синаптической области и обеспечивающий связь с другими клетками (на рисунке показан снизу от тела). Длинный отросток с другой стороны тела клетки, так называемый наружный сегмент, у палочек длиннее и тоньше, чем у колбочек, а у колбочек он короче и снабжен выпуклым утолщением. В мембранах наружного сегмента содержится светочувствительное вещество. В палочках это уже знакомый нам красный зрительный пигмент — зрительный пурпур, или родопсин. Для чего же нужно разделение зрительных клеток на два различных типа? Как известно, в темноте все кошки серы. Происходит это потому, что палочки способны воспринимать слабый свет, но не способны обеспечить цветовое разделение сигнала, давая в результате лишь черно-белую картинку, т. е. информацию об освещенности и форме предметов. За цветовое зрение отвечают колбочки, которые менее светочувствительны, чем палочки. Свет в сумерках слишком слаб, так что колбочки оказываются не в состоянии отреагировать на него, поэтому цветовое восприятие отсутствует. Возвращаясь к сравнению с фотоаппаратом, можно



- |   |             |   |                 |
|---|-------------|---|-----------------|
| а | аксон       | м | мембранный диск |
| д | дендрит     | с | область синапса |
| я | ядро клетки | т | тело клетки     |

Рис. 10.1. Схематическое изображение клеток сетчатки

сказать, что сетчатка одновременно снабжена и черно-белой пленкой (палочки), и цветной (колбочки), причем светочувствительность черно-белой значительно выше.

Количество палочек и колбочек в глазах позвоночных невообразимо велико. Например, человеческая сетчатка содержит около 10 миллионов

колбочек и 100 миллионов палочек. Больше всего их в области так называемого желтого пятна — области наилучшего видения глаза (см. рис. 8.1). Плотность размещения зрительных клеток здесь достигает 160 000 на мм<sup>2</sup>. Интересно сравнить эти цифры с соответствующими характеристиками глаз животных. У таких, например, существ, как пещерные саламандры, которым их сумрачное окружение поставяет относительно немного зрительных ощущений, достаточно совсем незначительного количества зрительных клеток, что-то около 2500 на мм<sup>2</sup>. Хищные птицы (например, канюки), которым приходится отыскивать свои маленькие жертвы, находясь при этом на большой высоте, нуждаются, естественно, в более остром зрении; на квадратном миллиметре их сетчатки расположено около миллиона зрительных клеток! Возможности человека располагаются где-то посередине между этими крайностями. В голову приходит такая техническая аналогия. Разрешение видеокамеры определяется количеством точек, составляющих изображение и называемых пикселями. Хорошая камера дает разрешение порядка 470 000 пикселей. Нетрудно убедиться, что разрешающая способность глаза существенно выше.

Палочки и колбочки размещены в сетчатке не равномерно. В области желтого пятна (рис. 8.1) имеются только колбочки, причем они уже и длиннее, чем в остальной части сетчатки. Вне желтого пятна расположены и палочки, и более крупные колбочки, причем на периферии сетчатки — только палочки. Четкость изображения и разрешение на сетчатке зависят — подобно аналогичным характеристикам фотопленки — от того, насколько велика плотность палочек и колбочек, обеспечивающих протекание фотохимической реакции. Скажем, для того, чтобы особенно тщательно осмотреть какой-либо предмет, необходимо зафиксировать взгляд так, чтобы изображение этого предмета возникло в области желтого пятна. Впрочем, это происходит совершенно произвольно, «автоматически», при разглядывании каких бы то ни было объектов. Если же человеку захочется увидеть слабоосвещенный предмет или, например, маленькую звездочку в ночном небе, и он начинает в эту звездочку вглядываться, она, кажется, вовсе исчезает; происходит это как раз потому, что ее изображение формируется в области желтого пятна, состоящего из маловосприимчивых к свету колбочек. Свет, однако, настолько слаб, что колбочки «не отвечают» на раздражение. Но стоит лишь отвести глаза в сторону от звезды, она тут же вспыхнет снова, потому что теперь ее изображение возникло в зоне, содержащей высокочувствительные палочки.

Своеобразный феномен этот имеет объяснение. Рис. 10.2 дает наглядное представление об одном любопытном эксперименте. Мы с вами также

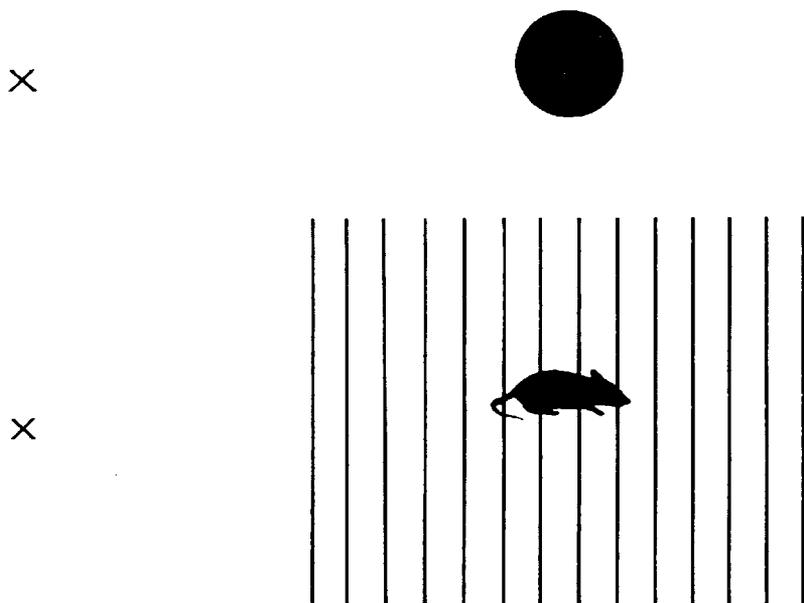


Рис. 10.2. опыты со слепым пятном.

(а) Закройте левый глаз, а правый зафиксируйте на верхнем крестике; книгу при этом держите на расстоянии примерно 25 см от глаз. Изменяя это расстояние, попытайтесь найти такое положение, при котором черный круг справа исчезнет — это означает, что его отображение на сетчатке оказывается в области слепого пятна.

(б) Прodelайте такую же процедуру с нижней картинкой. Настанет момент, когда мышь исчезнет из клетки, причем разрывов в вертикальных линиях мы не увидим (объяснение в тексте)

можем провести такой опыт с помощью рисунка 10.2 (а). Почему исчезает черный круг? Очевидно, его изображение попадает на такой участок сетчатки, который не может отреагировать на раздражение. Действительно, место выхода из сетчатки зрительного нерва лишено как палочек, так и колбочек. Эта область не воспринимает никаких зрительных ощущений, за что и называется слепым пятном (рис. 8.1). Возможно, существование в человеческом глазу слепого пятна удивит читателя: ведь разглядывая мир вокруг себя, никто и никогда не сталкивался ни с какими пятнами. Опыт, показанный на рис. 10.2 (б), объясняет отсутствие таких пятен. Мозг, если можно так выразиться, «дорисовывает» для нас недостающие детали в пол-

ном соответствии с окружающей обстановкой так, что мы в повседневной жизни не замечаем никаких свидетельств существования слепых пятен.

Функция зрительных клеток заключается не только в том, чтобы принять поступающие извне световые сигналы, но еще и в том, чтобы обработать их, «переведя» на язык, понятный нервной системе. Как же осуществляется такой перевод? Ниже мы рассмотрим процесс преобразования сигнала только внутри палочек; в колбочках происходит аналогичный процесс.

Первый этап преобразования, как мы уже знаем, схож с процессом, происходящим в фотопленке. Светочувствительным веществом сетчатки является содержащийся в мембранах наружных сегментов красный зрительный пигмент. Зрительный пурпур — это высокомолекулярное соединение, молекула которого состоит из органического радикала (ретинаяля, или альдегида витамина А) и белка опсина (рис. 10.3 (а)). Под воздействием света происходит отщепление ретинаяля от опсина (рис. 10.3 (б), (в)). Расщепление родопсина запускает целую цепь реакций, которые мы здесь рассматривать не будем, скажем лишь, что результатом этих реакций является изменение проводимости мембраны палочек для определенным образом заряженных частиц, вследствие чего изменяется и электрические потенциалы в палочках; все эти изменения можно измерить с помощью электродов. В темноте, когда палочки находятся в состоянии покоя, между наружной и внутренней стороной каждой палочки существует разность потенциалов, причем внутренняя сторона заряжена по отношению к внешней отрицательно. Напряжение это чрезвычайно мало и составляет всего лишь 30–40 милливольт ( $1 \text{ мВ} = 1/1000 \text{ В}$ ). Когда на палочку попадает свет, электрод фиксирует изменение напряжения — оно *увеличивается*. Исследователей это наблюдение повергло в изумление: клетки других органов чувств в подобных обстоятельствах (в ответ на раздражение) устойчиво реагируют *уменьшением* разности потенциалов. Очевидно, здесь мы имеем дело с какими-то особенностями фоторецепторных клеток, которые отличают их от клеток других органов чувств. Чем сильнее попадающий на зрительные клетки свет, тем большую разность потенциалов фиксируют приборы, причем эта разность потенциалов сохраняется все то время, пока продолжается раздражение. Таким образом, сила попадающего в глаза света преобразуется непосредственно в электрическое возбуждение.

Преобразование это требует, естественно, энергии. Энергия поступает не от световых лучей, она накапливается внутри клеток и имеет химическое происхождение. В клетке имеется нечто вроде собственного запаса топлива, которое и дает необходимую для преобразования сигналов энергию.

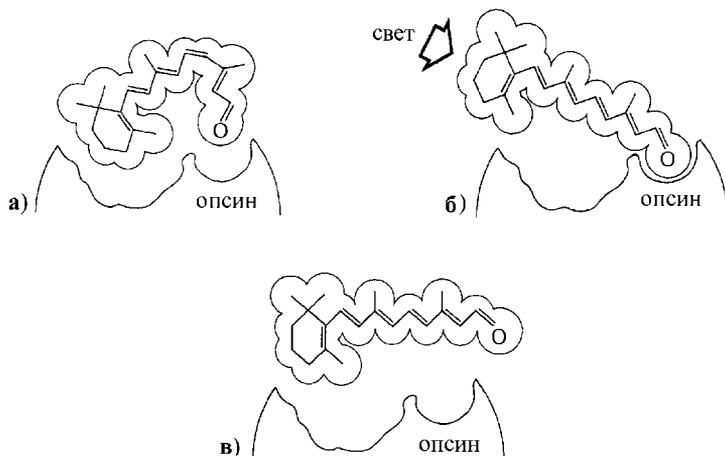


Рис. 10.3. Расщепление молекулы зрительного пурпура (родопсина) под воздействием света (опсин — белковая составляющая зрительного пурпура)

Свет нужен лишь для запуска реакций; с подобной ситуацией мы сталкиваемся, когда включаем электрическую лампу: энергия, потребляемая при освещении, не содержится в выключателе и не производится им, однако для «запуска» освещения выключатель необходим.

Нервные импульсы возникают не в самих фоторецепторных клетках. Как мы вскоре увидим, эта задача возложена на другие клетки сетчатки. Энергия же потребляется на регенерацию расщепившегося пигмента с тем, чтобы вновь пустить его в дело. При продолжительном воздействии света наступает состояние, при котором оба процесса (расщепление и регенерация) уравниваются друг друга.

Наши глаза очень хорошо адаптируются к меняющемуся уровню освещенности. Происходит это, как нам известно, не мгновенно, но все же достаточно быстро: попадая, например, из светлого помещения в темное, мы тратим некоторое непродолжительное время на то, чтобы глаза привыкли к темноте. При переходе же от темноты к яркому свету временное ослепление проходит гораздо быстрее. Полное приспособление глаз к темноте происходит приблизительно за 30 мин, тогда как к яркому свету мы адаптируемся за время от нескольких секунд до минуты, т. е. способность глаза настраиваться на уровень освещенности очень и очень высока. За упомянутые краткие промежутки времени светочувствительность челове-

ческого глаза может изменяться в миллионы раз. Какую роль в этом играет зрачок, мы уже знаем, однако одним зрачком дело явно не обходится — зрачок изменяет свой размер мгновенно, дальнейшая же адаптация (особенно к темноте) длится по сравнению с этим довольно долго. Очевидно, здесь мы сталкиваемся с какими-то иными процессами, протекающими в самих зрительных клетках.

Действительно, чувствительность зрительных клеток ничтожна при ярком освещении и увеличивается в темноте. Предполагается, что в основе изменений чувствительности лежат два механизма. Под действием одного из них чувствительность клеток увеличивается за счет того, что расщепляется большее количество пигмента — это называется фотохимической адаптацией. Независимо от этого при длительном раздражении клеток светом происходит уменьшение их чувствительности — это называется невральной адаптацией. Действие последнего механизма можно наблюдать и в клетках других органов чувств, когда при продолжительном раздражении реакция клеток на данный раздражитель ослабевает — происходит нечто вроде привыкания. Так через некоторое время мы перестаем ощущать повышенную температуру тела или неудобства, причиняемые одеждой или обувью. Вместе с привыканием чувствительных клеток к раздражению в мозге идут иные процессы, напрямую связанные с вниманием. Пока внимание человека поглощено какой-либо деятельностью, он может не осознавать наличия внешнего раздражителя, однако если внимание каким-то образом переключается на этот раздражитель, происходит его восприятие и осознание.

Таким образом, мы убедились, что зрительные клетки играют важнейшую роль при восприятии зрительной информации, являясь посредниками между сигналами, поступающими извне в виде светового раздражения, и возникающим в нервной системе возбуждением. С их участием отображаемая на сетчатке картина мира разбивается на отдельные точки — иными словами, общий сигнал разделяется на крошечные порции, процесс обработки которых мы с вами намерены проследить шаг за шагом. Следующий же шаг заключается в том, что, рассмотрев некоторые особенности строения сетчатки, было бы полезно попытаться представить себе сетчатку в целом.

#### *в) Архитектура сетчатки*

На рис. 10.4 показано, как выглядит сетчатка под микроскопом. На первый взгляд, здесь трудно хоть что-нибудь разобрать, можно лишь заметить, что сетчатка состоит из различных слоев, и, возможно, предположить,

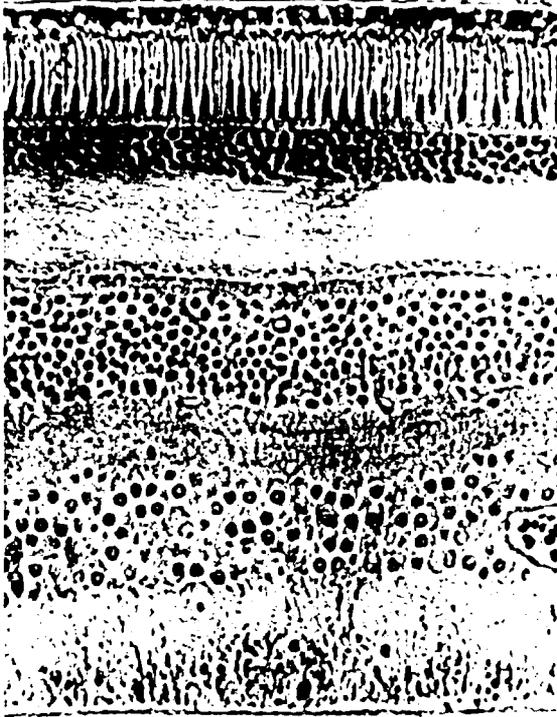


Рис. 10.4. Фотография, полученная с помощью микроскопа. Поперечный срез сетчатки. Вверху — слой палочек и колбочек, внизу — ганглиозные клетки

что малые круглые образования на фотографии являются телами клеток сетчатки. Благодаря микроскопическим исследованиям огромного множества таких срезов ученым, однако, удалось выяснить очень многое. Еще в 1892 году знаменитый испанский нейроанатом Сантьяго Рамон-и-Кахаль обратил внимание на то, что клетки сетчатки образуют очень красивый рисунок. На рис. 10.5 схематически отражено современное представление о структуре сетчатки. Не следует забывать, что при всей сложности структуры сетчатки, ее толщина равна всего лишь  $1/10$  мм, т. е. клетки сетчатки чудовищно малы! Разрешающая способность глаз была бы существенно ниже, обладай эти клетки большим размером. Перед нами чудо миниатюризации, не уступающее в этом отношении самому мозгу.

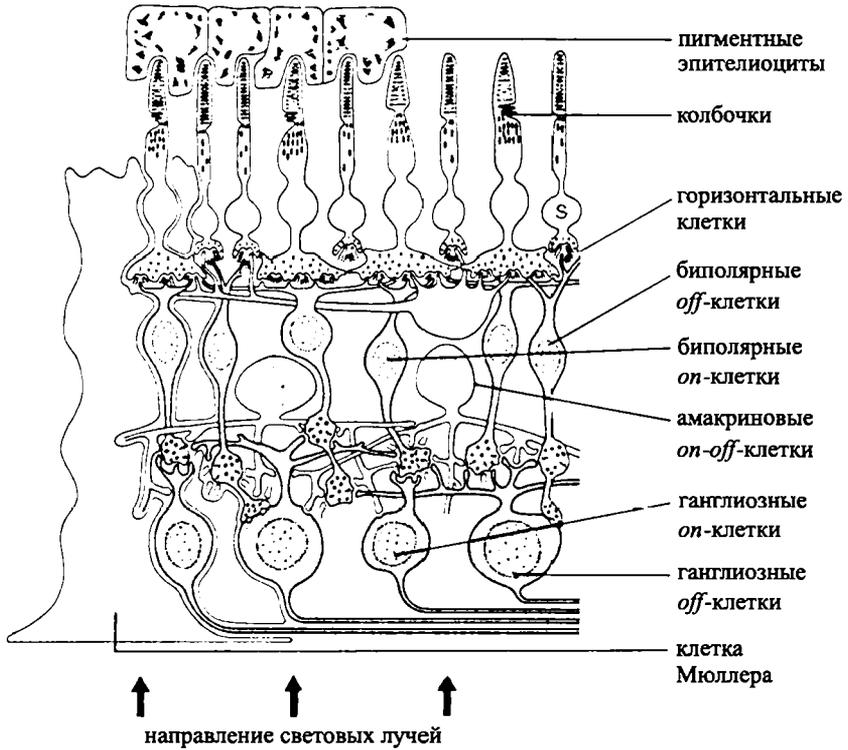


Рис. 10.5. Схема строения сетчатки

Рассмотрим строение сетчатки, пользуясь рис. 10.5. Сетчатка состоит из пяти различных типов клеток, которые, в свою очередь, можно разделить на несколько подтипов. Упомянутые пять типов клеток располагаются в трех слоях. Наружный слой составляют фоторецепторные клетки (на рисунке показаны вверх), средний слой — биполярные, горизонтальные и амакриновые клетки, и, наконец, внутренний слой — ганглиозные клетки. Все названные типы клеток являются либо фоторецепторными, либо нервными клетками; все они непосредственно заняты в процессе передачи и обработки информации. Кроме того, имеются, скажем так, клетки-помощники: пигментные клетки, прилегающие к фоторецепторным клеткам, и опорные клетки, расположенные между нервными клетками (клетки Мюллера).

Каким же образом осуществляется связь между различными нервными клетками в «продольном» направлении? Эта связь обеспечивается синапсами биполярных клеток. Биполярными они называются из-за своего почти симметричного строения. Биполярные клетки синапсами соединяются с ганглиозными клетками, отличающимися относительно крупными размерами. Таким образом, биполярные клетки являются связными между зрительными клетками и ганглиозными. Сложность этой структуры увеличивается еще и за счет существования «поперечных» связей, которые обеспечиваются горизонтальными и амакриновыми клетками. Нервные волокна, тянущиеся от ганглиозных клеток, образуют в совокупности зрительный нерв, через который и передаются в мозг изображения с сетчатки. На рис. 10.1 показаны все перечисленные типы клеток сетчатки. Нетрудно заметить, что все они довольно значительно отличаются от «базовой модели» нервной клетки (см. рис. 6.2) и имеют прямо-таки экзотический вид. Это связано с особыми функциями, возложенными природой на клетки сетчатки. Биполярные клетки располагают одним-единственным дендритом — правда, расщепляющимся — и с его помощью поддерживают связь с окружающими клетками. Особенно же примечателен внешний вид горизонтальных клеток. Их строение совершенно не напоминает обычную для нервных клеток структуру, причем функцию нервных волокон (аксонов) в них выполняют дендриты. Сходным образом обстоит дело и с амакриновыми клетками. Ганглиозные же клетки, напротив, во всем соответствуют упомянутой «базовой модели» и даже располагают особо длинными нервными волокнами, посредством которых и осуществляется сообщение с мозгом.

При более внимательном рассмотрении рис. 10.5 обнаруживается удивительный факт: тянущиеся от сетчатки и образующие зрительный нерв аксоны располагаются у поверхности сетчатки. Еще удивительнее то, что сами фоторецепторные клетки составляют глубинный слой сетчатки. Таким образом, свет — прежде чем попасть на зрительные клетки — вынужден проходить сквозь другие клетки и нервные волокна, которые, как выясняется, настолько тонки и прозрачны, что не создают свету сколько-нибудь заметных помех. И только в области желтого пятна — области наилучшего видения глаза — клетки и нервные волокна, составляющие верхние слои, как бы «раступаются», и свет попадает непосредственно на зрительные клетки.

Объяснить именно такое расположение клеток сетчатки можно, предположив, помимо всего прочего, что фоторецепторные клетки должны размещаться в непосредственной близости от пигментных клеток. Пигментный слой состоит из окрашенных в темный цвет клеток, поглощающих рассеян-

ный свет, который зрительными клетками не воспринимается. Этим достигается следующий эффект: рассеянный свет больше не отражается повсюду и не мешает «работать» зрительным клеткам. Можно предположить также, что пигментный слой выполняет еще одну вспомогательную функцию. Пигментные клетки, очевидно, заняты и в производстве зрительного пурпура. А чтобы участвовать в этом процессе, им необходимо находиться как раз на фоторецепторном слое.

Надеюсь, наш краткий обзор помог читателю получить некоторое представление о том, что представляет собой сетчатка. Сейчас мы находимся в положении дилетанта, который решил «разобраться с радиоприемником»: шурупы вывернуты, корпус вскрыт, все детали и соединения теперь видны — но как же он все-таки работает? У мастеров по ремонту электрической техники есть приборы, называемые тестерами; с помощью этих устройств можно установить, по каким именно проводам идет ток, а если аппарат испорчен, можно обнаружить и место неисправности. Подобный прибор пригодился бы нам и для исследования сетчатки, и, как нам уже известно, в этом нет ничего невозможного: электрические процессы, протекающие в нервной системе, вполне поддаются обнаружению и могут быть измерены с помощью электродов. В следующем разделе мы подробнее рассмотрим результаты таких исследований.

### *г) Обработка сигналов в сетчатке*

Информация о том, как выглядит окружающий нас мир, поступает к нам через орган зрения — глаза. При этом каждая палочка и каждая колбочка принимают лишь крошечную порцию этой информации — данные об одной-единственной точке. Свет, попадающий на зрительные клетки, имеет определенную интенсивность и характеризуется определенной длиной волны, хотя в общем случае, речь все же идет о наложении волн разных длин. Таким образом, вся поступающая в глаза информация оказывается разбита на мельчайшие сигналы, т. е. общая картина как бы дробится на крошечные осколки, которые в дальнейшем снова соединяются воедино и образуют целостное зрительное ощущение. Для этого сигнал, полученный каждой клеткой, должен быть передан «по этапу» и обработан. Процесс этот можно сравнить с работой компьютера: с целью получения некоего конечного результата в него вводится огромное количество разрозненных данных, которые обрабатываются им в соответствии с определенной программой. Как мы вскоре увидим, такой процесс в системе, обеспечивающей человека зрением, чрезвычайно сложен и еще не до конца понят.

Начнем с того, что выясним, каким же образом обрабатывается в сетчатке поступающее от зрительных клеток возбуждение, и какую роль играют в этом процессе различные типы клеток. С этой целью следует провести электрофизиологические исследования данных клеток, подобно тому, как были исследованы фоторецепторные клетки, т. е. выяснить, как изменяется напряжение на них при раздражении сетчатки светом. Эксперименты с ганглиозными клетками представляются более простыми (по сравнению с другими клетками), так как ганглиозные клетки, во-первых, располагаются в поверхностном слое сетчатки, а во-вторых, имеют довольно большие размеры. Однако, несмотря на эти преимущества, первые предпринятые нейрофизиологами попытки проведения подобных измерений закончились полным провалом. В ходе эксперимента воздействию очень яркой вспышки света подвергался глаз кошки, и хотя подобная вспышка является весьма существенным раздражителем, ганглиозные клетки не проявили сколько-нибудь заметной реакции. Это было в высшей степени странно, так как кошка самым выразительным образом демонстрировала, что вспышку она увидела.

Первым исследователем, добившимся успеха, стал Стивен Куффлер, чьи опыты с кошками относятся к 1953 году. Следует, между прочим, заметить, что выбор подопытного животного оказался очень удачным — сетчатка многих других животных (среди которых и столь любимый экспериментаторами кролик) устроена несколько сложнее, что привносит в эксперимент дополнительные трудности.

Рис. 10.6 иллюстрирует эксперимент Куффлера. На стол помещается наркотизированная кошка, чей взгляд направлен на экран, на который проецируется вспышка света. Отражаясь от экрана, свет попадает в глаз подопытного животного, на строго определенный участок сетчатки. Впоследствии метод был усовершенствован: экран и проектор заменили электронно-лучевой трубкой, управляемой с помощью компьютера. Отличие эксперимента Куффлера от предшествующих ему опытов заключалось в том, что в качестве раздражителя ученый использовал световой сигнал в виде очень *маленькой* и четко очерченной точки, а не освещал весь глаз целиком. Крошечная вспышка раздражала лишь очень небольшой участок сетчатки. Electrodes внутри глаза были введены через белковую оболочку. Первоначально Куффлер с их помощью исследовал произвольно выбранную ганглиозную клетку. Поскольку ганглиозные клетки, в отличие от фоторецепторных, генерируют нервный импульс, измерительная аппаратура сразу реагировала на нахождение электродом нужной клетки. Вообще говоря, ганглиозные клетки генерируют нервные им-

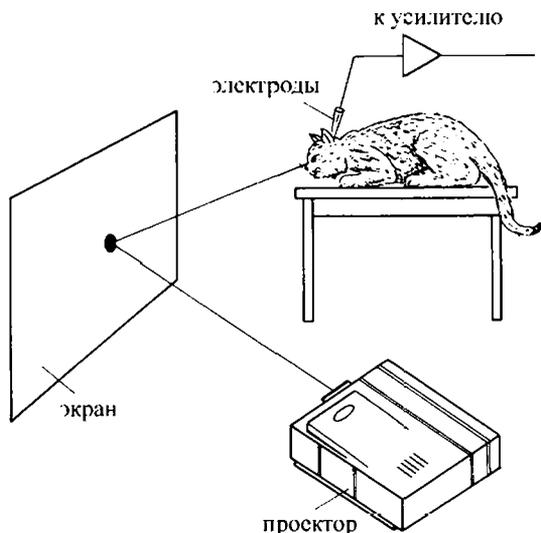


Рис. 10.6. Опыт Стивена Куффлера по исследованию рецептивных полей

пульсы даже находясь в состоянии покоя, т. е. в полной темноте, в отсутствие какого бы то ни было раздражения. Иными словами, эти клетки спонтанно активны, и было бы неверно полагать, что нервные импульсы в клетках сетчатки возникают только при попадании в глаз света. Поэтому, введя электрод в ганглиозную клетку и перемещая световую точку, Куффлер наблюдал за сетчаткой до тех пор, пока электрическая активность ганглиозной клетки не изменялась. Это означало, что свет достиг фоторецепторных клеток, связанных с наблюдаемой ганглиозной клеткой. Как и следовало ожидать, эти фоторецепторные клетки находились в непосредственной близости к исследуемой клетке. Таким образом, фоторецепторные клетки оказываются очень тесно связаны пространственно с соответствующими клетками ганглиозного слоя. Более того, к каждой ганглиозной клетке «подсоединено» множество фоторецепторных клеток. Совокупность фоторецепторных клеток, раздражение которых влияет на активность какой-либо ганглиозной клетки, называется *рецептивным*, или *воспринимающим, полем* этой ганглиозной клетки. Понятие рецептивного поля представляется нам одним из важнейших понятий, и мы еще не раз встретимся с ним при дальнейшем рассмотрении зрительной системы.

Куффлер применял в качестве раздражителя и световые вспышки бóльшего размера. При этом обнаружилось несколько интересных фактов. Например, было установлено, что в определенном положении увеличение диаметра светового пятна сначала вызывает усиление активности ганглиозной клетки, чего, собственно, и следовало ожидать. При этом частота генерируемого клеткой нервного импульса также возрастает. Однако при дальнейшем увеличении диаметра пятна активность клетки ослабевает, а частота нервного импульса падает. Такое развитие событий Куффлер считал донельзя странным и удивительным. Еще более озадачило его то, что крошечный сдвиг светового пятна вызвал вдруг торможение в клетке, прежде активной. Это наблюдение экспериментатор сделал, медленно и плавно перемещая очень тонкий световой луч по сетчатке. Таким образом ему удалось исследовать рецептивные поля очень многих ганглиозных клеток. При этом Куффлер обнаружил, что все рецептивные поля похожи друг на друга и обладают весьма характерной формой — центральный круг, окруженный концентрическим кольцом (рис. 10.7). Пока световое пятно уместается внутри центрального круга, соответствующая ганглиозная клетка активизируется, как только свет попадает на кольцевую часть рецептивного поля, в ней начинается процесс торможения. Таким образом, центральная и периферийная зоны поля противоположны по своим функциям. В том случае, когда освещены одновременно и центр, и периферия, активность ганглиозной клетки оказывается выраженной весьма слабо, так как процессы торможения на периферии по большей части компенсируют возбуждение в центральной зоне. Это объясняет, почему первоначальные эксперименты не обнаруживали сколько-нибудь заметных изменений электрической активности ганглиозных клеток — ведь тогда световое раздражение «накрывало» весь глаз. При попадании светового пятна только на периферийную зону наступает полное торможение ганглиозной клетки (рис. 10.7). Отключение светового раздражителя имеет обратный эффект. При исчезновении раздражителя с периферийной зоны клетка кратковременно возбуждается, если раздражитель убрать с центральной зоны, возникает столь же кратковременное торможение. Таким образом, делаем вывод: клетки реагируют на *изменение освещения*.

Однако не все так просто. Дело в том, что в ходе экспериментов Куффлер обнаружил еще один тип ганглиозных клеток. Рецептивное поле клеток этого типа организовано по обратному принципу: воздействие света на центральную зону вызывало торможение в соответствующей ганглиозной клетке, а воздействие на периферию — активизацию. Для того, чтобы различать эти клетки, клетки первого типа называются *оп-нейронами*, а второго —

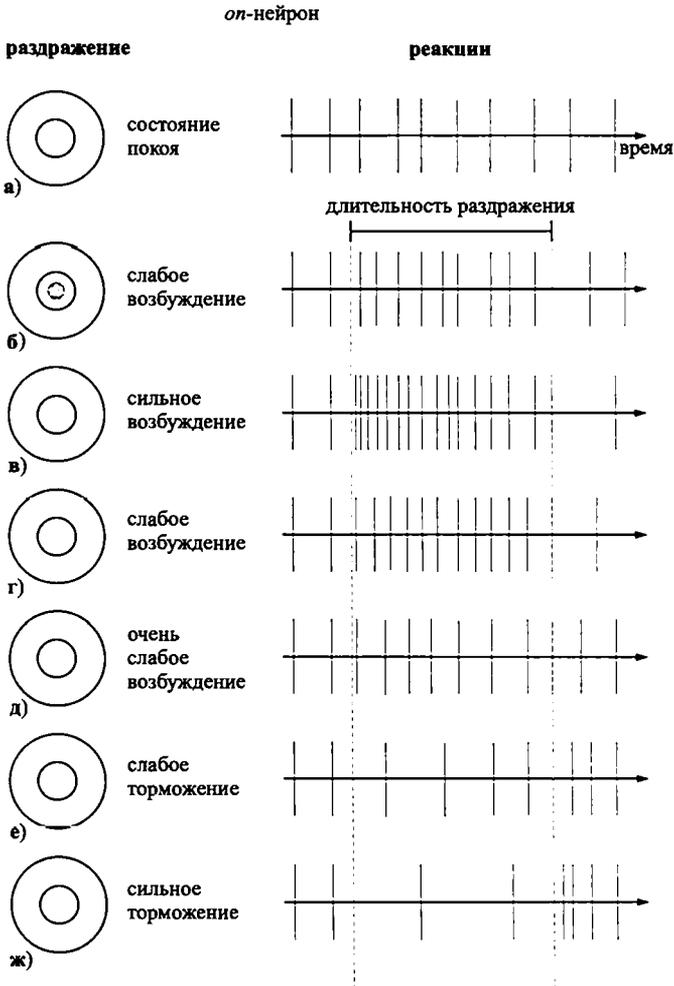


Рис. 10.7. Реакции ганглиозной *оп*-клетки (*оп*-нейрона) на различные степени раздражения. Слева схематично изображено рецептивное поле, состоящее из центральной и периферийной зон; световое раздражение для большей наглядности показано темным. Справа — реакция клеток на соответствующее раздражение; вертикальными штрихами обозначены нервные импульсы — чем сильнее возбуждение, тем гуще расположены штрихи, тем чаще следуют друг за другом импульсы

*off*-нейронами<sup>2</sup>. Клетки обоих типов можно далее разделить на подтипы, отличающиеся как внешним видом, так и электрическими свойствами. Эти подтипы обозначают буквами X, Y и W. Кроме того, ганглиозные клетки различных подтипов передают сигналы в различные области мозга. Предполагается, что клетки подтипа Y заняты передачей информации об общих контурах объектов; при более тонком анализе деталей и образов используется информация, передаваемая X-клетками. В главе 13, посвященной цветовому зрению, мы познакомимся еще и с такими клетками, которые способны особым образом реагировать на световые волны различной длины.

И все же — несмотря на известное разнообразие ганглиозных клеток — мы можем утверждать, что в целом сетчатка построена из стереотипных базовых единиц, и единицами этими являются рецептивные поля. Число ганглиозных клеток не так велико, как число фоторецепторных клеток (на приблизительно миллион ганглиозных клеток приходится около 130 миллионов фоторецепторных клеток). Размер рецептивного поля ганглиозной клетки зависит от места ее расположения. Самые маленькие поля находятся в области желтого пятна и содержат всего лишь по несколько колбочек на каждую ганглиозную клетку. По мере удаления от желтого пятна размеры полей увеличиваются, и на периферии сетчатки поле каждой ганглиозной клетки насчитывает многие тысячи палочек. Таким образом, разрешающая способность глаза уменьшается от центра желтого пятна к периферии; аналогичная закономерность была установлена и для собственно фоторецепторных клеток — плотность желтого пятна уменьшается от центра к краям, и эффект от этого уменьшения еще усиливается за счет увеличения размеров рецептивных полей.

Кроме того, поля, состоящие из палочек, содержат большее количество клеток, чем поля, состоящие из колбочек, благодаря чему «палочковые» системы обладают повышенной светочувствительностью. Диаметр рецептивных полей в сетчатке кошки колеблется от 0,12 до 2,0 мм. Интересно, что структура такого поля не является фиксированной, и размер центральной зоны поля может увеличиваться в зависимости от того, насколько сильно освещена та область сетчатки, в которой расположено это поле. При неизменном диаметре поля размер центральной зоны будет тем меньше, чем сильнее освещена данная область сетчатки (рис. 10.8).

При этом нельзя забывать о том, что и синаптические связи между нервными клетками, и прочие анатомические реалии при изменении

---

<sup>2</sup>От англ. *on* — «включено» и *off* — «выключено». — Прим. перев.

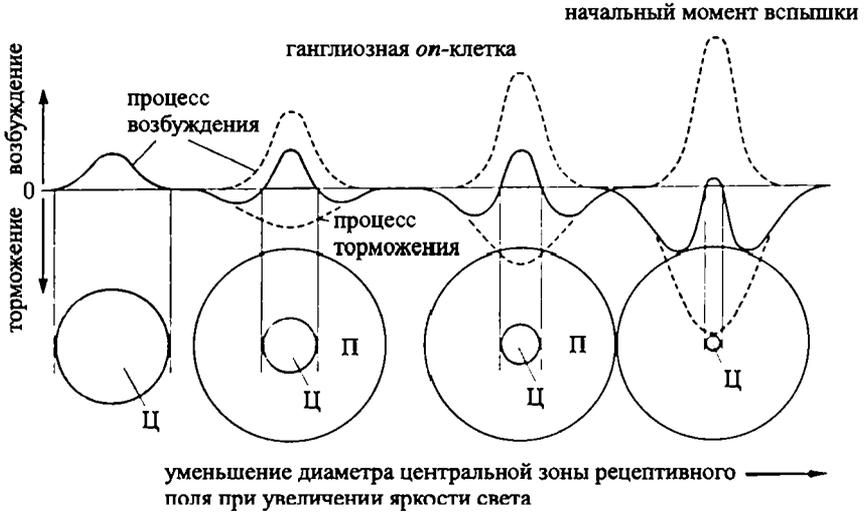


Рис. 10.8. Структура рецептивных полей в зависимости от общего уровня освещенности. Кривые в верхней части рисунка показывают наложенные друг на друга гипотетических процессов возбуждения и торможения (Ц — центральная зона, П — периферийная зона)

уровня освещенности остаются неизменными, и описанное явление до сих пор объясняется (несколько, пожалуй, схематично) взаимным наложением процессов возбуждения и торможения. Процессы торможения при усилении светового раздражения приобретают преобладающий характер, что и вызывает уменьшение размера центральной зоны поля. С уменьшением центральной зоны острота зрения повышается, однако при таком сильном освещении, которое приводит к почти полному исчезновению центральной зоны, адекватное восприятие формы становится невозможным — такой свет воспринимается как слепящий. Следует всячески избегать представления о рецептивных полях, как о лежащих один рядом с другим элементах мозаики. На самом деле поля соседних ганглиозных клеток в значительной степени перекрываются (рис. 10.9). Это означает, что каждая фоторецепторная клетка поставляет информацию сразу нескольким ганглиозным клеткам, и даже самый тонкий луч света (пусть даже его диаметр не превышает  $1/10$  мм) попадает в «зону действия» сразу нескольких полей. Открытие рецептивных полей стало подлинной вехой в истории изучения зрительной системы, сделав возможными

ми систематические целенаправленные исследования высших зрительных процессов.

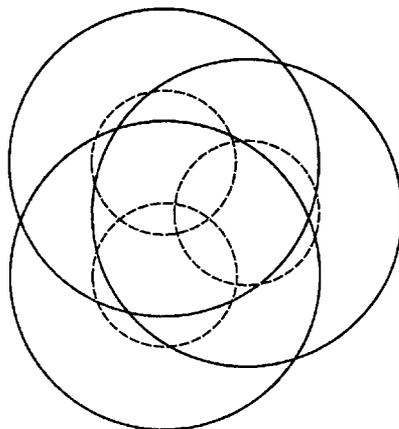


Рис. 10.9. Схематическое изображение наложения трех рецептивных полей. Пунктиром обозначены центральные зоны, сплошной линией — периферийные кольца полей

Итак, обобщим вкратце самое важное из того, что мы узнали о рецептивных полях сетчатки:

1. Совокупность фоторецепторных клеток, способных воздействовать на электрическую активность ганглиозной клетки, образует рецептивное поле этой клетки.
2. Рецептивные поля сетчатки имеют *округлую форму* и состоят из *центральной и периферийной зон*, причем в этих зонах протекают противоположные процессы.
3. Все ганглиозные клетки подразделяют на *on*-нейроны и *off*-нейроны: в *on*-нейронах при освещении центральной зоны рецептивного поля возникает возбуждение, а при освещении периферийной зоны — торможение, *off*-нейроны реагируют обратным образом.
4. Рецептивные поля сильно перекрываются.

Итак, нам известно, что сетчатка обрабатывает сигналы от световых раздражителей, причем делает это весьма своеобразным способом. Зададимся теперь целью найти ответы на следующие два вопроса:

1. Какими процессами в сетчатке обусловлена реализация рецептивных полей?

2. Что выигрывает оптическое восприятие от обработки светового сигнала системой рецептивных полей?

*д) Принципы функционирования рецептивных полей*

Попытаемся сначала ответить на первый вопрос. Рецептивные поля обусловлены, по всей видимости, сложными взаимосвязями между различными нервными клетками сетчатки. Сама структура поля, состоящего из двух антагонистических зон, позволяет сразу утверждать, что в деятельности таких полей одинаково важны как процессы возбуждения, так и процессы торможения, протекающие с участием определенных химических соединений-ингибиторов. Так какие же процессы происходят в сетчатке? Вы, возможно, полагаете, что все эти процессы уже до мельчайших подробностей объяснены. Это не так. Конечно, изучением сетчатки занимались очень многие исследователи, используя в своих экспериментах различных животных (среди которых были и лягушки, и голуби, и всевозможные млекопитающие, и даже крабы). Кропотливый труд этих исследователей не пропал даром: они подобрали множество элементов мозаики, и уже, пожалуй, можно разглядеть в общих чертах всю картину. Но с новыми знаниями приходят и новые вопросы, и ученые вновь и вновь с изумлением обнаруживают, сколь многое еще остается неизвестным. Так, например, было установлено, что в сетчатке в действительности имеется не просто пять различных типов клеток, а что каждый из этих типов можно, в свою очередь, подразделить на большое количество подтипов. Только среди амакриновых клеток было выделено не менее 30 подтипов, различающихся и внешним видом, и медиаторами, производимыми их синапсами. Конечно, было бы чудесно, если бы возможно было составить подробную точную схему рецептивного поля, на которой было бы четко обозначено, какие клетки связаны друг с другом, какими синапсами и какое воздействие оказывает на рецептивное поле каждая отдельная клетка.

Однако учитывая, насколько высокоорганизованной биологической системой является сетчатка, составление такой схемы сопряжено с весьма серьезными трудностями. Поэтому удовольствуемся пока самыми общими знаниями о предмете. При исследовании подобных систем необходимо сотрудничество представителей самых различных научных дисциплин. Во-первых, должна быть досконально изучена анатомия сетчатки. Работа эта весьма тонка и требует применения электронного микроскопа — для исследования, скажем, синапсов. Во-вторых, следует провести биохимические исследования, которые позволят установить, какие медиаторы воздейству-

ют на синапсы и каким образом. И, наконец, необходимо изучить свойства клеток сетчатки на электронном уровне.

Особо нужно отметить электрические исследования клеток. О применяемых в этих исследованиях технических средствах мы уже имеем некоторое представление. С помощью тончайшего электрода можно изучать и другие клетки сетчатки — биполярные, горизонтальные или амакриновые. Посредством введенного в нужную клетку электрода регистрируются изменения потенциала, вызванные особыми световыми раздражителями, проецируемыми экспериментатором на сетчатку подопытного животного. Выбор клетки в ходе эксперимента предоставлен, что называется, воле случая. Чтобы определить тип клетки, в которую оказался введен электрод, применяют следующую методику. В клетку через электрод впрыскивают краситель, а затем исследуют сетчатку под микроскопом. Окрашенная клетка хорошо различима, поэтому описанная процедура позволяет однозначно установить, какому именно типу принадлежит исследуемая клетка. Однако вскоре было обнаружено, что между электрическими характеристиками клетки и ее принадлежностью к какому-либо типу существует тесная взаимосвязь, и тип клетки можно определить исходя из ее «поведения» во время эксперимента. Через некоторое время, ученые пришли к выводу, что эксперименты с высшими животными чересчур расточительны, ведь для того, чтобы исследовать одну или даже несколько клеток, приходится брать всю сетчатку. Как следствие, в качестве подопытных стали использовать низших животных — таких, например, как крабы. Это, естественно, породило новую проблему: насколько результаты, полученные в ходе экспериментов с крабами, применимы к другим животным, и прежде всего к человеку. Ближайшими «родственниками» человека являются, конечно же, обезьяны, и результаты экспериментов с участием обезьян оказались бы, вероятно, в этом отношении самыми перспективными. Предпочтение при этом, само собой, следует отдавать опытам, пройдя через которые, животное остается в живых. И все же в животном мире прослеживаются некоторые аналогии, и мы рассмотрим здесь некоторые важные результаты экспериментов с низшими животными. Основой для понимания происходящих в сетчатке процессов является, естественно, внешний вид ее клеток и взаимосвязи между ними, т.е. анатомия сетчатки. Далее, необходимо выявить зависимость между обнаруженными в анатомических исследованиях связями и результатами электрофизиологических измерений.

Вернемся к рис. 10.5. Отметим, что с каждой ганглиозной клеткой связано множество биполярных клеток, каждая из которых, в свою очередь, соединена со множеством фоторецепторных клеток (рис. 10.10). Такая схе-

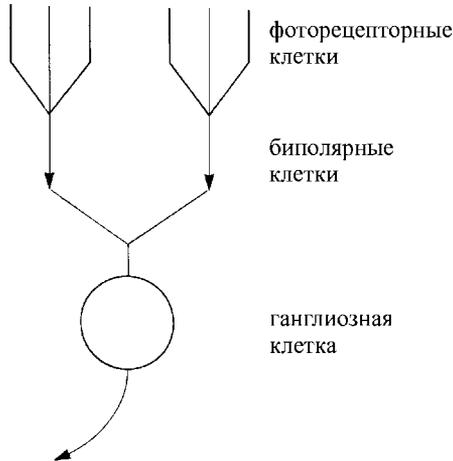


Рис. 10.10. Очень упрощенная схема соединения фоторецепторных, биполярных и ганглиозных клеток. Здесь не отражено то обстоятельство, что каждая фоторецепторная клетка может быть связана не с одной, а со многими биполярными клетками, а каждая биполярная — со многими ганглиозными

ма объясняет, каким образом становится возможной передача сигналов от относительно большого количества фоторецепторных клеток к одной ганглиозной. С другой стороны, каждая фоторецепторная клетка, в свою очередь, может быть связана с несколькими биполярными. Уже на уровне биполярных клеток обнаружено два различных типа клеток: биполярные *on*- и *off*-клетки, обладающие рецептивными полями, схожими с полями ганглиозных клеток во всем, кроме размеров (поля биполярных клеток несколько меньше). При попадании света в центральную зону поля *on*-клетки возникает возбуждение, при попадании света в периферийную зону — торможение. *Off*-клетки реагируют обратным образом. Биполярные *on*-клетки передают сигналы на ганглиозные *on*-клетки, а биполярные *off*-клетки — на ганглиозные *off*-клетки. Таким образом, разделение клеток на *on*- и *off*-типы имеет место уже на уровне биполярных клеток.

Каким же образом реализуется такое разделение? Какие из биполярных клеток реагируют на освещение центральных зон своих фоторецепторных полей возбуждением, а какие — торможением? Определяющую роль здесь, как выясняется, играют синапсы, т. е. связующее звено между фоторецепторными и биполярными клетками. Синаптические окончания фоторецеп-

торных клеток производят медиатор только *одного типа*, который, между тем, воздействует на биполярные *on*- и *off*-клетки противоположным образом — или, иначе говоря, биполярные клетки каждого из типов по-разному реагируют на один и тот же медиатор. Следует упомянуть и еще об одной странности, связанной с деятельностью синапсов: на свету фоторецепторные клетки вырабатывают *меньшее* количество медиатора, нежели в темноте. Вследствие этого, в биполярных *on*-клетках преобладающими становятся процессы торможения (поскольку в отсутствие света вырабатывается большее количество медиатора), а в *off*-клетках — процессы возбуждения.

На основании анализа относительных размеров клеток можно предположить, что центральная зона рецептивного поля обусловлена прямыми коммуникациями, т. е. путями, связывающими фоторецепторные клетки с ганглиозными через биполярные, а периферийная — непрямыми (т. е. теми, что проходят через *горизонтальные* и биполярные клетки). Действительно, каждая фоторецепторная клетка связана как с биполярными, так и с горизонтальными клетками. В пользу предположения о том, что возникновение периферийной зоны связано с горизонтальными клетками, говорят, в основном, два экспериментально установленных факта. Во-первых, рецептивное поле горизонтальной клетки значительно больше, благодаря чему и более отдаленные фоторецепторные клетки могут быть опосредованно связаны с соответствующей ганглиозной клеткой. Во-вторых, было обнаружено, что всякая горизонтальная клетка через свои тормозные синапсы оказывают на соседние области сетчатки воздействие, противоположное текущему состоянию области, в которой находится сама — иными словами, если определенная область сетчатки возбуждена, то в соседних с ней областях в результате воздействия соответствующей горизонтальной клетки наступает торможение. То есть противоположные состояния центральной и периферийной зон рецептивного поля обусловлены именно горизонтальными клетками.

Функции амакриновых клеток весьма разнообразны, чем и объясняется большое количество обнаруженных исследователями типов этих клеток. Предполагается, что амакриновые клетки, помимо прочего, регулируют развитие возбуждения ганглиозных клеток во времени, т. е. обеспечивают всплеск возбуждения центрального поля рецептивной зоны ганглиозной клетки при появлении светового раздражения и дальнейшее уменьшение уровня возбуждения, если световое раздражение остается постоянным.

Итак, мы обрисовали в общих чертах важнейшие функции отдельных типов клеток сетчатки. Сами фоторецепторные, биполярные, горизонтальные и амакриновые клетки еще не генерируют нервных импульсов, они лишь реагируют на возникающее при возбуждении или торможении изме-

нение разности электрических потенциалов между внутренней и наружной поверхностью сетчатки. Правда, результаты экспериментов с некоторыми видами животных говорят о том, что амакриновые клетки генерируют-таки нервные импульсы. При торможении текущий потенциал клетки возрастает, а при возбуждении — уменьшается, причем величина изменения напряжения зависит от интенсивности процессов возбуждения и торможения. Иными словами, при отсутствии нервных импульсов напряжение изменяется плавно, и величина такого изменения не является постоянной (когда происходит передача нервного импульса, напряжение изменяется скачкообразно, причем всегда на одну и ту же величину). В клетках четырех названных выше типов напряжение изменяется на протяжении всего времени раздражения. Это изменение определяет и их синаптическую активность: увеличение напряжения приводит к уменьшению выработки медиатора, и наоборот.

То обстоятельство, что реагировать на раздражение генерацией нервных импульсов способны только ганглиозные клетки, объясняется разницей в расстоянии, на которое требуется передать возбуждение. Сигналу от ганглиозной клетки необходимо пройти довольно длинный путь (от сетчатки через зрительный нерв к мозгу). Сама же сетчатка к такому просто не приспособлена — сигналы ее клеток не могут преодолеть расстояний, превышающих толщину сетчатки, а толщина эта, как известно, очень и очень невелика. Небольшие по величине плавные изменения напряжения годятся для передачи возбуждения лишь на короткие расстояния, так как такой сигнал очень быстро загухает, и заключенная в нем информация оказывается потерянной.

Нервные импульсы, передаваемые ганглиозными клетками в мозг, являются конечным результатом всех взаимодействий клеток сетчатки, которая осуществляет не только передачу зрительных сигналов, но и очень сложную их обработку. Мозг, в конечном счете, получает только ту информацию, которую передают ему ганглиозные клетки, а она является, в свою очередь, результатом обработки световых сигналов, принятых из внешнего мира фоторецепторными клетками сетчатки.

Интересно, что процесс такой обработки у некоторых представителей фауны оказывается даже более сложным, чем у высших млекопитающих. Так, например, в сетчатке лягушки имеются особые клетки, реагирующие исключительно на маленькие, темные, хаотично движущиеся объекты. Здесь, пожалуй, можно уже говорить о механизмах распознавания добычи. Очевидно, сложные процессы обработки информации переместились в ходе эволюции в мозг, чтобы обеспечить по возможности более гибкое поведение и лучшую приспособляемость к изменяющимся условиям существования.

При этом не следует забывать о том, что сетчатка представляет собой, в сущности, продолжение мозга — именно поэтому у низших животных она берет на себя несколько большую долю его функций.

Теперь, познакомившись с важнейшими экспериментальными результатами, читатель сможет достаточно хорошо представить себе всю сложность происходящих в сетчатке процессов. Однако возникает новый вопрос: для чего нужны все эти сложности? И какова роль рецептивных полей в распознавании образов?

#### *е) Рецептивные поля и зрение*

Для демонстрации роли зрительных полей в зрении человека лучше всего воспользоваться конкретным примером. Представим себе границу между светлым и темным. Для упрощения задачи можно поместить на темный фон белый лист бумаги и сосредоточить внимание на границе этого листа. Или можно посмотреть на рис. 10.11. В данной ситуации часть сетчатки оказывается освещенной, и соответственно фоторецепторные клетки получают много света. Очень четко ограниченная темная область отражает на клетки сетчатки значительно меньше света. Какой при этом будет реакция различных ганглиозных клеток? На том же рисунке представлены схематические изображения рецептивных полей, принадлежащих нескольким ганглиозным клеткам *on*-типа. Для наглядности поля расположены друг под другом. В действительности же, как нам известно, они очень сильно перекрываются. С таким же успехом можно представить их нарисованными друг на друге. Однако сейчас мы рассмотрим лишь поведение нескольких отдельных рецептивных полей под воздействием границы между светлым и темным. Верхнее поле находится целиком в темной зоне, и в нем не наблюдается никаких изменений нормальной электрической активности, уровень которой в состоянии покоя довольно низок.

Во втором случае центральная зона поля все еще целиком находится в темной зоне, однако часть периферийной зоны уже оказывается освещена. Следствием этого является торможение активности ганглиозной клетки. Следующее поле соответствует случаю, когда центральная зона полностью освещена, но некоторая часть периферийной зоны продолжает пребывать в тени, что и приводит к возбуждению клетки. Четвертое поле, оказавшееся полностью в освещенной зоне характеризуется лишь легким возбуждением, так как процесс, протекающий в центральной зоне поля незначительно преобладает над процессом в периферийной зоне. Сильнее всего, следовательно, реагируют те ганглиозные клетки, для которых граница между светлым и темным касается границы между центральной и периферийной

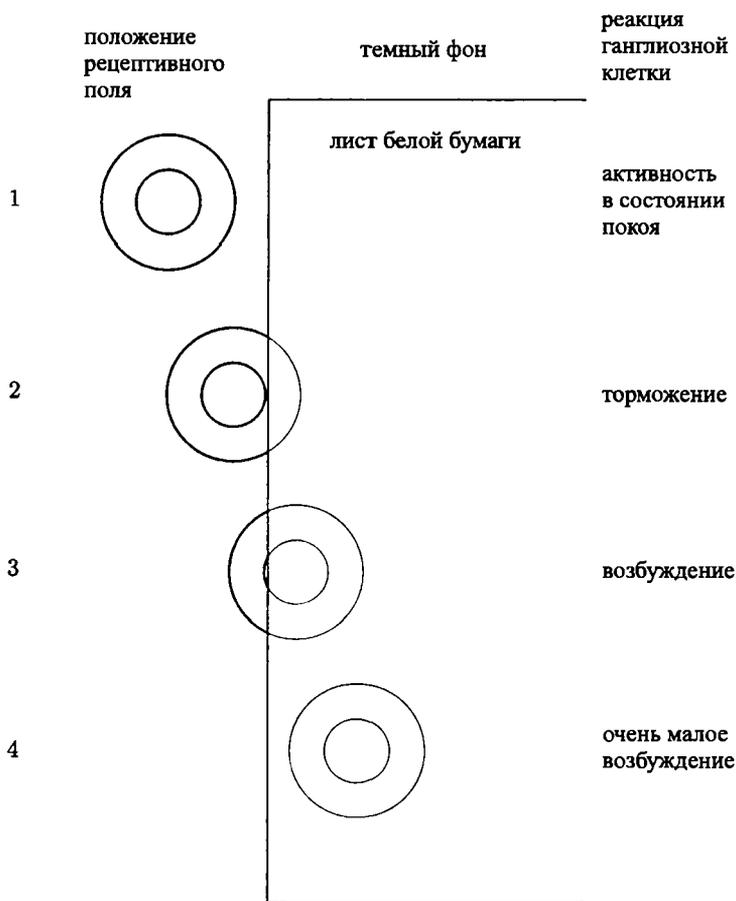


Рис. 10.11. Реакция на световое раздражение ганглиозных *оп*-клеток, рецептивные поля которых занимают различное положение относительно границы между светлым и темным (края листа белой бумаги, помещенного на темный фон)

зонами рецептивного поля. Во втором примере это приводит к сильнейшему торможению, а в третьем — к столь же сильному возбуждению. В целом же изменение активности нервных импульсов демонстрируют ганглиозные

клетки, чьи рецептивные поля так или иначе пересекают границу. И напротив, те клетки, поля которых находятся целиком либо в темной, либо в освещенной зоне, не проявляют существенных изменений активности. Отсюда можно заключить, что рецептивные поля служат для приема и передачи информации об *изменениях* яркости; усиливая, кстати, при этом контрастность передаваемого изображения.

Разобравшись с границей между светом и тьмой, зададим себе другой вопрос: как воспринимается область, находящаяся внутри такой границы?

Представим себе какую-нибудь светлую поверхность, скажем, круглой формы и поместим ее на темный фон. Разглядывая ее, мы видим сплошной светлый круг, хотя — как нам известно — изменения активности демонстрируют только те ганглиозные клетки, рецептивные поля которых приходятся на границу между светлым участком поверхности и темным, т. е. различие между активностью ганглиозных клеток, поля которых оказались внутри светлого круга, и клеток, поля которых в него не попали, весьма незначительно. Каким же образом наш мозг улавливает это различие? Очевидно, мозг полагает, что все ганглиозные клетки, лежащие по одну сторону границы и не передающие никаких особых сигналов, освещены точно так же, как и «пограничные». Мозг производит оценку уровня освещенности внутри круга, так сказать, опосредованно, руководствуясь сообщениями, переданными «пограничными» ганглиозными клетками.

То, что ганглиозные клетки и в самом деле сообщают лишь об изменении уровня освещенности, было наглядно продемонстрировано с помощью одного замечательного эксперимента, который заключался в следующем. Сначала экспериментатор отыскал в сетчатке подопытного животного (в данном случае — обезьяны) ганглиозную клетку *on*-типа и соответствующее ей рецептивное поле и точно определил в нем с помощью точечного светового раздражителя центральную и периферийную зоны. Затем вся сетчатка подверглась равномерному световому раздражению, а в центр рецептивного поля указанной клетки был направлен точечный луч, освещающий только центральную зону. Далее яркость светового луча очень медленно увеличивалась, и было обнаружено, что ганглиозная клетка реагирует на изменение уровня освещенности. Это произошло, когда яркость луча превысила «фоновую» (для всей сетчатки) на 2 процента. Опыты с людьми подтвердили величину порогового значения яркости, при котором испытуемые оказались способны выделить на однородном фоне отдельную точку.

Затем эксперимент повторили, увеличив яркость фонового освещения в пять раз. Яркость точечного луча снова медленно увеличивали до тех пор, пока не было достигнуто значение, на 2 процента превышающее яр-

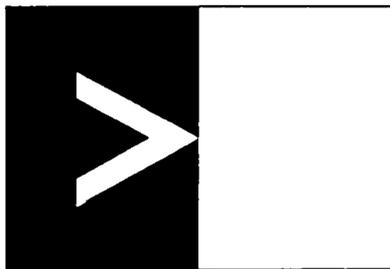


Рис. 10.12. Оптическая иллюзия, возникающая за счет усиления контрастности при восприятии (пояснение в тексте)

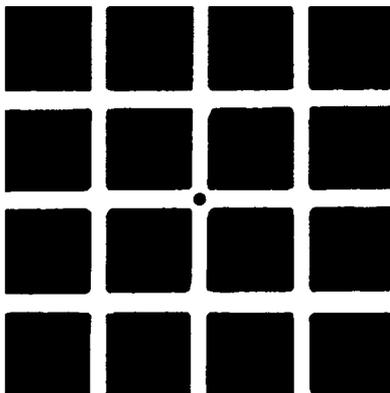


Рис. 10.13. Усиление контрастности. Узлы решетки выглядят более темными, чем ее прутья. Исключением составляет центральный узел, в котором находится черная точка

кость фона; и снова в этот момент ганглиозная клетка отреагировала на изменение яркости. В экспериментах с людьми испытуемые в этот момент начинали видеть на однородной фоне более яркую точку. Описанные эксперименты более чем убедительно показывают, что реакция ганглиозных клеток зависит не от абсолютной яркости точечного светового раздражителя, а от изменения его яркости относительно яркости фона. Ну а в том, что наш орган зрения снабжен механизмом, усиливающим контрастность, можно легко убедиться, взглянув на рис. 10.12. Серая стрелка на белом фоне кажется темнее стрелки, помещенной на черный фон, хотя в действительности эти стрелки абсолютно одинаковы. На рис. 10.13 изображена решетка из белых полос на черном фоне. Области пересечений «прутьев» решетки выглядят темнее самих «прутьев». Это происходит потому, что белые участки, граничащие с черными, кажутся нам ярче. Центральные же участки узлов решетки находятся на некотором удалении от границы с черным, поэтому увеличение яркости их не затрагивает — в результате они выглядят темнее тех участков, которые расположены ближе к границе. Центральный узел решетки не кажется темнее из-за находящейся в нем черной точки.

Этот феномен можно продемонстрировать и с помощью другого эксперимента. Если испытуемого поместить на долгое время в полностью затемненное помещение, то окружающая его темнота через некоторое время

потеряет свою непроницаемую «черноту» и будет восприниматься как некая «серость». Эта серость обусловлена, вероятно, спонтанным возбуждением нервных клеток и центральной зрительной системы, о которой мы еще поговорим позже. Когда глаза испытуемого привыкают к темноте, ему неожиданно показывают освещенную черно-белую шахматную доску. Светлые квадраты на ней воспринимаются испытуемым как белые, а темные — как черные, хотя освещенные темные квадраты отражают значительно больше света, чем до сих пор попадало ему в глаза в темной комнате. Здесь мы снова сталкиваемся с относительностью понятий «светлое» и «темное». Естественно, известную роль в этом играют процессы приспособляемости фоторецепторных клеток к интенсивности воспринимаемого светового излучения. Преимущества упомянутой относительности вполне очевидны, ведь все не излучающие собственного света объекты становятся видимыми только тогда, когда они освещены каким-либо источником света. Мощность этого источника может быть, конечно же, очень разной. Даже интенсивность солнечного света зависит, по крайней мере, от времени дня и погоды. Черные буквы в книге, которую читают при солнечном свете, могут отражать больше света, чем белый лист бумаги в умеренно освещенном помещении. Несмотря на это, черный и белый цвета мы всегда воспринимаем именно как черный и белый, вне зависимости от яркости освещения.

Остается невыясненным еще один вопрос: для чего ганглиозные клетки подразделяются на два типа? Более ста лет назад немецкий физиолог Эвальд Геринг, основываясь только на собственном субъективном восприятии, утверждал, что в органе зрения должны функционировать две противоположные нервные системы. Задолго до Стивена Куффлера Геринг экспериментальным путем обнаружил обе эти противоположным образом функционирующие системы, т. е. *on*- и *off*-клетки. На центральную зону поля *off*-нейрона темная точка оказывает то же воздействие, что оказывает светлая точка на центральную зону поля *on*-нейрона. Геринг предположил, что центральные зоны *off*-нейронов предназначены для восприятия темных объектов на светлом фоне. Дело это совсем не простое, так как темные или черные поверхности отражают очень малую часть падающего на них света, т. е. если и являются раздражителями для фоторецепторных клеток, то очень слабыми. Логично предположить, что отсутствие раздражителя приведет к отсутствию реакции, а следовательно, к отсутствию восприятия. Благодаря же совместной работе двух противоположно «настроенных» систем, мы получаем возможность вполне отчетливо видеть темные предметы на светлом фоне. Здесь уместно вспомнить и о том, что при длительном пребывании в совершенно темной комнате человек действительно начина-

ет видеть «более темные» объекты на фоне «менее темных» в различных оттенках серого.

Тот же принцип обнаруживается и в деятельности других органов чувств — например терморцепторов. Экспериментальным путем было установлено существование двух типов терморцепторных клеток: одни предназначены для восприятия тепла, другие — холода. Восприятие температуры столь же относительно, как и восприятие уровня освещенности, и это утверждение можно доказать аналогичными рассуждениями. В качестве примера приведем простейший опыт. Если опустить одну руку в горячую воду, другую одновременно с первой — в холодную, а через некоторое время переместить их вместе в теплую воду, то той руке, что прежде находилась в холодной воде, теплая вода покажется заметно более горячей, нежели той, что и в самом деле была в горячей воде. Абсолютное измерение температуры с помощью наших органов чувств невозможно — они функционируют в соответствии с принципами, в корне отличными от принципа работы термометра. То же относится и к восприятию света: любой фотограф знает, что уровень освещенности следует именно измерять, а не оценивать «на глаз» — определить абсолютную величину уровня освещенности глаз просто не в состоянии.

Мы ознакомились только с первым этапом сложных процессов обработки зрительной информации, однако при этом получили уже достаточно оснований проникнуться уважением и восхищением перед мастерством Природы. При своей весьма незначительной толщине сетчатка состоит из нескольких слоев клеток разного типа, соединенных между собой связями высокого уровня сложности. Особую роль в этой системе играют фоторецепторные клетки, являющиеся своеобразными посредниками между внешним миром (или, как говорят, «белым светом») и нервной системой. Да и все остальные клетки сетчатки ни в коей мере нельзя считать просто проводниками возбуждения; все они принимают самое активное участие в сложнейших процессах, благодаря которым поступающая извне информация передается ганглиозными клетками в мозг не в «сыром» виде, а пройдя предварительную обработку.

В следующей главе мы проследим путь, по которому осуществляется эта передача.

## 11. Зрительный тракт

На рис. 11.1 схематично показан путь, по которому информация передается от глаз к зрительной коре, расположенной в затылочной доле голов-

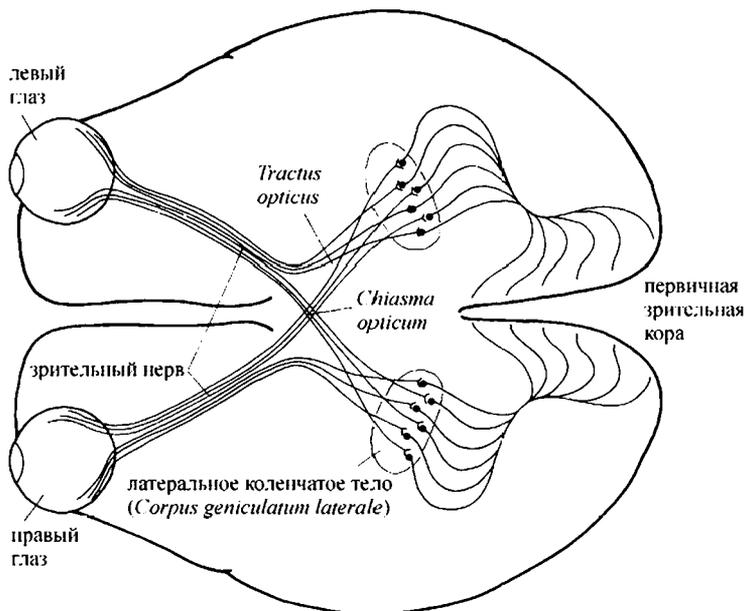


Рис. 11.1. Схематическое изображение зрительного тракта человека (*Chiasma opticum* — зрительный перекрест, *Tractus opticus* — зрительный тракт от зрительного перекреста до латерального коленчатого тела, *Cortex* — кора головного мозга, *Corpus geniculatum laterale* — латеральное коленчатое тело)

ного мозга. Сначала зрительные нервы обоих глаз встречаются у основания черепа, образуя так называемый зрительный перекрест (*Chiasma opticum*), при этом зрительный нерв каждого из глаз разделяется на две части, одна из которых затем тянется дальше, направляясь в латеральное коленчатое тело, являющееся частью таламуса. В латеральном коленчатом теле нервные волокна заканчиваются синапсами на залегающих здесь нейронах, аксоны которых направляются к коре затылочной доли головного мозга. Другая часть волокон зрительного нерва после перекреста отправляется не в соответствующее латеральное коленчатое тело, а к другим областям мозга, а именно — к среднему мозгу (к так называемой ручке верхнего двухолмия четверохолмия (*Colliculi superiores*)) и к претектальной области.

Познакомившись вкратце со зрительным трактом, обратимся к протекающим здесь процессам и рассмотрим их более подробно. Зрительный нерв каждого глаза человека состоит приблизительно из миллиона нервных

волокон. Проходя через зрительный перекрест у основания черепа примерно половина всех нервных волокон каждого зрительного нерва сохраняет свое направление, в то время как остальные волокна уходят в другое полушарие. Таким образом, каждый из зрительных нервов после перекреста состоит наполовину из нервных волокон, исходящих из правого глаза, и наполовину — из левого.

Разделение волокон происходит отнюдь не случайным образом. Первые волокна от левой половины сетчатки каждого глаза тянутся к левому полушарию, а нервные волокна, берущие начало в правых половинах сетчатки, соответственно, к правому. Принимая во внимание то, что картина внешнего мира отображается на сетчатке в перевернутом и зеркальном виде, можно заключить, что правая половина сетчатки каждого глаза воспринимает и переворачивает все, что находится в поле зрения человека слева, а левая половина, соответственно, — все, что справа. Если, например, на столе слева лежит мяч, а справа — карандаш, то мяч воспринимается правыми половинами сетчатки обоих глаз, и информация о нем попадает в правое полушарие, карандаш же отображается на левых половинах сетчаток, и информация о нем оказывается в левом полушарии.

Об этом обстоятельстве мы уже упоминали, описывая эксперимент с пациентами, у которых оперативным путем было рассечено мозолистое тело. У таких людей поле зрения оказывается разделенным на две половины, и становится невозможным одновременное восприятие объектов из разных половин. Органы осязания также обладают подобным зрительному перекрестом: осязательные ощущения правой руки обрабатываются левым полушарием, и наоборот.

Правая и левая зоны поля зрения, таким образом, воспринимаются отдельно и обрабатываются в разных полушариях. С другой стороны, каждое полушарие получает информацию от обоих глаз. Благодаря такому устройству, как уже говорилось, человек обладает пространственным зрением, поскольку при этом каждое полушарие обрабатывает совмещенные изображения, полученные от обоих глаз. Возможно, будет интересно сравнить соответствующие механизмы у человека и животных. Допустим, у лягушки каждое полушарие обрабатывает информацию, поступающую только от одного глаза, из-за чего лягушки начисто лишены способности к пространственному восприятию. У крыс и кроликов такая способность имеется, однако она очень ограничена из-за особенностей строения черепа. Глаза этих животных расположены по бокам головы, и поле зрения левого глаза лишь немного перекрывает поле зрения правого, в результате чего имеется только очень небольшая зона, которая действительно воспринимается обоими гла-

зами вместе. Очевидно, можно утверждать, что высшие млекопитающие — например обезьяны — особенно остро нуждаются в способности к восприятию пространства. Вообразите себе обезьяну, которая, прыгая с дерева на дерево, не может верно оценить расстояние до очередной ветки — ясно, что долго такая обезьяна не проживет и вряд ли успеет передать свои особые качества по наследству. Однако вернемся к зрительному тракту человека.

Итак, после зрительного перекреста большая часть нервных волокон попадает в латеральные колленчатые тела, находящиеся в таламусе. Здесь царит строгий порядок. Латеральное колленчатое тело, названное так из-за своей формы, содержит шесть слоев нервных клеток, причем каждый такой слой связан с нервными волокнами только *одного* глаза. Таким образом, информация от разных глаз оказывается в отделенных друг от друга слоях нервных клеток латерального колленчатого тела. Нервные волокна в латеральном колленчатом теле заканчиваются, и информация передается через синапсы другим нервным клеткам, аксоны которых тянутся к зрительной области коры головного мозга. Как мы видим, латеральное колленчатое тело служит для нервных волокон чем-то вроде коммутационного пункта. Пространственная структура сетчатки находит свое отражение в пространственной структуре латерального колленчатого тела: нервные волокна, берущие начало в смежных областях сетчатки, заканчиваются в соответствующих смежных областях латерального колленчатого тела. Такая организация присуща всей зрительной системе в целом: нервные волокна, несущие информацию от смежных участков сетчатки, остаются соседями на протяжении всего пути от глаза к мозгу. Это соседство, правда, непохоже на соседство в географическом, например, смысле, так как соотношение размеров здесь оказывается различным: отображение желтого пятна сетчатки, например, занимает относительно большее пространство, что со всей очевидностью свидетельствует о том, что обработка зрительных ощущений, получаемых желтым пятном, производится особенно детально.

Используя экспериментальные методы, аналогичные тем, о которых мы говорили при рассмотрении сетчатки, можно исследовать с помощью электродов рецептивные поля нервных клеток латерального колленчатого тела. В результате таких исследований было установлено, что рецептивные поля клеток латерального колленчатого тела подобны рецептивным полям клеток сетчатки: у них так же наблюдается круглая центральная зона и концентрическая ей кольцеобразная периферийная зона, а также деление на поля с *on*- и *off*-центрами. Пока не совсем ясно предназначение такого деления, потому что чисто электрофизиологические методы не дают нам относительно него никаких новых сведений. Для того чтобы понять назна-

чение коленчатого тела, необходимы, бесспорно, дальнейшие интенсивные исследования. Нервные волокна, идущие от латерального коленчатого тела, заканчиваются в первичной зоне зрительной области коры головного мозга (рис. 11.1). Эта область связана с вторичными и третичными зрительными полями, а также с высшими ассоциативными областями, находящимися здесь же, в затылочной, либо в теменной долях головного мозга и обеспечивающими связи с другими областями коры головного мозга — например, с центром чтения, в котором буквы или слова соотносятся с соответствующими образами. Отсюда информация может быть передана дальше, к центру речи (об этом мы уже говорили в главе 6).

Почему же некоторые нервные волокна уходят в другие области мозга? Верхнее двухолмие четверохолмия, наряду с прочими важными задачами, управляет быстрыми движениями глаз, а кроме того, отвечает за рефлекс, относящиеся к движениям головы и шеи. Таким образом, по крайней мере, быстрые движения глаз (подробнее эти движения мы рассмотрим ниже) производятся рефлекторно. Быстрые движения глаз могут быть как обусловлены процессом зрительного восприятия, протекающего сознательно и захватывающего кору головного мозга, так и производиться неосознанно, благодаря связям зрительной области с другими участками коры. Разумеется, верхнее двухолмие четверохолмия получает сигналы и из зрительной области. Так называемая претектальная зона обуславливает рефлекторное сужение зрачков в ответ на увеличение уровня освещенности, что, как нам уже известно, происходит автоматически без каких бы то ни было волевых усилий.

Обобщая все вышесказанное относительно процесса прохождения сигналов по зрительному тракту, можно сказать, что нервные волокна на определенных участках тракта перестраиваются и переключаются на новые проводящие пути, однако радикальной обработки информации здесь не происходит.

Перейдем теперь к более интересному и даже таинственному элементу зрительной системы — к зрительной области коры головного мозга.

## **12. Зрительная область коры головного мозга**

### *а) История исследования*

Хотя до некоторой степени зрительная информация обрабатывается еще при прохождении зрительного сигнала через сетчатку и коленчатое тело, осознаваемое зрительное ощущение возникает только в коре головно-

го мозга. О структуре и функциях зрительной области коры — той самой области, где и формируется это ощущение — известно довольно много. Расскажем коротко об истории исследования зрительной области, опираясь на то, о чем читатели уже знают из главы 6, посвященной мозгу.

Раньше всего было изучено анатомическое строение головного мозга. К концу XVIII века уже было известно, что мозг состоит из коры (так называемое серое вещество) и мозгового (или белого) вещества (см. рис. 6.8). На сегодняшний день мы можем добавить к этому кое-что еще: серое вещество коры состоит из тел нервных клеток, а белое вещество составляют нервные волокна. Предполагалось также, что серое вещество представляет собой единую однородную массу, однако итальянец Франческо Дженнари обнаружил в корковом слое белые полосы. Белые полосы ярко выражены в различных зонах мозга, и особенно хорошо — именно в первичной зрительной коре. Теперь они носят имя открывшего их ученого и называются полосы Дженнари, а соответствующие области головного мозга известны как полосатая зона, или *Area striata*. Дженнари, конечно, еще ничего не знал о функциях этой области коры, однако догадывался, что с различным строением участков коры связаны и различные функции. Об исследованиях отдельных областей коры головного мозга мы уже рассказывали подробно в главе 6.

Каким же образом была обнаружена зрительная область? Как это часто случается в науке, здесь не обошлось без недоразумения. В конце XIX века английский нейролог и физиолог Дэвид Ферье проводил эксперименты с обезьянами. Оперативным путем у подопытного животного удалялись определенные извилины головного мозга, а затем изучались последствия таких операций. Вырезав из обоих полушарий мозга обезьяны боковые извилины, ученый обнаружил, что обезьяна оказывалась не в состоянии взять стоящую перед ней чашку чая и отпить из нее, хотя до операции эти действия не вызывали у нее никаких затруднений. Из этого Ферье заключил, что обезьяна ослепла и поэтому не может найти чашку. Типичный пример ложного вывода, потому что в действительности у обезьяны был поврежден не зрительный центр, а область, контролирующая зрительно управляемые движения. В задачи этой области входит точное согласование различных движений — такое, например, какое требуется для того, чтобы из большой груды камней вытащить определенный маленький камушек. После того, как эта область оказывалась повреждена, обезьяна больше не могла координировать необходимые для взятия чашки движения, и поэтому не брала стоящую перед ней чашку. Этот пример показывает, с какой осмотрительностью следует относиться в подобных случаях к выводам и заключениям.

Настоящий зрительный центр обнаружил немецкий физиолог Герман Мунк в 1877 году. Этот центр расположен в затылочной доле головного мозга (рис. 12.1). Следующий шаг в изучении этой области мозга был сделан японским военным врачом Иноуе. Во время русско-японской войны 1904–1905 гг. он обследовал солдат с ранениями, повлекшими за собой повреждение мозга и нарушение зрения. Успеху его исследований способствовало одно удивительное обстоятельство: новое оружие русской армии стреляло пулями меньшего размера, придавая им при выстреле очень высокую скорость. При попадании в голову такие пули часто пробивали череп насквозь. Раненые вскоре выздоравливали и становились участниками экспериментов своего военврача. Сначала Иноуе попытался установить зависимость между определенными местами поражения и характером зрительных нарушений — такими, например, как выпадение из поля зрения некоторой области. Ему удалось таким образом сопоставить различные области сетчатки с участками коры головного мозга. Так было обнаружено, что отображение сетчатки на зрительную область коры сильно искажено, а участок коры, соответствующий области желтого пятна, по сравнению с периферийными зонами сетчатки, непропорционально велик.

Аналогичную схему соответствия поля зрения и зрительной коры головного мозга разрабатывали во время Первой мировой войны два английских нейролога, Гордон Холмс и Уильям Тинделл Листер. В дальнейшем эта схема неоднократно уточнялась и совершенствовалась. Так, в 1941 году Уэйд Маршалл и Сэмюэл Толбот в ходе электрофизиологических исследований окончательно подтвердили, что смежные области сетчатки соответствуют смежным участкам зрительной коры. Методика, примененная Маршаллом и Толботом заключалась в следующем: раздражая сетчатку точечными световыми сигналами, исследователи определяли, какая именно зона коры головного мозга оказывалась при этом возбужденной. Эксперименты эти проводились еще до того, как Стивен Куффлер обнаружил в сетчатке рецептивные поля. Решающее значение для исследований в этом направлении имели работы шведа Торстена Визела и американца Дэвида Хьюбела, ставших в 1981 году лауреатами Нобелевской премии в области медицины. Подробнее об этих работах мы поговорим ниже.

#### *б) Анатомия зрительной коры головного мозга*

Зрительная область коры головного мозга находится в затылочной доле. При вскрытой черепной коробке снаружи видна лишь небольшая ее часть. И только если полушария отделены друг от друга, то на лежащей

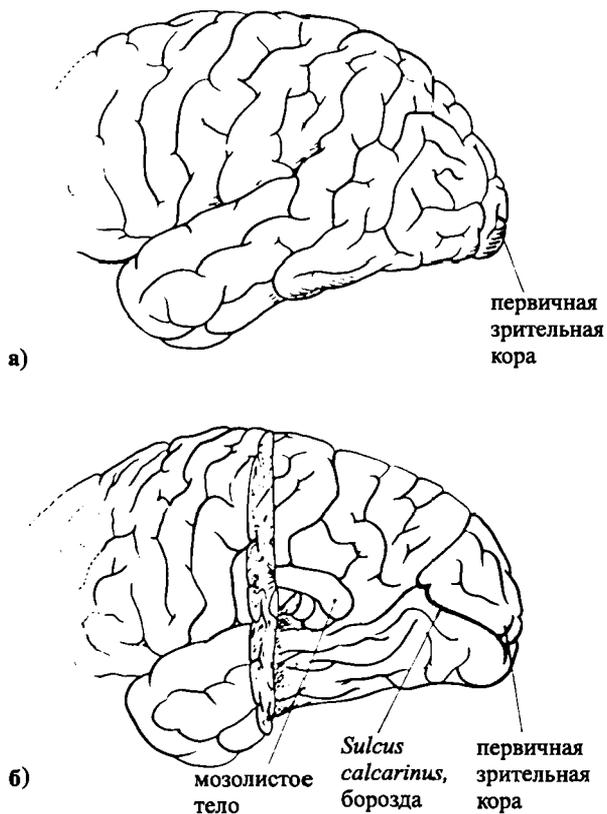


Рис. 12.1. Расположение первичного зрительного поля на коре головного мозга: (а) вид сбоку; (б) вид сбоку после удаления части левого полушария

между ними поверхности коры становится видна большая часть интересующей нас зрительной области — участок поверхности мозга площадью в несколько квадратных сантиметров и толщиной около двух миллиметров (рис. 12.1 (б), справа). О сложности ее строения можно судить уже по числу составляющих ее клеток. Если в колленчатом теле насчитывается примерно 1,5 миллиона клеток, то в зрительной области коры количество клеток достигает 200 миллионов!

Отвечающую за зрительное восприятие корковую область исследователи подразделяют на различные зоны. Первая зона — та, где оканчиваются

зрительные тракты, идущие от коленчатого тела — называется первичным зрительным полем. Эта зона обозначается как V1 или 17; далее следуют соединяющиеся с ней поля 18 и 19 (или V2, V3 и т. д.). На тонкостях их нумерации мы здесь останавливаться не будем; для наших целей достаточно и того, что мы проводим условное разделение первичного, вторичного и т. д. зрительных полей. Однако важно отметить, что каждое из них представляет собой более или менее точный аналог сетчатки. Это означает, что раздражение определенного участка сетчатки вызывает реакцию соответствующего ему участка зрительной коры. Таким образом, корковую область можно рассматривать как в некотором роде карту сетчатки. Естественно будет предположить, что в каждом полушарии мозга можно найти соответствия половинам поверхности сетчатки обоих глаз. В настоящее время количество зрительных полей, например, у обезьян оценивается, по меньшей мере, числом 15, у человека же оно, по всей видимости, еще больше. Действительно хорошо исследованным считается сейчас только первичное зрительное поле, так что в своих рассуждениях мы ограничимся, по большей части, именно им.

Для того, чтобы разобраться в механизмах работы зрительной коры, необходимо, естественно, сначала подробно изучить ее строение. Дженнари первым отметил, что внутри коры имеются белые полосы. Сейчас нам известно, что зрительная область коры делится на шесть слоев, которые различаются и по типу образующих их клеток, и по плотности их «укладки». Слои эти нумеруются римскими цифрами от I до VI, причем четвертый слой подразделяется на слои IVa, IVб и IVв. Слои связаны между собой сложной сетью нервных волокон. Почти все зрительные проводящие пути, идущие от коленчатого тела, оканчиваются в слое IVв. Нейроны этого слоя связаны со слоями II и III, а те, в свою очередь, соединяются с остальными слоями.

Путь нервного импульса от глаза к мозгу ни в коем случае не следует представлять в виде улицы с односторонним движением, заканчивающейся в некоем тупике. Здесь имеется множество «петель», т. е. участков с обратной связью, где сигнал может не только двигаться вперед, но и возвращаться назад: например, из слоя V обратно в слой IV. Возврат сигнала из зрительной коры к латеральному коленчатому телу или четверохолмью обеспечивается соответствующими нервными волокнами. Вероятно, это обратное сообщение также играет важную роль в осуществлении процесса восприятия, однако нам еще далеко не все известно о его предназначении. Аналогичным образом первичное зрительное поле связано с другими зрительными полями, однако чтобы не заблудиться в подробностях, отметим лишь, что

между отдельными слоями первичной зрительной коры, другими полями и прочими областями мозга имеют место многочисленные и весьма сложные взаимодействия.

Существование всех этих связей и взаимодействий было установлено в ходе экспериментальных исследований, проведенных Чарлзом Гилбертом и Торстеном Визелом. С помощью микропипетки ученые впрыскивали внутрь отдельных нейронов специальный состав, таким образом «помечая» их, и благодаря этому смогли не только определить точное строение нервных клеток, но и проследить их связи с другими нервными клетками. Для исследования связи между глазом и соответствующей областью мозга Торстен Визел и Дэвид Хьюбел поставили очень интересный опыт. Наркотизированной обезьяне ввели внутрь *одного* глаза некоторое количество радиоактивной аминокислоты — структурного элемента белка. Клетки сетчатки, где в конечном счете оказалось радиоактивное вещество, построили на его основе молекулы белка и отправили их дальше по нервным волокнам, к латеральному коленчатому телу. Отслеживая радиоактивные молекулы, ученые совершенно точно определили, что нервные волокна заканчиваются в определенном слое коленчатого тела. Мы уже упоминали об этом факте в главе 11, при рассмотрении зрительного тракта; а установлен он был как раз в результате описанного эксперимента.

Через синапсы коленчатого тела частицы радиоактивного вещества попадают, наконец, на нервные пути, ведущие к зрительной области коры. Чтобы выяснить, где именно скапливаются радиоактивные молекулы, попавшие в мозг таким путем, ткань мозга впоследствии рассекли на очень тонкие слои, которые затем выкладывались в темноте на высокочувствительную фотопленку. Результаты этого эксперимента отражены на рис. 12.2. Обратите внимание на характерную полосатую структуру слоя IVв: участки, содержащие радиоактивные молекулы (светлые), чередуются с участками, не содержащими таковых (темные). Это означает, что «меченые» участки (т. е. участки, связанные с тем глазом, куда вводили радиоактивную аминокислоту) перемежаются в зрительной коре с участками, связанными со вторым, «необработанным» глазом. Нервные клетки, связанные (как в данном случае) только с одним глазом, называются монокулярными. В других слоях коры обнаружены клетки, связанные одновременно с обоими глазами; такие клетки называют бинокулярными. У обезьян, например, бинокулярные клетки составляют  $\approx 60\%$  всех нервных клеток. В дальнейшем мы еще поговорим о том, какое воздействие оказывают на отдельную нервную клетку импульсы, поступающие от обоих глаз одновременно, поскольку для понимания принципов работы зрительной коры головного мозга особенно

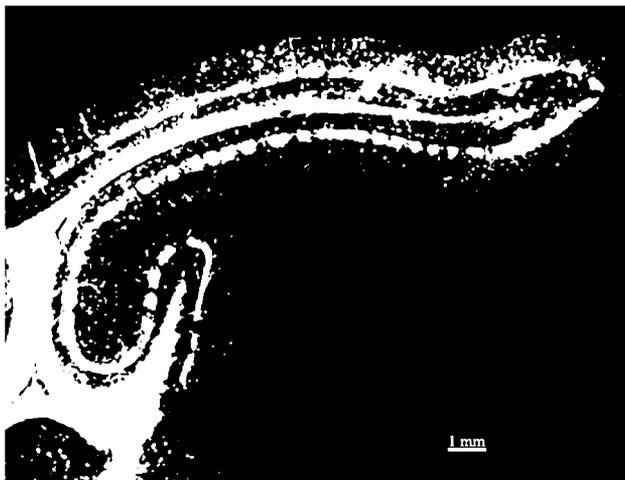


Рис. 12.2. Радиоактивно маркирование первичной зрительной коры путем введения радиоактивного вещества в один глаз. Светлые участки соответствуют радиоактивным зонам. В слое IV радиоактивные области (светлые) чередуются с нерадиоактивными (темными)

важно знание точной структуры этой зоны мозга и связей между различными нервными клетками, ее составляющими — хотя одного лишь этого знания, конечно, недостаточно. Точно так же, как и при изучении сетчатки, необходимо исследовать и физиологические свойства клеток: установить, например, какие оптические раздражители при попадании на сетчатку способны вызвать возбуждение определенных клеток коры.

#### в) Рецептивные поля в коре и в глазах

Как известно, каждая ганглиозная клетка сетчатки обладает своим рецептивным полем, состоящим из двух концентрических зон. Аналогичные рецептивные поля с *on*- и *off*-центрами и противоположными им по функциям периферийными зонами обнаружены и у клеток латерального коленичатого тела, т. е. можно предположить существование несложной аналогии между свойствами нервных клеток коры и ганглиозных клеток сетчатки.

Однако читатель уже, по всей видимости, залодозрил, что клетки коры, вдобавок к известным, обладают и другими свойствами, совершенно для нас новыми. Действительно, изучение свойств этих клеток никак нельзя назвать

простым делом. Дэвид Х. Хьюбел в своей книге «Глаз и мозг»<sup>3</sup> рассказывает, как на помощь ученым в очередной раз пришел случай. Хьюбел и Визел исследовали одну клетку в зрительной коре головного мозга кошки с помощью введенного под черепную коробку электрода. Целью эксперимента было определение типа светового раздражителя (темная или светлая точка), вызывающего возбуждение данной конкретной клетки. Для этого использовались две маленькие прямоугольные пластины: стеклянная с нанесенной на нее темной точкой и латунная с точечным отверстием. На сетчатку подопытного животного направляли луч проектора, пропущенный через эти пластины. Эксперимент длился уже много часов, а ученые никак не могли добиться реакции клетки хотя бы на один из раздражителей. При этом нельзя было сказать, что клетка вовсе ни на что не реагировала: раз за разом наблюдалась ярко выраженная реакция на . . . смену пластин в проекторе. В конце концов Хьюбел и Визел пришли к выводу, что клетка, пусть и не реагируя на предлагаемые ей в качестве раздражителей светлую и темную точки, все же выдает реакцию на край пластины. Вот так, чисто случайно, было обнаружено, что действительным раздражителем для таких клеток является, по всей видимости, граница светлого и темного. Важность этого открытия трудно переоценить, поскольку очень многие клетки зрительной коры (в чем мы вскоре убедимся) реагируют исключительно на такого рода раздражители.

После того как было экспериментально изучено огромное количество клеток коры, оказалось, что и здесь существуют клетки различных типов, которые, соответственно, и реагируют на разные раздражители. Ради наглядности воспользуемся условным разделением клеток на простые и комплексные (по степени сложности организации их рецептивных полей). Рецептивные поля нервных клеток зрительной области коры головного мозга изучались, в основном, в ходе лабораторных опытов с кошками и обезьянами, похожих на те, с помощью которых ученые исследовали сетчатку (рис. 10.6), с той лишь разницей, что теперь электрод вводился под черепную коробку подопытного животного. Нужную клетку коры отыскать, разумеется, очень непросто, однако методы проведения экспериментов постоянно совершенствуются.

Рассмотрим рецептивные поля клеток различных типов. При этом следует непременно иметь в виду, что эти рецептивные поля связаны еще и с сетчаткой, т. е. каждый участок сетчатки воздействует на соответствующие клетки коры. Нейроны зрительной коры, расположенные в слое IVв, обла-

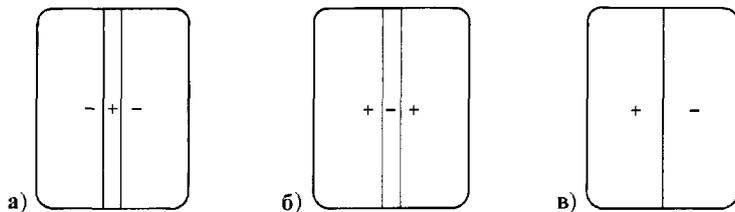
<sup>3</sup>D. Hubel. *Auge und Gehirn*. Spektrum, Heidelberg, 1989.

дают — точно так же, как клетки сетчатки и коленчатого тела — круглыми рецептивными полями, центральная и периферийная зоны которых функционируют противоположным образом. Все эти нейроны являются монокулярными, т. е. связанными только с одним глазом.

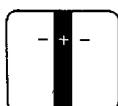
Что касается тех клеток коры, которые мы будем называть простыми, то принято считать, что они представляют собой в некотором роде первую станцию корковой области. Большинство из них вовсе не имеет рецептивных полей. На рис. 12.3 показаны три различных примера рецептивных полей, встречающихся у простых клеток. Сразу бросается в глаза то, что во всех трех случаях рецептивные поля имеют прямоугольную форму. В первом случае (а) центральная зона рецептивного поля такова, что при ее раздражении светом происходит возбуждение соответствующей клетки коры. Справа и слева от центральной зоны имеются две периферийные зоны, световое раздражение которых вызывает в этой клетке коры торможение. Во втором случае (б) наблюдается прямо противоположная картина; в случае (в) рецептивное поле состоит из двух смежных областей, одна из которых при воздействии на нее светового раздражителя вызывает возбуждение соответствующей клетки, а другая — торможение. На рис. 12.3 (г) схематично изображено воздействие различных раздражителей на рецептивное поле с рис. 12.3 (а). Светлая полоса, в точности совпадающая с зоной возбуждения рецептивного поля, вызывает оптимальную реакцию соответствующей нервной клетки. Если же такая полоса попадает целиком на зону торможения, клетка никак не отреагирует; в этом случае клетка реагирует — правда очень слабо — только на исчезновение раздражителя. Отклонение полосы на рисунке от вертикали гасит реакцию клетки, ослабляя ее или вовсе сводя на нет в зависимости от того, большая или меньшая часть полосы оказывается в зоне торможения. Иными словами, рассматриваемые клетки обладают очень высокой чувствительностью к ориентации раздражителя в пространстве, и только особым образом сориентированные световые полосы вызывают оптимальную реакцию клетки. Рассмотрим несколько более сложный вариант, при котором возбуждение соответствующих нейронов коры вызывается полосой света, не только сориентированной определенным

---

Рис. 12.3. (а), (б), (в) Рецептивные поля простых клеток. Знаком «+» обозначена область, отвечающая на световое раздражение возбуждением, знаком «-» — область, отвечающая на световое раздражение торможением. (г) Реакции клетки с рецептивным полем типа (а) на раздражение различным образом ориентированной световой полосой (световые полосы здесь изображены черными)



раздражение



сильное возбуждение



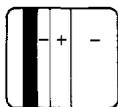
слабое возбуждение



торможение



слабое возбуждение

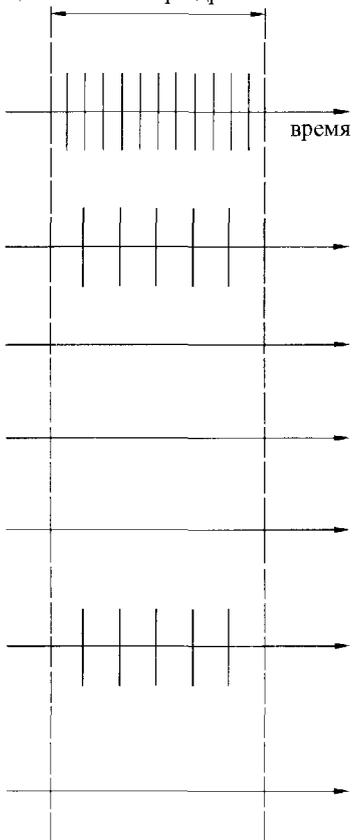


торможение

г)

реакция

длительность раздражения



образом, но и попадающей на определенный участок сетчатки. Исследование большого числа простых клеток показало, что в зрительной коре имеются клетки, отвечающие на любую ориентацию светового раздражителя, причем все направления оказываются «равноправными», т. е. ни одному из них (ни вертикальному, ни горизонтальному, ни какому иному) не отдается предпочтения, и количество клеток для каждого из направлений примерно одинаково.

Клетка, рецептивное поле которой изображено на рис. 12.3 (б), оптимально реагирует на темную полосу на светлом фоне, причем эта темная полоса опять же должна приходиться на центральную зону поля и быть правильно сориентирована. Клетка, поле которой представлено на рис. 12.3 (в), оптимально реагирует на границу между светлым и темным, но только тогда, когда эта граница в точности совпадает с линией, разделяющей зоны возбуждения и торможения рецептивного поля клетки, т. е. перед нами еще один пример специфической реакции на ориентацию раздражителя в пространстве.

Что же представляют собой такие рецептивные поля? На рис. 12.4 приведена гипотетическая схема их организации. Здесь изображены клетки, соединенные между собой возбуждающими синапсами, причем центральные зоны круглых рецептивных полей этих клеток лежат на одной прямой. Кроме того, как нам известно, рецептивные поля значительно перекрываются, то же можно сказать и о центральных зонах этих полей. В результате такого перекрытия нервные клетки коры образуют единое непрерывное рецептивное поле. Следует, однако, особо подчеркнуть, что в настоящий момент мы рассматриваем лишь некую умозрительную конструкцию, гипотетическую — пусть даже и весьма убедительную — модель, не подкрепленную пока еще экспериментально. Простые клетки с прямоугольными рецептивными полями связаны в большинстве своем с обоими глазами и являются, следовательно, бинокулярными, что подтверждается результатами опытов с введением подопытным животным радиоактивных молекул. Электрофизиологические исследования бинокулярных клеток показывают, впрочем, что связь такой клетки с одним из глаз все же оказывается сильнее. Если воздействовать на соответствующую зону сетчатки одного глаза раздражителем нужного типа, то клетки реагируют на такое раздражение по-разному: у части из них ярче выражена реакция на раздражение правого глаза, у остальных левого. Иными словами, один из глаз доминирует. Обычно каждому глазу соответствует примерно одинаковое число клеток. Однако если у маленького котенка в течение нескольких недель держать закрытым один глаз, то соотношение это определенным образом изменяется в пользу от-

крытого глаза, т. е. для подавляющего большинства клеток доминантным становится именно открытый глаз.

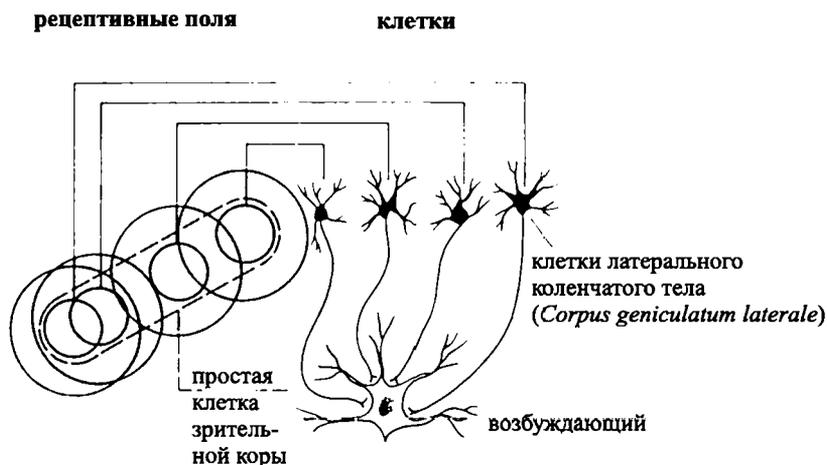


Рис. 12.4. Гипотетическая модель организации рецептивных полей с рисунка 12.3 (а) (пояснение в тексте)

Общим свойством всех простых клеток является то, что они обладают хорошо выраженными зонами возбуждения и торможения. Границы обеих зон можно определить с помощью точечного светового раздражения сетчатки; метод полностью аналогичен описанному ранее методу определения рецептивных полей ганглиозных клеток сетчатки. Если световая точка попадает на зону возбуждения, то клетка реагирует сильнее, если же на зону торможения — реакция клетки ослабевает. Простые клетки реагируют на статичный раздражитель, т. е. такой, положение которого во время эксперимента не изменяется. Иначе обстоит дело с комплексными клетками. Их рецептивные поля значительно больше, чем рецептивные поля простых клеток, а зоны возбуждения и торможения точно не определяются. Особенность комплексных клеток заключается, прежде всего, в том, что они реагируют на подвижные раздражители; особенно сильной оказывается реакция на световые полосы, движущиеся перпендикулярно собственной длиной стороне, но не вдоль зрительной оси. Комплексные клетки демонстрируют совершенно специфическую чувствительность к ориентации раздражителя; с наибольшей силой они реагируют на движущиеся в определенном

направлении и определенным образом сориентированные световые полосы (рис. 12.5).

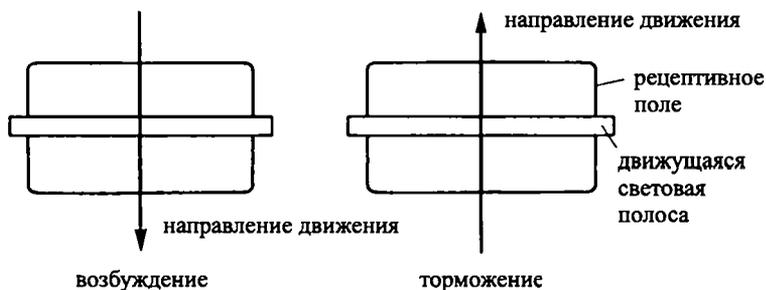


Рис. 12.5. Схематическое изображение рецептивного поля комплексной клетки. Реакция клетки определяется направлением движения световой полосы

Некоторые клетки настолько специфичны, что реагируют на движение световой полосы только в какую-то одну сторону и совершенно игнорируют движение в другую сторону. Однако имеются и клетки, реагирующие на движение полосы в обоих направлениях. Здесь можно представить себе еще одну схему — гипотетическую модель реакции клеток коры на световое раздражение сетчатки, аналогичную той, что мы описывали для случая простых клеток. Рецептивное поле комплексной клетки в этой модели является результатом взаимосвязи некоторого большого количества прямоугольных рецептивных полей простых клеток. Впрочем, эксперименты ясно указывают на то, что не все клетки с комплексными рецептивными полями получают информацию только от простых клеток; существует также «вход» непосредственно от расположенных в слое IVc клеток с круглыми рецептивными полями. Это означает, что представляемая модель является в настоящем ее виде слишком упрощенной и требует в будущем значительного усовершенствования на основе дальнейших экспериментов.

Мы познакомились с важнейшими типами клеток, составляющих зрительную область коры головного мозга. Размещение клеток в этой области ни в коей мере не случайно: мы можем наблюдать здесь строгую организацию основных элементов в так называемую колончатую структуру. Каждая колонка имеет от 30 до 100 мкм ( $1 \text{ мкм} = 1/1000 \text{ мм}$ ) в толщину и приблизительно 2 мм в высоту. Начнем осмотр со слоя IV, несколько клеток из которого (вместе с их рецептивными полями) попадают в каждую такую

колонку. Над ними и под ними находятся как простые, так и комплексные клетки, и вот что по-настоящему интересно: все чувствительные к ориентации раздражителя в пространстве клетки одной колонки реагируют на одинаково ориентированные световые полосы. Смежные колонки воспринимают световые полосы, повернутые друг относительно друга на угол, приблизительно равный  $10^\circ$ . Таким образом, все вместе колонки способны реагировать на любую ориентацию световой полосы от вертикальной до горизонтальной (рис. 12.6), а составляющие описываемую структуру нейроны упорядочены в соответствии со строгой системой. Небольшие структурные вкрапления «посторонних» клеток, встречающиеся в колонках, мы рассмотрим подробно несколько позднее, когда будем говорить о цветовом зрении. Кроме уже названного деления, колонки подразделяются в зависимости от того, какой глаз — правый или левый — является доминирующим для каждой из клеток колонки (так называемые глазодоминантные колонки). Для каждого участка сетчатки каждого глаза в коре имеется свой, так сказать, комплект колонок, содержащий нейроны, реагирующие на все мыслимые ориентации светового раздражителя в пространстве; такие комплекты Хьюбел и Визел назвали гиперколонками (англ. *hypercolumn*). Подобная колончатая структура наблюдается во многих областях коры головного мозга.

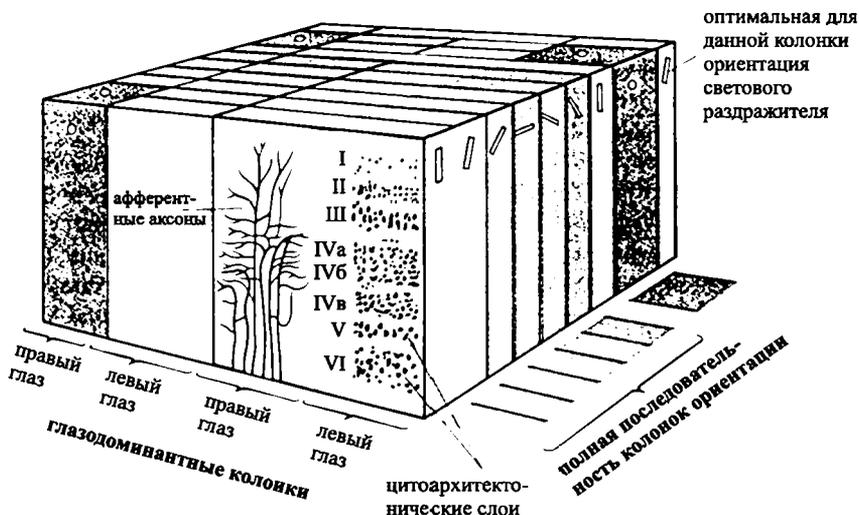


Рис. 12.6. Колончатая структура зрительной коры головного мозга



Рис. 12.7. Схематическое изображение рецептивного поля гиперкомплексной клетки. Реакция клетки определяется положением и направлением движения световой полосы

Клетки высших зрительных полей обладают еще более сложными свойствами, что находит отражение в их названии: гиперкомплексные. До сих пор эти клетки остаются в значительной степени менее изученными, нежели клетки первичного зрительного поля. На рис. 12.7 схематически изображено рецептивное поле гиперкомплексной клетки. Как и в случае с комплексными клетками, четкое определение зон возбуждения и торможения оказывается здесь невозможным. Точечные световые раздражители вообще не оказывают на такую клетку никакого воздействия. Более эффективным раздражителем может стать световая полоса, движущаяся слева направо в нижней половине рецептивного поля (рис. 12.7). Если же световая полоса движется в верхней половине поля, то она оказывается тормозным раздражителем. Движение полосы по всей ширине (или длине) поля вызывает лишь умеренное возбуждение. Некоторые рецептивные поля реагируют на еще более сложные раздражения, чем движение световой полосы (например, движение в определенном направлении двух соединенных под углом световых полос). Иными словами, среди гиперкомплексных клеток существует некая иерархия: от клеток, реагирующих на самые простые раздражители, до таких, которые активизируются только очень сложными сочетаниями различных по форме раздражителей.

Обобщая вышеизложенное, можно сказать, что зрительная кора представляет собой сложную иерархическую систему, объединяющую в одно целое все описанные в настоящей главе элементы: начиная с клеток с круг-

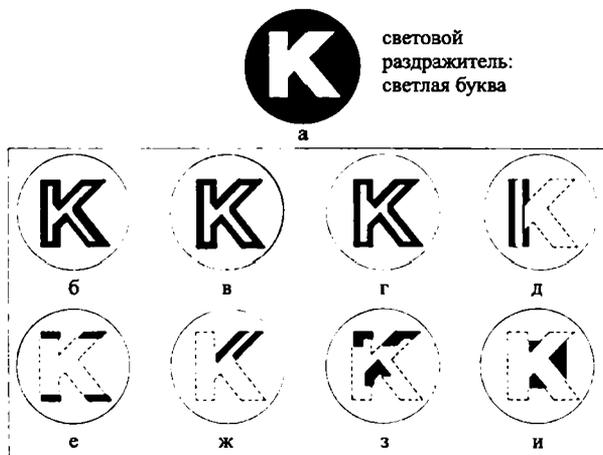


Рис. 12.8. Нейронное «отображение» светлой буквы «К» на темном фоне. Когда мы разглядываем изображение, различные нервные клетки нашей зрительной коры отфильтровывают «свои» специфические структурные элементы.

(а) зрительные клетки сетчатки; (б) и (в) ганглиозные клетки сетчатки ((б) *on*-нейроны, (в) *off*-нейроны); (г) клетки латерального колесчатого тела и часть клеток сетчатки; от (д) до (и) различные клетки зрительной области коры головного мозга

лыми рецептивными полями и заканчивая гиперкомплексными клетками, рецептивные поля которых обладают очень сложной структурой. На каждой следующей ступени иерархической лестницы происходит смена конфигурации раздражителя, способного воздействовать на нервные клетки; раздражители становятся все сложнее и специфичнее, т.е. постоянно повышается уровень абстракции. Можно представить себе, как наблюдаемый образ разлагается на отдельные составляющие, каждая из которых обладает определенным набором характеристик (граница между светлым и темным, контуры, движение), воспринимаемым совершенно определенными клетками зрительной коры. Пример такого разложения светлой буквы «К» на темном фоне приведен на рис. 12.8; различные формы раздражителей регистрируются соответствующими нервными клетками коры. Изображенная здесь последовательность, разумеется, условна — еще одна гипотетическая модель. Известно лишь, что главную роль в моделируемом процессе играют границы между светлыми и темными участками изображения. Распознавание определенных форм (даже при изменении их положения) обеспечивают,

прежде всего, гиперкомплексные клетки с их относительно большими рецептивными полями.

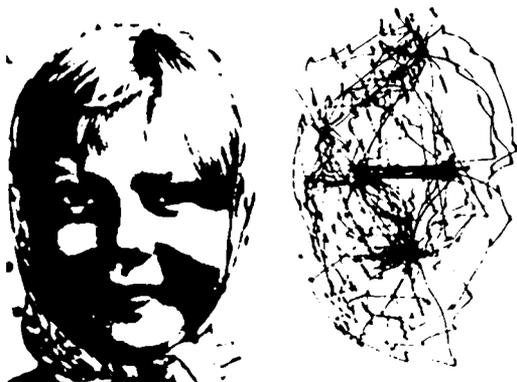


Рис. 12.9. Справа: запись движений глаз испытуемого, который несколько минут смотрел на фотографию, помещенную слева

Вообще говоря, высокоорганизованные клетки коры головного мозга лучше всего приспособлены для распознавания именно движущихся форм. Как же в таком случае нам удастся распознавать статичные образы? Все объясняется очень просто. Статичные изображения и покоящиеся предметы человек рассматривает непрерывно движущимися глазами. На рис. 12.9 справа вы видите запись движений глаз человека, которому было предложено рассмотреть портрет (помещен здесь же слева). Взгляд скачкообразно перемещается от точки к точке; даже если намеренно зафиксировать взгляд на какой-либо точке, глаза все равно будут совершать пусть совсем крошечные, но все же рывки, и остановить эти движения волевым усилием мы не в состоянии. Этот механизм обеспечивает постоянное перемещение образа на сетчатке, благодаря чему нейроны коры получают для распознавания движущийся объект.

### г) *Восприятие целого*

Настало время задать главный вопрос: каким же образом мозг воспринимает сложные изображения? Возможно, сигнал последовательно проходит все уровни иерархии от простых клеток к все более сложным, а в вершине этой пирамиды находится одна-единственная клетка, которая, в конце

концов, и распознает лицо знакомого нам человека. В соответствующей литературе такую клетку часто называют «бабушкиной клеткой». Можно также предположить, что для каждой специфической конфигурации раздражителя имеется, в конечном счете, некая особая клетка. На первый взгляд такое устройство может показаться практически нецелесообразным — известно, что ежедневно умирает довольно большое количество клеток, а это означает, что человек рискует в один прекрасный день не узнать собственную бабушку. Однако в коре головного мозга обезьян были обнаружены клетки, избирательно реагирующие на контуры лиц, причем именно описанным выше способом: проходя сквозь иерархию нервных клеток, элементарные образы организуются во все более сложные конфигурации, пока наконец не происходит распознавание. Сама по себе идея такой обработки в процессе восприятия представляется в высшей степени невероятной. Возможно, следует предположить, что эта обработка от начала и до конца осуществляется параллельно, и что каждая отдельная клетка, участвующая в процессе, занята от начала и до конца обработкой лишь какой-либо отдельной детали, но не всей картины в целом. Целостное же восприятие происходит благодаря организованному взаимодействию многих клеток. О возможном механизме такого взаимодействия мы поговорим в главе 14, посвященной осцилляции.

В пользу гипотезы о параллельной обработке зрительных данных говорят и результаты клинических исследований. Например, было установлено, что повреждение определенных зон коры головного мозга приводит к нарушению совершенно определенных функций восприятия. Наблюдались пациенты, которые после такого повреждения утрачивали способность к восприятию цвета или движения, сохранив при этом способность к восприятию формы. Еще Зигмунд Фрейд описывал пациентов, которые не могли распознать определенные объекты, так как были не в состоянии восстановить целостный образ из отдельных элементарных компонентов — такие последствия возникают только при нарушении высших зрительных функций. Стоит упомянуть и о тех пациентах, которые не способны узнавать лица, вплоть до своего собственного отражения в зеркале.

Не следует смешивать собственно восприятие с процессом распознавания. При «выходе из строя» отвечающих за восприятие корковых областей наступает истинная слепота, т. е. зрительное восприятие становится невозможным. Если же разрушены поля, ответственные за воспоминания, то больной просто не может узнать и назвать предмет, даже хорошо его видя. Такое состояние называют «душевной слепотой», или зрительной агнозией. Если повреждена область коры, анализирующая воспринятую письменную

речь, то наступает так называемая «словесная слепота» (алексия, или вербальная афазия): больной прекрасно видит написанное или напечатанное слово, но не может постичь его значения.

Обобщим описанные результаты. С анатомической точки зрения, зрительная область коры головного мозга представляет собой сложную структуру из нескольких слоев и множества колонок. Между отдельными слоями этой области и другими зонами коры возникают сложные связи, до сих пор еще до конца не изученные. В понимании процессов зрительного восприятия особую роль играют различные типы рецептивных полей нервных клеток, составляющих зрительную кору. Известно, что диапазон воспринимаемых этими полями конфигураций световых раздражителей исключительно широк, причем каждому типу поля соответствует своя особая конфигурация раздражителей. Все рецептивные поля организованы в иерархическую структуру: от простейших, круглых полей (состоящих из двух противоположных по действию концентрических зон, центральной и периферийной) к простым прямоугольным, и далее к комплексным и гиперкомплексным полям. Чем сложнее поле, тем более сложным и специфичным является световой раздражитель, вызывающий возбуждение в соответствующем нейроне. По всей видимости, поступающее в зрительную кору изображение подвергается при распознавании иерархическому анализу, т. е. разлагается на элементарные образы, которые далее и обрабатываются. Разумеется, одним только иерархическим анализом суть восприятия не объяснить. Сегодня уже никто не принимает всерьез предположение о существовании в зрительной коре отдельной «бабушкиной клетки», предназначенной исключительно для узнавания бабушкиного лица. Гораздо более перспективно выглядит гипотеза о параллельной обработке нервных импульсов, в которой участвует одновременно большое число клеток, причем распознавание образа осуществляется именно в результате взаимодействия всех типов возбужденных на данный момент нервных клеток.

### 13. Цветовое зрение

Осознать, насколько важно для нас цветовое зрение, очень легко: нужно лишь посмотреть черно-белый фильм. При отсутствии цвета происходящие на экране события существенно теряют в реалистичности, а значит, и в степени воздействия на зрителя. Вне всякого сомнения, цвета имеют большое психологическое значение. Об этом можно судить хотя бы по тому, что люди наделяют цвета символическим характером: зеленый, например, считается

цветом надежды, а красный символизирует любовь. Цвет одежды часто говорит об общественном положении ее владельца: например, священный сан кардинала обязывает его носить одежды красного цвета. Однако первоначальная причина развития цветового зрения в ходе эволюции была, конечно же, совсем иной. По всей видимости, цветовое зрение приматов (высших) обеспечило им в нелегком деле выживания значительное преимущество перед цветнослепыми животными: цветовое зрение позволяло обезьянам гораздо лучше определять контуры объектов, поскольку давало возможность различать большее количество оттенков.

Субъективное цветоощущение можно разделить на три составляющие: цветовой тон, насыщенность цвета и его яркость. Цветовой тон в значительной степени дает представление о собственно цвете. Насыщенность показывает, насколько «густ» этот цвет или насколько он разбавлен присутствием серого; яркость же определяется интенсивностью отражаемого цветной поверхностью света. Экспериментально установлено, что на основании этих трех составляющих возможно различение очень тонких оттенков цвета. Предполагается, что человеческий глаз способен различить около двухсот разных цветовых тонов, при этом каждый тон может иметь от шести до двадцати степеней насыщенности, а у каждого тона определенной насыщенности обнаруживается примерно пятьсот уровней яркости. Для оценки общего количества различаемых человеческим глазом оттенков цвета нужно перемножить эти три величины:  $200 \times 20 \times 500$ , что дает нам число порядка двух миллионов. А теперь сравните эти два миллиона различных цветов с пятьюстами — максимальным количеством оттенков, доступным обладателю черно-белого зрения.

Что же это, собственно, такое — цвет? Существуют ли цвета в реальном мире? С чисто физической точки зрения, объекты отражают лишь свет с различной длиной волны. Известно, что видимый свет — это электромагнитные волны очень малой длины (приблизительно от 400 до 700 нм,  $1 \text{ нм} = 1/1\,000\,000 \text{ мм}$ ), т. е. некий физический феномен, характеризующийся некоторой абстрактной величиной. Ощущение же цвета возникает только в нашем мозге в результате деятельности нейронов. Действительно, цветнослепые люди вовсе не обладают цветовым зрением, и для них цвета просто не существуют. Возникает вполне естественный вопрос: каким образом в нашем мозге из световых волн различной длины создается в конечном счете цветовое восприятие? Рассмотрим сначала теории, пытающиеся найти ответ на этот вопрос только на основании феноменов субъективного восприятия цвета. Каждому из нас доводилось видеть радугу: если в одно и то же время идет дождь и светит солнце, то на небе вдруг появляется цветная

дуга, в которой плавно переходят один в другой несколько цветов, начиная с фиолетового и заканчивая красным.

Откуда берутся все эти цвета? Собственно говоря, в природе существует лишь солнечный свет, воспринимаемый нашими глазами как белый. Созерцая радугу, можно предположить, что солнечный свет представляет собой смесь электромагнитных волн с различными длинами волн. Именно эту смесь, но разложенную на составляющие, мы и видим в радуге. В лабораторных условиях того же эффекта можно достичь, разложив белый свет с помощью призмы: получаемый при этом цветной спектр содержит те же цвета, что и радуга, и расположены они в том же порядке. Смешение же всех этих цветов не воспринимается нашими глазами, как сочетание отдельных составляющих, но лишь как единое целое — белый цвет. Такого рода смешение принято называть аддитивным смешением цветов. Если освещать полотняный экран одновременно светом зеленого и красного прожекторов, то от экрана отразится уже «смешанный» свет, и мы не увидим в нем ни зеленого, ни красного, а увидим вместо этого совершенно новый цвет — желтый. Смешение зеленого, синего и красного света воспринимается нашими глазами как белый свет. Аддитивное смешение цветов следует отличать от субтрактивного, которое имеет место, например, при смешивании акварельных красок. В этом случае, смешав красный с зеленым, мы получим темно-коричневый цвет. Упомянем об одном любопытном феномене цветового зрения, о котором люди в повседневной жизни едва ли задумываются — речь идет о восприятии промежуточных цветов. Некоторые цвета смешиваются друг с другом, образуя при этом промежуточный цвет, т. е. цвет, близкий к обоим исходным цветам, — например, синий и красный дают при смешивании фиолетовый, из синего и зеленого получается сине-зеленый, а желтый и красный сливаются в оранжевый. Однако не все цвета видимого спектра «способны» на такое. Красный и зеленый не дают при смешивании, вопреки ожиданиям, красно-зеленого цвета, а дают новый цвет — желтый. Не образует промежуточного цвета и сочетание желтого и синего; они словно бы подавляют друг друга.

Еще одна особенность цветового зрения — восприятие цвета только в контрасте. Мы редко осознаем это, так как нас постоянно окружает множество различных сочетаний цветов. Однако летчикам, например, упомянутый феномен хорошо знаком: если долгое время лететь в безоблачном небе, оно начинает казаться серым, а голубой цвет временно совершенно перестает восприниматься. До определенной степени восприятие цвета не зависит от освещения. Мы распознаем красный цвет как красный и при солнечном свете, и при искусственном освещении, будь то неоновые лампы или лам-

пы накаливания. Хотя некоторое отличие, надо сказать, все же существует: выбрав себе какую-нибудь одежду при неоновом освещении, мы замечаем, выйдя из магазина, что ее цвет при солнечном свете изменился.

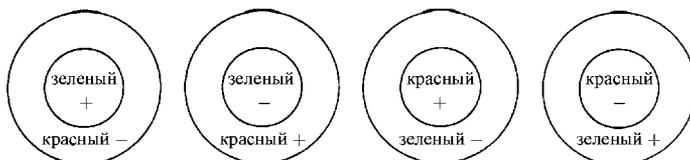
Мы познакомились с важнейшими особенностями цветового восприятия. Какими же нейронными процессами обусловлены эти особенности? В начале XIX века английский ученый Томас Юнг и позднее немецкий естествоиспытатель Герман фон Гельмгольц разработали теорию трехкомпонентного цветового зрения, которая неплохо объясняла вышеописанные феномены смешения цветов. В основу этой теории было положено предположение о том, что в сетчатке имеется три различных типа цветовоспринимающих клеток с перекрывающимися полосами спектра поглощения; при возбуждении клетки определенного типа в головном мозге возникает соответствующее цветовое ощущение. Необъясненным остался лишь тот факт, что определенные цвета (например, красный и зеленый) при смешении подавляют друг друга, и зрительного ощущения не возникает. В связи с этим немецкий физиолог Эвальд Геринг выдвинул новую теорию: так называемую теорию дополнительных цветов. Он рассмотрел три пары цветов, каждая из которых состояла из основного цвета и цвета, его дополняющего: зеленый и красный, желтый и синий, черный и белый. Зрительному ощущению зеленого цвета сопутствует торможение восприятия красного цвета, и наоборот. Геринг утверждал, что эти три пары цветов представлены в сетчатке тремя типами цветовоспринимающих соединений, причем каждое из этих соединений реагирует только на цвета «своей» пары: распадом на один цвет и синтезом на другой. При всех своих достоинствах обе эти теории, взятые по отдельности, оказываются не в состоянии дать удовлетворительное объяснение всем феноменам цветового восприятия. И вот в 1905 году немецкий физиолог Йоханнес фон Крис, ученик Гельмгольца, пришел к выводу о необходимости объединения двух теорий. В самом деле, согласно имеющимся у нас сегодня данным, верными оказываются обе теории — но на различных уровнях системы восприятия. Теория трехкомпонентного цветового зрения касается колбочек. Принцип же дополнительных цветов — ганглиозных клеток сетчатки, а также определенных клеток латерального колленчатого тела и зрительной коры головного мозга.

Поговорим сначала о роли колбочек. Сегодня точно известно, что в сетчатке имеется три типа колбочек, различающихся содержащимся в них пигментом. Каждый пигмент характеризуется своим значением максимума светового поглощения. Один поглощает свет синей области спектра, другой — зеленой, а третий — красной. Каждый тип колбочек при этом охватывает довольно широкий диапазон длин волн, которые он способен поглощать,

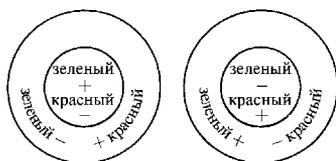
в результате чего кривые поглощения различных типов значительно перекрываются. Таким образом, когда на сетчатку падает свет какой-то определенной длины волны, различные типы колбочек реагируют на раздражение по-разному. Например, свет с длиной волны 400 нм воздействует прежде всего на те колбочки, которые содержат пигмент, восприимчивый к синему цвету; остальные колбочки демонстрируют весьма слабую реакцию на световые волны такой длины. Реакции от всех трех типов колбочек обрабатываются, по всей видимости, в совокупности, что и приводит в конечном счете к возникновению определенного цветового ощущения.

Юнг и Гельмгольц, помимо прочего, полагали, что сигналы от различных типов колбочек передаются далее в мозг параллельно. Сегодня нам известно, что слияние этих сигналов происходит уже в сетчатке, и ганглиозные клетки передают в головной мозг уже обработанную информацию. Кроме того, на разных уровнях зрительной системы имеются особые нервные клетки, рецептивные поля которых реагируют именно на цвет. На рис. 13.1 схематически изображены «простые контрастные клетки», обнаруженные в сетчатке и латеральном колленчатом теле приматов: зеленый, например, цвет возбуждает центральную зону рецептивного поля такой клетки, а красный вызывает торможение в периферийной зоне. Как показано на схеме, для каждой пары цветов (основной и дополнительный) существует по четыре различных типа рецептивных полей.

На рис. 13.2 показана реакция двух клеток на различные белые и цветные раздражители. При малом размере раздражителя клетки реагируют на разницу в яркости света, попадающего на центральную и периферийную зоны. И только когда раздражитель достаточно велик и покрывает обе зоны поля, клетка начинает реагировать именно на цвет, в соответствии с различным поглощением света различными типами колбочек. Клетка с *on*-центром для зеленого цвета реагирует на сильное раздражение красным цветом торможением, поскольку как раз торможением реагирует на красный цвет периферийная зона рецептивного поля такой клетки (рис. 13.2, слева). Если сменить раздражитель с красного на зеленый, то клетка отреагирует возбуждением. Однако реакции такой клетки не являются однозначными: на маленькую белую точку она реагирует точно так же, как на большое зеленое пятно. Различение между такими раздражителями производится только в зрительной коре головного мозга путем параллельной обработки реакций разных клеток одной зоны сетчатки. Как известно, рецептивные поля весьма значительно перекрываются, и поэтому на воздействие даже совсем крошечного светового раздражителя одновременно реагируют многие клетки. Анализ цветового содержания сигнала производится «двойными контрастными



рецептивные поля «простой контрастной клетки» для цветовой пары  
зеленый–красный



рецептивные поля «двойной контрастной клетки» для цветовой пары  
зеленый–красный

Рис. 13.1. Рецептивные поля цветочувствительных клеток. Знаком «+» обозначены зоны, реагирующие на соответствующий свет возбуждением, знаком «-» — зоны, реагирующие на соответствующий свет торможением. «Простые контрастные клетки» находятся в сетчатке и латеральном колленчатом теле, «двойные» — в первичной зрительной коре. Клетки с соответствующими рецептивными полями существуют и для цветовой пары синий–желтый

клетками», расположенными в зрительной коре; схема реакций таких клеток показана на рис. 13.1, внизу. Как центральная, так и периферийная зона рецептивных полей таких клеток реагирует сразу на оба цвета из цветовой пары «основной–дополнительный». Если центральная зона возбуждается в ответ на раздражение, например, зеленым цветом, а торможение в ней наступает как реакция на раздражитель красного цвета, то периферийная зона ведет себя противоположным образом, т. е. реагирует возбуждением на красный цвет и торможением на зеленый. С помощью двойных контрастных клеток в зрительной области коры головного мозга формируется соответствующее цветовое ощущение. Рецептивными полями вышеописанного типа очень хорошо объясняется эффект «двойного» торможения при одновременном раздражении сетчатки основным и дополнительным цветами (например, красным и зеленым). Кроме того, такая модель проясняет роль контрастных цветов в цветовом восприятии. Как мы уже отмечали, отсутствие контрастных сочетаний цветов обедняет палитру цветового вос-

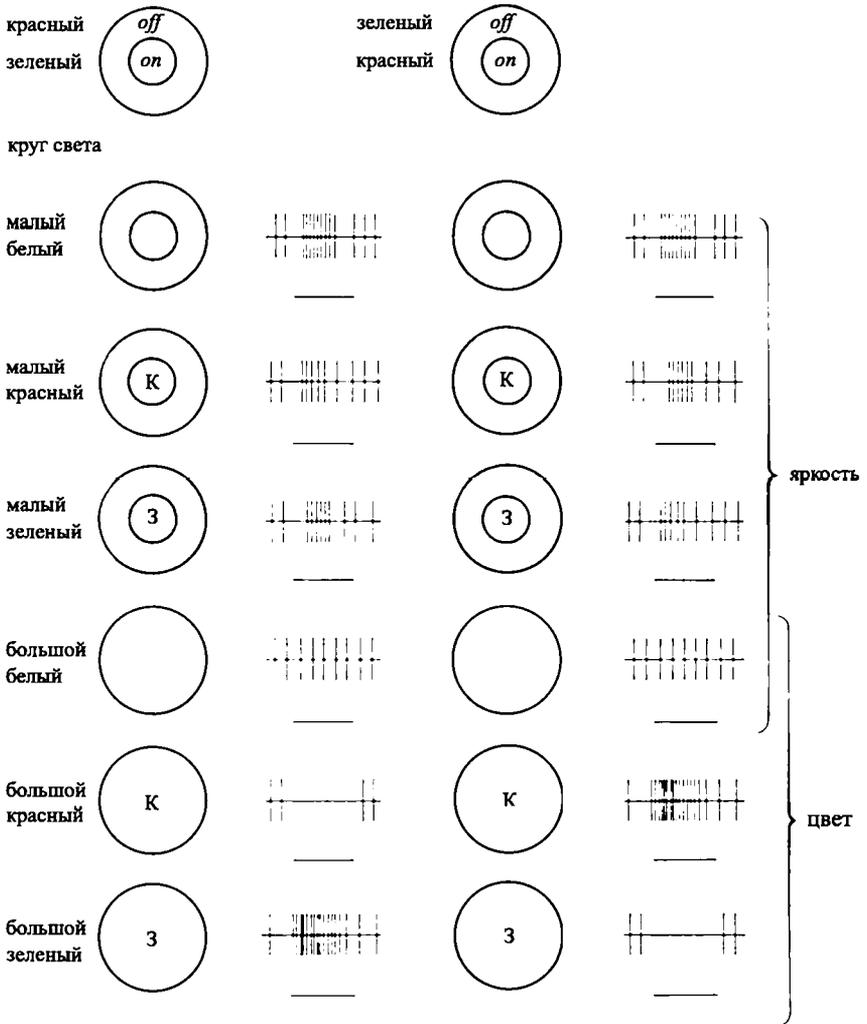


Рис. 13.2. Реакции «простой контрастной клетки» на различные раздражители. Вертикальными штрихами показаны нервные импульсы. Чем сильнее возбуждена клетка, тем гуще следуют друг за другом нервные импульсы

приятия. Цветовое ощущение во многом зависит от фона, относительно которого мы воспринимаем этот цвет. Так, например, серый цвет на зеленом фоне может показаться слегка красноватым. С помощью вышеописанных рецептивных полей можно также объяснить, почему на восприятие цвета столь малое влияние оказывает уровень освещенности: любые изменения уровня освещенности в равной степени затрагивают как центральную, так и периферийную зоны рецептивного поля, что уравнивает возможные изменения в цветовом восприятии.

Размещение цветочувствительных клеток в первичной области зрительной коры имеет свои особенности: внутри колонок, о которых мы уже говорили, наблюдаются некие клиновидные образования. Первооткрыватели этих структур, Дэвид Хьюбел и Маргарет Ливингстон, назвали их «каплями» (англ. *blobs*). Кроме того, цветочувствительные клетки часто совершенно не чувствительны к ориентации раздражителя в пространстве.

Из первичной области зрительной коры информация о цвете передается дальше, в более высокое зрительное поле (поле 18, часть V2), а оттуда уже в поле V4, где и происходит окончательная обработка полученных данных. Установлено, что у пациентов, имеющих повреждения этой зоны коры, цветовое восприятие затруднено, хотя эти же пациенты легко справляются с опознанием форм. Напрашивается предположение, что анализ цвета видимых объектов производится независимо от анализа их формы. В пользу этого предположения говорит и следующий факт. Ливингстон и Хьюбел обнаружили, что определенные компоненты нервной системы, отвечающие за восприятие цвета, передают свою информацию параллельно и независимо от информации о форме.

На этом описание основных особенностей цветового зрения позвольте считать, в общих чертах, законченным. В следующей главе мы рассмотрим восприятие формы и образа в целом.

## 14. Когерентность в мозге

С термином «когерентность» мы в этой книге уже встречались — хотя и безотносительно к мозгу — во второй главе при рассмотрении лазера. Лазерный источник света испускает именно когерентный свет, и происходит это благодаря тому, что колебания электронов отдельных атомов рабочего вещества лазера полностью совпадают по фазе. Однако какое же отношение все это может иметь к мозгу? В предыдущих главах мы почти вплотную подошли к убеждению, что какое бы то ни было восприятие возможно толь-

ко благодаря взаимодействию многих — а то и очень многих — нейронов мозга. Для того чтобы понять механизмы взаимодействия нейронов, необходимо изучить их свойства — например, произвести *одновременные* замеры их электрических потенциалов. Американский психолог Уолтер Фримен, проводя электрические измерения на обонятельных луковицах подопытных крыс, обнаружил, что в них целые группы нейронов демонстрируют совершенно единообразное поведение, т. е. являются, в некотором роде, когерентными. Что же может означать это одинаковое поведение, и как это связано со внешним раздражением?

Значительный вклад в отыскание ответов на эти вопросы удалось внести команде исследователей из Франкфурта (Вольф Зингер, К. М. Грей и др.), изучавшей группы нейронов зрительной области коры головного мозга кошки, а точнее — нейроны, расположенные в поле 17. Как нам уже известно, падающая на сетчатку полоса света возбуждает определенные нейроны, находящиеся в зрительной коре головного мозга; эти нейроны генерируют затем собственные нервные импульсы, причем отдельные нейроны избирательно реагируют на определенным образом ориентированные и в определенном направлении движущиеся световые полосы. Зингер и его сотрудники проводили замеры двумя разными способами одновременно: во-первых, с помощью электрода был измерен электрический потенциал одной группы нейронов, а кроме того, была получена картина совокупного изменения потенциалов многих нейронов, находящихся в определенной области коры. При сопоставлении результатов было сделано потрясающее открытие: обе кривые превосходно коррелировали друг с другом (см. рис. 14.1, горизонтальная ось отражает течение времени). В верхней части рисунка представлены совокупные колебания электрических потенциалов очень многих нейронов; выражаясь научным языком, локальный потенциал поля. Кривая демонстрирует довольно равномерные колебания потенциала, как в отношении амплитуды, так и в отношении периода колебаний. В нижней части рисунка, с соблюдением того же временного масштаба, помещена кривая, описывающая соответствующую последовательность нервных импульсов отдельной группы нейронов. Видно, что обе кривые хорошо коррелируют и имеют достаточно равномерные интервалы между минимумами. Интересно, что нервные импульсы возникают всякий раз именно тогда, когда электрический потенциал поля минимален. Полученные в ходе эксперимента данные являются очевидным свидетельством существования весьма сильной корреляции между деятельностью отдельных нейронов в группе и электрическим потенциалом поля очень большой совокупности нейронов. Отсюда можно сделать вывод, что строго коррелированными яв-

ляются нервные импульсы очень большого количества нейронов коры (а не только тех, что «принимали участие» в эксперименте), т. е. нейроны производят совершенно равномерные когерентные колебания, аналогичные тем, что мы наблюдаем в атомах лазера.

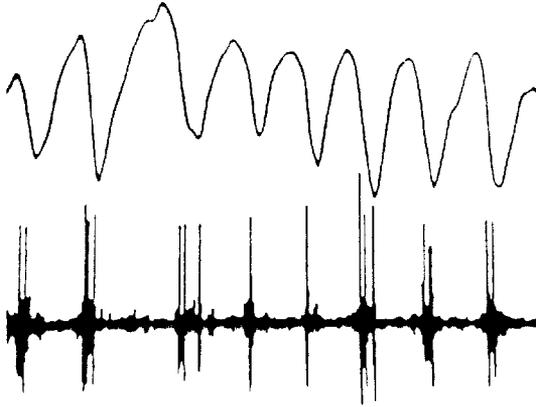


Рис. 14.1. Результаты электрических измерений группы нейронов. Горизонтальная ось отражает течение времени. Верхняя кривая — локальный потенциал поля; нижняя — последовательность нервных импульсов отдельной группы нейронов. Расстояния между минимумами верхней кривой или группами импульсов нижней кривой соответствуют временным интервалам порядка 20 мс. Обратите внимание на совпадение во времени групп нервных импульсов и минимумов локального потенциала поля

Зингер и Грей расширили эксперимент и исследовали электрическое поведение двух групп нейронов, причем расстояние между этими группами могло составлять многие миллиметры. Сначала были идентифицированы группы нейронов, реагирующих на одинаковую ориентацию световых полос в пространстве и их параллельное или антипараллельное движение. Ученые установили, что коррелированная генерация сигналов обеими группами нейронов оказывалось наиболее ярко выраженным тогда, когда соответствующая световая полоса пересекала рецептивные поля обеих групп. Похожие эксперименты были проведены в Марбурге Р. Экхорном и Гербертом Райтбёком. В ходе этих экспериментов было обнаружено, что выраженную корреляцию демонстрируют даже группы нейронов, расположенные в разных полях (например, в 17 и 18), соответственно генерируя синхронные нервные импульсы.

Одинаковая отличительная особенность воспринимаемого изображения — в данном случае, ориентация или направление движения световой полосы — может вызвать когерентную генерацию нервных импульсов даже у весьма отдаленных одна от другой групп нейронов. Это обстоятельство позволяет сделать одно интересное обобщение, которое уже было потребовано ранее Зингером и другими, а именно — генерируя связанные нервные импульсы, мозг способен соединять друг с другом отдельные детали воспринимаемого изображения, тем или иным образом связанные между собой (такие, например, как одинаковые оттенки цвета). Возможно, именно таков механизм воссоздания в сознании целостного изображения. Фрэнсис Крик и Кристоф Кох пошли еще дальше: они предположили, что основываясь на этом механизме связывания, можно объяснить и общие принципы функционирования сознания. Хотя это предположение представляется нам на данном этапе слишком смелым, оно все же дает пищу для дальнейших размышлений.

Мы же в своих умозаключениях пока не заходим столь далеко и предпочитаем придерживаться экспериментальных свидетельств, на основании которых можно утверждать, что одинаковые движения светового раздражителя идентифицируются системой нейронов как взаимосвязанные. Отсюда недалеко до вывода о том, что данный механизм предназначен для идентификации движущихся объектов, при которой одинаково движущиеся элементы воспринимаются как части одного целого. В результате мозгу легко удастся отличать друг от друга движущиеся объекты. Как показывают проведенные на синергетическом компьютере исследования, о которых рассказывается в следующей части, для объяснения процесса распознавания образов одного лишь механизма связанных колебаний недостаточно, да в них, собственно говоря, и нет необходимости. Значимым этот механизм оказывается лишь при идентификации различных движущихся объектов.

В любом случае, открытия, сделанные в ходе исследований зрительной области коры головного мозга кошки, открыли новую страницу в изучении мозга. Далее должны последовать аналогичные эксперименты с мозгом высших приматов — значительно более близких родственников человека, нежели кошки — и у нас есть основания полагать, что результаты этих экспериментов дадут этим открытиям необходимые и весьма ожидаемые подтверждения.

## ЧАСТЬ III

# Самоорганизация восприятия

### 15. Что происходит после гиперкомплексных клеток?

Открытие гиперкомплексных клеток осветило путь к окончательной разгадке тайн мозга. Оставалось лишь отыскать в высших слоях мозга клетки, реагирующие на еще более сложные объекты. Однако систематические поиски таких клеток до сих пор не дали никаких результатов. Несмотря на то, что воодушевляют, правда, появляющиеся время от времени в специальной литературе сообщения о том, что в мозге высших приматов и овец обнаружены клетки, избирательно реагирующие на демонстрацию животному человеческого лица. Однозначных подтверждений этому, однако, нет. Поскольку в упомянутых экспериментах измеряется потенциал лишь *одного* нейрона, оказывается невозможным со всей определенностью утверждать, идет ли речь о деятельности одного отдельного нейрона или же целой группы нейронов, которой исследуемый нейрон принадлежит.

Такая неопределенность лишь укрепляет наше убеждение в том, что распознавание объектов все же не является результатом деятельности одного изолированного нейрона; скорее, это продукт работы всей нейронной сети. Правда, принять это представление на веру нелегко: над нами слишком довлеет идея о том, что психическая деятельность непременно должна быть связана с каким-то определенным местом в мозге, и возможно даже с какими-то определенными нейронами. То есть нам — так или иначе — придется во всех подробностях изучить свойства нервной сети и происходящие в ней процессы.

При этом исключительно полезно обратиться к физике — пусть и сильно упрощенной. Было время, когда физики полагали, что для того чтобы понять, как устроен мир, нужно лишь разобраться в устройстве и свойствах мельчайших его частиц — атомов. Сегодня нам ясно, что надеждам этим вряд ли суждено сбыться. Именно в тех ситуациях, когда макроскопические явления являются результатом взаимодействия многих отдельных элементов какого-то целого, возникает нужда в совершенно новом мировоззрении — иначе не преодолеть пропасти между микроскопическими процессами и макроскопическими феноменами.

Известный пример такой ситуации — сверхпроводимость. Стоит охладить определенный металл до определенной температуры, как он вдруг совершенно теряет свое электрическое сопротивление: в кольце, сделанном из такого металла, годами может течь электрический ток, ни в малейшей степени не ослабевая. Вскоре после открытия сверхпроводимости Фрицу Лондону удалось установить феноменологические законы, в соответствии с которыми из сверхпроводника вытесняется магнитное поле. А что же микроскопическая теория? Разработка такой теории оказалась не по зубам таким корифеям науки, как Вернер Гейзенберг и Эрвин Шрёдингер, создатели квантовой теории, или Генрих Велькер, открывший соединения группы  $A^3B^5$ , без которых немислимы современные полупроводниковые технологии. И только Герберту Фрëлиху пришла в голову блестящая идея, на которой, по сути, и основывается сверхпроводимость. Суть этой идеи в том, что электроны — носители электрического тока — определенным образом взаимодействуют с колебаниями атомов кристаллической решетки проводника. Дальнейшим развитием наиболее распространенная микроскопическая теория обязана работам Джона Бардина, Леона Купера и Роберта Шриффера. Однако и новая БКШ-теория не смогла уничтожить пропасть между «микроскопическим» и «макроскопическим»; в этом не осталось никаких сомнений, когда Йоханнес Георг Беднорц и Алекс Мюллер совершили сенсационный прорыв, установив возможность существования сверхпроводимости при высоких температурах. БКШ-теория оказалась не в состоянии предсказать ни того, какие металлы или соединения могут при таких условиях обладать сверхпроводимостью, ни даже того, насколько велики будут значения температуры перехода в сверхпроводящее состояние.

Однако недооценивать эту теорию все же не следует. Она не только установила связь между совершенно, казалось бы, различными явлениями, но и первой дала верную качественную картину этих явлений. При этом новый смысл приобрели понятия, до сих пор не имевшие никакого отношения к электронам («когерентность», «макроскопические волновые функции» и т. п.). Иными словами, потребность в новых понятиях возникает при переходе наблюдателя с микроскопического уровня на макроскопический. По нашему глубокому убеждению, все это имеет прямое отношение и к переходу от нейронов к нейронной сети. Для этого, собственно, мы и предприняли наш краткий экскурс в физику. Концепции, применимые к описанию перехода от поведения частей к поведению целого в самоорганизующихся системах, образуют не что иное, как фундамент синергетики, к которой мы вскоре вновь вернемся. Поскольку редукционизм, т. е. сведение макроскопического к микроскопическому, играет в современных биологических ис-

следованиях весьма заметную роль, давайте рассмотрим связанную с этим обстоятельством проблематику еще и с другой точки зрения. Одним из представителей строгого редукционизма является Фрэнсис Крик, который вместе с Джеймсом Д. Уотсоном установил, каким образом сохраняется наследственная информация в структуре молекулы ДНК, внося тем самым невообразимо важный и чрезвычайно огромный вклад в развитие молекулярной биологии. Согласно Крику и Уотсону, путь к полному и окончательному пониманию биологических процессов лежит через объяснение структур соответствующих биологических молекул, причем в каждом конкретном случае за результат определенной деятельности биологической системы отвечает какая-то совершенно определенная молекула. Мы не разделяем категоричности редукционистов. Рассмотрим простой пример. Представьте себе дом. Сможем ли мы разобраться в его конструкции и предназначении, постигнув сущность кирпичей, из которых он построен? Разумеется, определенные свойства кирпичей (форма, прочность, теплопроводность и т. д.) имеют определенную важность для конструкции в целом. Однако дом может возникнуть только в результате определенного размещения этих самых кирпичей. Кроме того, дом можно построить и из дерева, бетона, глины или даже — по методу эскимосов — изо льда. Все эти материалы, определенным образом обработанные и размещенные могут стать элементами («кирпичами») здания, которое будет выполнять некие определенные и мало зависящие от материала функции. То есть существенные свойства дома могут быть постигнуты вне зависимости от материала, из которого он построен. Думается, то же можно отнести и к постижению природы мозга. Ряд его функций можно реализовать с помощью других, отличных от нейронов, элементов — например, микросхем компьютера. Однако проводимую в настоящей книге аналогию с компьютером следует понимать шире. Сам по себе компьютер служит нам лишь как вспомогательное средство, применяемое для моделирования процессов, протекающих в самоорганизующихся системах. Точнее говоря, в качестве самоорганизующейся системы мы рассматриваем мозг, учитывая при этом, что процессы самоорганизации — как нам известно из синергетики — могут протекать на самых различных субстратах.

## 16. Синергетика и распознавание образов

В начальных главах книги мы познакомились с явлениями, демонстрирующими поведение различных систем в живой и неживой природе (глава 2 — движение жидкости, 5 — восприятие образов). Возникает вполне

естественный вопрос: является ли аналогия между этими явлениями всегонавсего поверхностным сходством или же перед нами результат действия каких-то глубинных, основополагающих принципов? Иными словами, можем ли мы применить известные нам из синергетики принципы (включая и необходимые математические методы) к созданию модели мозга, способной к воспроизведению результатов деятельности живого мозга, связанных с восприятием? Поиск ответов на эти вопросы мы и намерены заняться в дальнейшем.

Что же это, в сущности, такое — распознавание? Чтобы разобраться в этом, обратимся к понятию так называемой *ассоциативной памяти*, впервые математически описанной Карлом Штайнбухом. В качестве примера воспользуемся телефонным справочником. Допустим, мы хотим узнать номер телефона известного нам человека по имени Алекс Мюллер; мы находим в справочнике это имя и напротив него видим искомый номер телефона — т. е. справочник дополняет известные нам данные (имя) ранее неизвестными (номер телефона). Нечто подобное происходит и при узнавании нами людей: когда мы видим фрагмент лица некоего человека, наш мозг, обращаясь к ассоциативной памяти, «дополняет» недостающие детали, и если человек нам знаком, называет еще и его имя, или, по крайней мере, подтверждает, что с этим человеком мы уже когда-то встречались. Под ассоциативной памятью, таким образом, понимается дополнение неполного набора данных недостающими деталями.

Второй важный момент, позаимствованный нами из синергетики и перенесенный в область восприятия, — это идея параметра порядка, поведение которого можно описать с помощью модели движения мяча по холмистой местности. Пример связи распознавания образов с динамикой параметра порядка представлен на рис. 16.1. В правой части рисунка помещена одна из уже знакомых нам «двойных» картинок — она воспринимается то как белая ваза на черном фоне, то как два черных профиля на белом фоне. Слева на рисунке изображен холмистый ландшафт, соответствующий такому двойному восприятию. Если мяч оказывается в левой долине, то это означает, что произошло «распознавание вазы», если же в правой — «распознавание лиц». Любое другое расположение мяча должно означать либо незавершенный процесс распознавания, либо отсутствие такового вообще. Так, при первом взгляде на «двойную» картинку мы еще не видим ни вазы, ни лиц — этому состоянию соответствует положение мяча на «вершине холма». Небольшое начальное воздействие или некоторая дополнительная информация (например, фраза «Назовите предмет, изображенный на черном фоне») оказываются решающими, т. е. определяют направление, в котором

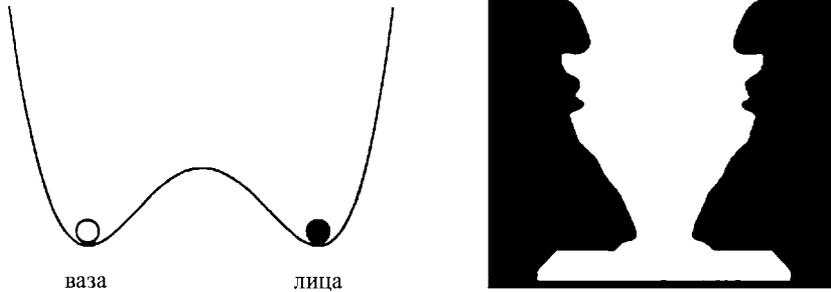


Рис. 16.1. Распознавание образов и динамика параметра порядка. Рисунок, помещенный справа, уже встречался нам в этой книге (рис. 5.11). Человеку, впервые увидевшему этот рисунок, его содержание может показаться не совсем ясным. Если же такому человеку дать конкретное указание: «Рассмотрите, пожалуйста, эту картинку и назовите предмет, изображенный на черном фоне», то он очень быстро распознает в загадочном предмете вазу. Если же спросить его, что изображено на белом фоне, то он без труда распознает два лица, нарисованные в профиль. Такую бистабильность восприятия одного и того же изображения можно описать с помощью движения мяча по холмистой местности (рисунок слева). Устойчивые положения мяча соответствуют интерпретациям изображения «ваза» или «лица». Горизонтальная координата ( $q$ ) снова выступает в роли параметра порядка. Начальная информация определяет положение мяча справа или слева от «вершины», после чего, по мере рассматривания картинки, мяч окончательно скатывается в одну из «долин» — это означает, что восприятие успешно завершено

покатится мяч, и, в итоге, конечное его положение, а значит, и конечное состояние («ваза» или «лица») системы восприятия у нас в мозге. В дальнейшем мы увидим, что именно так и происходит различение разных объектов. Механизмы, действующие при распознавании двойственных изображений, мы еще будем обсуждать ниже, в главе 26. Пока же для наших целей вполне достаточно принять к сведению тот факт, что движением мяча по холмистой местности можно символически описать действительный процесс распознавания образов. Эта идея высказывалась нами (Г. Х.) еще в начале 70-х годов и нашла свое отражение в вышедшей в 1977 году книге «Синергетика»<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>H. Haken. *Synergetik. Eine Einführung*. Springer, Berlin/Heidelberg, 1977.

Эта же идея лежит в основе разработанной Джоном Хопфилдом в 1981 году концепции нейрокомпьютера (об этом мы поговорим в главе 31).

И, наконец, наше важнейшее положение заключается в том, что *распознавание образа* есть не что иное, как *создание образа*. На первый взгляд, это может показаться парадоксальным, однако по некотором размышлении между двумя упомянутыми процессами обнаруживается фундаментальная аналогия.

Для начала рассмотрим процесс создания образа, с которым мы уже имели возможность познакомиться ближе в главе 2, посвященной изложению основных принципов синергетики. В качестве конкретного примера возьмем процесс возникновения ячеистой структуры в жидкости (рис. 2.13, левый столбец). Сначала в упорядоченном состоянии находится лишь часть жидкости. Это состояние порождает соответствующий параметр порядка, который в дальнейшем подчиняет себе все остальные возможные параметры порядка и приводит все частицы в данном объеме жидкости в соответствующим образом организованное состояние. Этот процесс еще раз представлен на рис. 16.2, слева. Что же происходит при распознавании образа? Допустим, сначала мы видим только один фрагмент лица, который и узнаем по каким-то отличительным особенностям (например, по форме носа). Теперь представим себе, что в нашем мозге — или в сконструированном по его подобию компьютере — эти уже опознанные черты порождают некий параметр порядка. Этот параметр порядка подчиняет себе другие возможные параметры порядка, соответствующие каким-то другим имеющимся в памяти лицам, в результате чего увиденный нами фрагмент однозначно сопоставляется с образом, соответствующим именно этому параметру порядка, и мы узнаем лицо знакомого нам человека.

Конечно, можно возразить, что создание ячеистой структуры в жидкости во много раз проще, нежели создание образа лица или каких-то других, еще более сложных картин. В этом и заключается суть сделанного нами поразительного открытия: процесс воссоздания образа абсолютно не зависит от сложности этого образа. Иными словами, можно разработать систему (в чисто математической форме для начала), которая позволит реконструировать любой заданный образец исходя из каких-либо данных о его фрагменте.

## **17. Распознавание образов в синергетическом компьютере**

Как это принято в нашей книге, мы не будем останавливаться на абстрактных принципах и излагать их на языке математики, а просто пока-

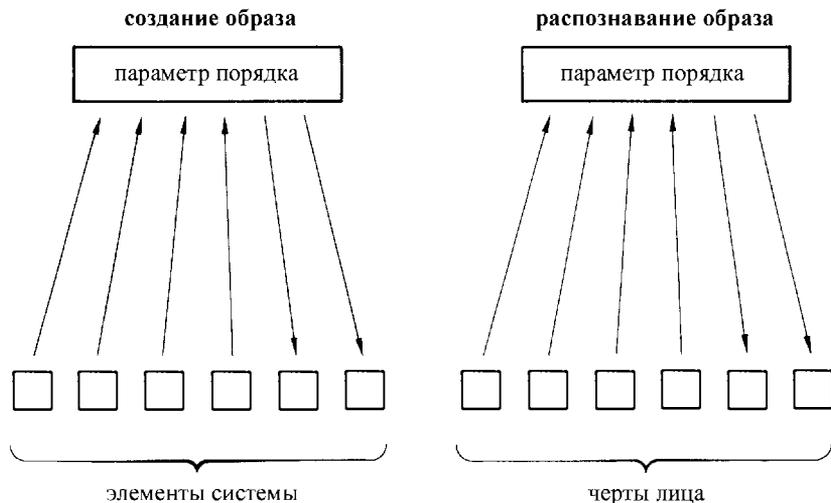
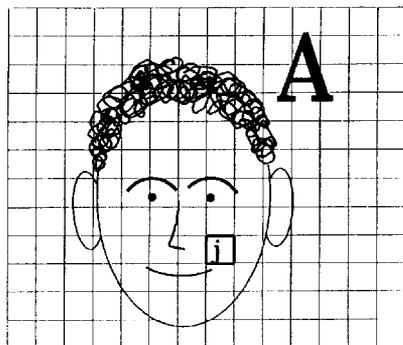


Рис. 16.2. Аналогия между созданием образа и распознаванием образа. Слева — создание параметра порядка на основе элементов системы, находящихся в некотором упорядоченном состоянии (например, цилиндрических ячеек в жидкости, рис. 2.13), и последующее подчинение этому параметру порядка остальных элементов системы. Справа — распознавание образа (человеческого лица): создание параметра порядка на основе отдельных элементов (запомненных черт лица), и последующее подчинение этому параметру порядка остальных элементов распознаваемого изображения

жем, как эти принципы могут быть воплощены в жизнь и как при этом вновь и вновь возникает необходимость в привлечении синергетических концепций. Сначала опишем, какими видятся наши действия наблюдателю у экрана компьютерного монитора, а затем попытаемся проникнуть в задействованный «механизм» несколько глубже. Вскоре мы увидим, что слово «механизм» в данном случае можно использовать лишь условно, потому что хотя и мышление, и работа синергетического компьютера действительно представляют собой некие процессы, они все же очень отличаются от тех процессов, что происходят в обычных машинах, являясь, в сущности, типичными процессами самоорганизации. Более подробно мы поговорим об этом в последующих главах.

Итак, каковы же наши действия? Сначала делаются фотографические снимки нескольких лиц. Для идентификации этих лиц каждая фотография

Рис. 17.1. Наложение на прототип растровой сетки. Фотография разделяется на клетки, называемые пикселями; в каждом пикселе определяется значение уровня серого



помечается латинской буквой, выступающей в роли кодового обозначения. Разумеется, для кодовых обозначений можно взять и любые другие символы — например цифры. Затем на каждую фотографию накладывается растровая сетка, состоящая обычно из 60 строк и 60 столбцов (рис. 17.1) — в некоторых случаях, впрочем, эти значения могут быть и больше. Каждая ячейка этой сетки — так называемый пиксель — характеризуется определенным оттенком серого. Общая картина складывается, таким образом, из упорядоченного размещения всех этих пикселей, каждому из которых присвоено определенное значение, обозначающее соответствующий оттенок серого. Сама собой напрашивается аналогия с сетчаткой (для сравнения см. главу 10). Отдельные клетки сетчатки улавливают свет определенной интенсивности. Состояние сетчатки в каждый момент времени описывается, следовательно, распределением световых точек различной интенсивности по всем фоторецепторным клеткам. Распределения значений оттенков серого, соответствующее разным лицам (рис. 17.2), определенным образом сохраняются в памяти компьютера. Сущность синергетического компьютера как раз и заключается в том, каким именно образом происходит сохранение этих данных и дальнейшее их использование для распознавания образов.

Опишем сначала задачу, поставленную перед компьютером. По предъявленному ему фрагменту одной из фотографий (например, фрагменту с глазами и носом), компьютеру предстоит не только успешно реконструировать все лицо, но и определить кодовую букву, которой обозначена фамилия изображенного на фотографии человека. Только при выполнении обоих требований лицо на фотографии может считаться опознанным. Такая задача оказывается компьютеру вполне по силам, о чем и свидетельствует ряд изображений на рис. 17.3 — последовательные этапы обработки компьюте-

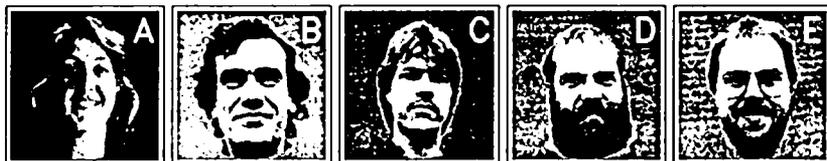


Рис. 17.2. Примеры использованных нами в качестве прототипов лиц. Буквы служат для идентификации образов и в то же время выступают в роли кодового обозначения изображений

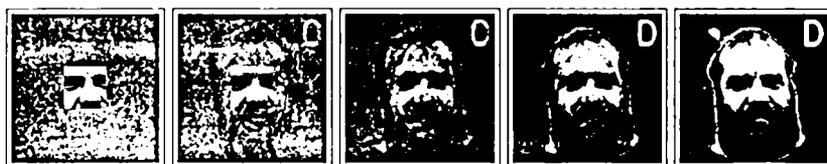


Рис. 17.3. Если синергетическому компьютеру предъявить фрагмент изображения лица (как на крайней левой картинке), то компьютер сможет воссоздать само лицо целиком и установить его кодовое обозначение. Изображения представляют собой снимки с монитора компьютера и иллюстрируют ход процесса распознавания. Интересно отметить, что на определенной стадии распознавания изображение лица выглядит «размытым»



Рис. 17.4. Если синергетическому компьютеру предъявлена только буква, служащая кодовым обозначением одного из сохраненных образов, то компьютеру удастся воссоздать соответствующее лицо. При этом процесс распознавания, как и в предыдущем случае, проходит через стадию «размытости»

ром полученных данных. Изображения на рис. 17.4 отражают ход другого процесса: на этот раз компьютеру было предложено реконструировать лицо по известному — в данном случае буквенному — коду. Компьютер успешно справился с этой задачей. Изображения, представленные на рис. 17.3

и 17.4, сняты с монитора компьютера; по этим изображениям, представленным в виде временных рядов, можно проследить ход всего эксперимента. Изображения эти «обсчитаны» нами на обыкновенном, последовательном, компьютере, который, впрочем, способен лишь моделировать то, что происходит при распознавании образов в синергетическом смысле. На таком компьютере можно просчитать и неоднократно упоминавшиеся в этой книге процессы образования ячеек в нагреваемой снизу жидкости (рис. 2.13), несмотря на то, что нам известно, что все ячейки образуются одновременно в результате самоорганизации. То же относится и к процессу распознавания образов: принцип параллельной одновременной обработки всех точек изображения помогает нам лучше понять концепцию, лежащую в основе синергетического компьютера. Упомянутое параллельное — т. е. одновременное во всех точках изображения (или пикселях) — изменение оттенка серого отчетливо видно на рис. 17.3. Как же происходит такая обработка?

## **18. Сетевая архитектура синергетического компьютера — шаг к мозгу**

Чтобы лучше понять, как все вышесказанное соотносится с деятельностью мозга, представим себе путь, по которому следуют нервные импульсы из сетчатки в кору головного мозга, где они обрабатываются и дают в конце концов осознанное зрительное впечатление. В нашей компьютерной модели это происходит следующим образом. Каждому пикселю воспринимаемого изображения ставится в соответствие «модельный» нейрон (рис. 18.1), составляющий в совокупности с другими нейронами некий плоский слой. Каждый отдельный нейрон нашей модели характеризуется собственным уровнем возбуждения, собственной активностью, изменяющейся в зависимости от изменения оттенка серого, — аналогичным образом свет различной интенсивности воздействует на зрительные клетки сетчатки. Нейроны мозга — как нам уже известно — соединены друг с другом синапсами; в нашей модели нейроны также соединены друг с другом, причем каждый модельный нейрон напрямую связан со всеми остальными модельными нейронами (рис. 18.2) и способен посылать им сигналы, сила которых соответствует его собственному уровню возбуждения. Получаемые сигналы нейроны модели умножают и складывают, изменяя тем самым свою собственную активность. Со временем в результате такой деятельности модельных нейронов из «входного образа» (рис. 17.3, слева) возникает «выходной образ» (рис. 17.3, справа). Секрет успешной работы такой системы заключается

в том, что силы связей между модельными нейронами, т. е. синаптические силы, устанавливаются на основе сохранных прототипов так, что оказывается возможным получить окончательный образ из любого исходного, причем полученный окончательный образ будет максимально похож на оригинал.

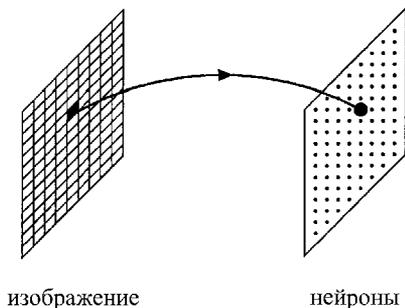


Рис. 18.1. Каждая ячейка изображения соответствует одному модельному нейрону

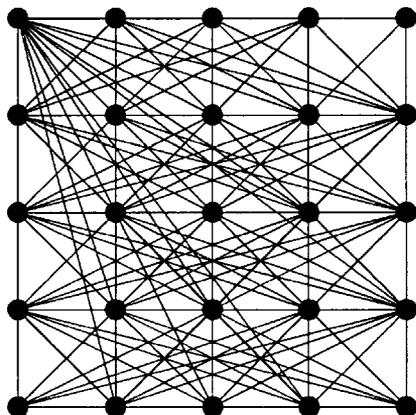


Рис. 18.2. Связи между модельными нейронами. Каждый нейрон определенным образом связан со всеми остальными

## 19. Холмистые ландшафты процесса восприятия

Как же взаимосвязаны описанные выше явления с синергетическими концепциями? Подобно тому как изменяется скорость и направление движения частиц жидкости при нагревании ее снизу, изменяется электрическая активность каждой нервной клетки в нейронной сети. Совокупное движение всех частиц жидкости — или совокупный электрический потенциал всех нейронов мозга — обозначим как общее состояние системы на данный момент времени. Это состояние удобно символически описать через положение мяча на холмистой местности. На рис. 19.1 изображена модель такой местности для случая взаимодействия всего лишь двух нейронов, каждый из которых характеризуется некоторым уровнем собственной активности. На этой местности имеются особые долины, соответствующие сохранным

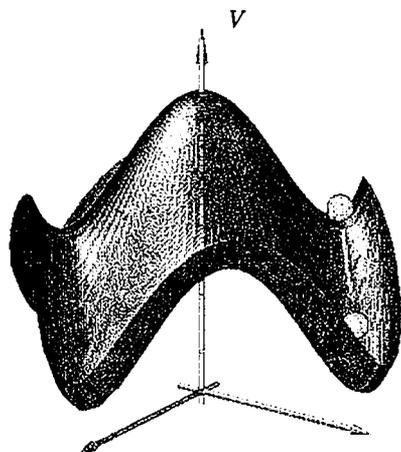


Рис. 19.1. Холмистый ландшафт для случая всего лишь двух отличительных признаков и двух прототипов. Прототипам соответствуют долины. Если признаки предположенного образа не в точности совпадают с признаками прототипов, то такому образу соответствует положение мяча вне обих долин. При этом мяч скатывается по склону в ближайшую долину. См. также рис. 19.2–19.4

в памяти образам. Одна из этих долин соответствует распределению интенсивностей света с рис. 19.2, а другая — распределению интенсивностей, показанному на рис. 19.3.

В случае, если наблюдаемое распределение интенсивностей отлично и от первого запомненного образа (рис. 19.2), и от второго (рис. 19.3) — а представляет собой нечто вроде того, что изображено на рис. 19.4, — возникает вполне объяснимая неопределенность. К какому же из эталонных образов новое распределение окажется ближе? Ответ на этот вопрос дает динамика движения мяча по ландшафту, изображенному на рис. 19.1. Где-то на этом ландшафте имеется точка, соответствующая распределению с рис. 19.4. Оказавшись в этой точке, мяч, естественно, будет стремиться попасть в ближайшую к ней точку минимума. Из состояния, соответствующего распределению с рис. 19.4, система перейдет (следуя движению мяча) в состояние, соответствующее распределению с рис. 19.2, и следовательно, эти распределения (рис. 19.2 и 19.4) будут идентифицированы как наиболее похожие. Можно также сказать, что в результате такого распознавания «ошибочная» картинка (рис. 19.4) с «неверным» тоном серого заменяется



Рис. 19.2. Один из прототипов: образ, содержащий только два отличительных признака (слева — черная область, справа — некоторый оттенок серого)



Рис. 19.3. Другой прототип



Рис. 19.4. Оттенок серого в предложенном образе может отличаться от оттенка сохраненного прототипа — так, например, правый квадрат данного рисунка темнее, чем правый квадрат на рис. 19.2, но светлее, чем на рис. 19.3. Синергетический компьютер может установить, на какой из двух сохраненных прототипов предложенный образ похож больше, и «исправить» этот образ в соответствии с рис. 19.2

в восприятии компьютера на «правильную» картинку, оттенок серого на которой одинаков с запомненным.

Этот очень простой пример, в котором задействованы всего два модельных нейрона, может дать читателю вполне адекватное представление о том, как можно интерпретировать процесс распознавания образа по изображе-

нию, состоящему из очень большого количества пикселей, сетью, состоящей и соответствующего количества модельных нейронов. Каждый пиксель или модельный нейрон в нашей модели можно представить в виде координатной оси в пространстве, количество измерений которого равно количеству пикселей (или нейронов). Это многомерное пространство нам вряд ли удастся вообразить, однако математическими средствами такое вполне осуществимо. В полученном многомерном пространстве также имеется уже знакомая нам холмистая местность, по которой в поисках близлежащей «долины распознанного образа» катается «мяч состояния».

Читатель, возможно, уже догадался, что секрет синергетического компьютера заключается в правильном построении «холмов» потенциального барьера. Для такого построения нам потребуются знание определенных величин, о которых мы, впрочем, уже слышаны. Направления, по которым в модельном пространстве располагаются долины, определяются с помощью так называемой матрицы обучения, причем такая матрица строится определенным образом из начальных запомненных образов (в описанном случае это образы распределения интенсивности). Каждая долина обладает определенной глубиной, которая определяется, в основном, через так называемый параметр внимания. В дальнейшем будет представлен способ определения этого параметра непосредственно из экспериментов по восприятию двойственных изображений. Между долинами должны располагаться цепи холмов, предназначение которых состоит в том, чтобы направлять мяч состояния системы в нужную долину (т. е. сопоставлять предложенному образу наиболее близкий к нему из запомненных). Поэтому цепи холмов строятся в соответствии с имеющимися начальными запомненными образами. И наконец, следует позаботиться и о том, чтобы возбуждение отдельного нейрона (модельного) не могло расти бесконечно.

Поскольку при движении по координатной оси в направлении от начала координат возбуждение постоянно и неизбежно растет (рис. 19.5), необходимо воздвигнуть «снаружи» достаточно высокий потенциальный барьер, который обеспечивал бы возвращения мяча в долины. Разумеется, все перечисленные «строительные требования» можно выразить математически. Заинтересовавшегося читателя мы отсылаем к списку специальной литературы (с. 255 и далее). Менее же заинтересованный в математическом обосновании читатель уже, надеемся, получил некоторое представление о том, как строится холмистая местность нашей модели.

Интересно, что из конструкции холмистой местности непосредственно следуют величины сил синаптических связей между модельными нейронами; иными словами, величины синаптических сил можно предсказать,

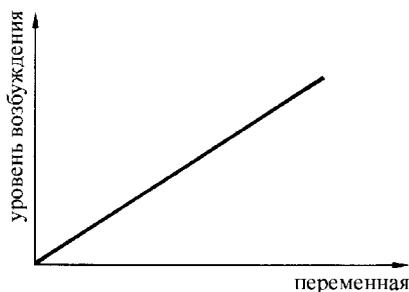


Рис. 19.5. Уровень возбуждения отдельной клетки прямо пропорционален некоторой переменной

основываясь на известных «строительных требованиях». В этом и заключается главное и очень большое преимущество синергетического компьютера перед всеми до сих пор известными моделями нейронных сетей. Об остальных отличиях мы непременно поговорим позднее, когда будем рассматривать другие нейронные сети. Можно легко представить, насколько громоздким оказалось бы математическое представление движения мяча по потенциальным холмам в многомерном пространстве (порядка 10 000 измерений), и нам никогда бы не удалось получить надежных результатов, не приди к нам на помощь еще одна синергетическая концепция — параметр порядка. Подобно тому как положение отдельных цилиндрических ячеек в жидкости (рис. 2.11 и 2.13) определяется одним параметром порядка, одним параметром порядка можно определить и набор оттенков серого для всех пикселей образа. То есть с помощью одного-единственного параметра порядка можно определить любой образ — включая и лицо человека. То же можно сказать и об уровне возбуждения каждого отдельного модельного нейрона — уровни возбуждения всех нейронов сразу определяются опять-таки одним-единственным параметром порядка. Это чрезвычайно упрощает дело, так как теперь мы можем рассматривать уже не изменения активности каждого отдельного нейрона, а лишь процесс «борьбы» между различными параметрами порядка.

Динамику изменений параметров порядка в процессе их борьбы между собой можно проследить по движению мяча по холмистой местности. Величины отдельных параметров порядка определяются заданными начальными распределениями оттенков серого, соответствующими различным лицам. В процессе распознавания каждый параметр порядка стремится подчинить себе всю систему, причем победителем в этой борьбе становится тот параметр, определяемый которым запомненный тестовый образ оказывается более всего похожим на предложенную для распознавания картинку.

## 20. Еще одна сетевая реализация синергетического компьютера: «бабушкины клетки»

Интересно, что параметр порядка оказывается не просто абстрактным понятием, но и находит вполне конкретное воплощение в трехслойной нейронной сети (рис. 20.1). Верхний слой составлен из отдельных клеток, каждой из которых соответствует один пиксель. Когда нашему компьютеру предъявляется фрагмент какого изображения, в отдельных клетках (модельных нейронах) верхнего слоя возникает соответствующее возбуждение, и они посылают сигналы (электрические импульсы) к клеткам второго слоя. Важным нюансом здесь является то, что сила тока сигнала не только пропорциональна уровню возбуждения клетки первого слоя, но и зависит от имеющихся запомненных образов (см. рис. 20.2). Процесс первоначального обучения сводится, таким образом, к установлению связей определенной силы между клетками первого и второго слоя (см. рис. 20.1). Каждая клетка второго (среднего) слоя соотносится с каким-либо из первоначально заданных параметров порядка. Так, например, клетка 1 представляет параметр порядка, соответствующий образу (или лицу) 1, клетка 2 — образу 2 и т. д.

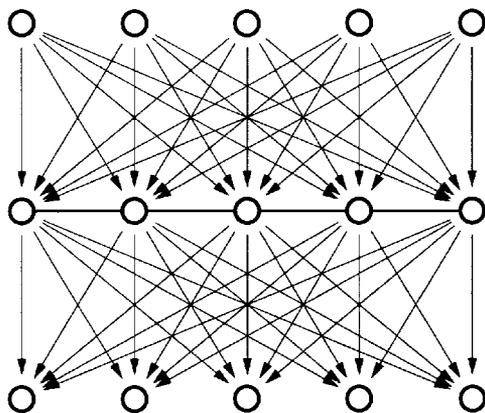


Рис. 20.1. Трехслойная нейронная сеть. Верхний слой соответствует слою нейронов, изображенному на рис. 18.1 справа. Этот слой генерирует входные сигналы, которые передаются во второй слой, в результате чего в нейронах второго слоя возникает определенное возбуждение. Параметры порядка клеток второго слоя вступают в борьбу между собой; победивший параметр порядка возбуждает третий слой клеток, где и формируется полное изображение

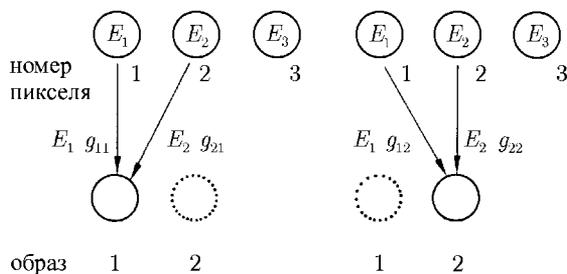


Рис. 20.2. Более подробное объяснение процессов воздействия первого слоя на второй (см. рис. 20.1). Возбуждение клеток входного слоя ( $E_1, E_2$  и т. д.) умножается на весовые коэффициенты  $g_{1,1}, g_{1,2}$  и т. д., а затем передается на клетки 1, 2, 3 среднего слоя. В этих клетках полученные сигналы складываются. Справа на рисунке — передача сигнала в клетку 2. Все передачи из клеток первого слоя в клетки второго происходят одновременно

В процессе распознавания между этими клетками возникает нечто вроде конкурентной борьбы. Перед началом «схватки» клетки среднего слоя должны определиться со своими исходными состояниями (т. е. установить себе первоначальные уровни возбуждения). Производится такая установка посредством сложения всех поступающих из первого слоя сигналов. Побеждает та клетка, уровень возбуждения которой оказался в результате такой процедуры самым высоким. Далее возбуждение этой клетки достигает максимума, в то время как возбуждение в остальных клетках затухает, и их активность приближается к нулю. Клетка, оставшаяся возбужденной, может теперь денервировать некоторый «выходной» набор клеток третьего слоя, которые, собственно, и дают на выходе нашего компьютера то запомненное распределение оттенков серого, которое соответствует предложенному фрагменту. Удивительно, что концепция такой клетки, которую мы будем называть здесь клеткой параметра порядка, не нова. Психологам, если помните, для подтверждения одной гипотезы очень нужна была именно такая клетка — они называли ее «бабушкиной клеткой». Гипотеза же заключалась в том, что в зрительной коре головного мозга имеются некие особые нервные клетки, каждая из которых реагирует исключительно на свой, очень специфический, световой раздражитель (таким раздражителем может быть, например, лицо родной бабушки обладателя этих клеток). Существуют ли в действительности подобные клетки, окончательно пока не выяснено. Хотя, как уже упоминалось, имеются сообщения об эксперимен-

тах с овцами и высшими приматами, в ходе которых такие клетки якобы были обнаружены. Например, при демонстрации обезьяне человеческого лица возникает ярко выраженная реакция определенной нервной клетки коры ее головного мозга. Разумеется, эта клетка может быть и частью какого-то комплекса клеток, и тогда распознавание образа оказывается результатом деятельности целого ряда клеток, а не одной-единственной «бабушкиной клетки». Более того, наша модель синергетического компьютера требует, чтобы все «бабушкины клетки» были соединены между собой, так что и в нашем случае восприятие не является результатом деятельности одной клетки, но сети, составленной из *всех таких* клеток.

Решающее преимущество при восприятии концепция параметра порядка дает лишь тогда, когда мы не привязываем его к какому-то конкретному «вместилищу» (например, к «бабушкиной клетке»): каждому воспринятому образу (например, лицу) соотносится некоторый специфический параметр порядка. Как мы увидим позднее, параметр порядка остается неизменным, даже если соответствующее ему изображение лица удалено в пространстве, увеличено, уменьшено или вовсе повернуто набок; то же относится и к искаженным, зашумленным или пропущенным через различные фильтры изображениям. Иными словами, концепция параметра порядка совпадает по своим свойствам с концепцией собственно образа. Как это часто случается в науке, за преимущество, полученное нами благодаря параметру порядка, приходится платить, и вот какова цена: параметр порядка есть величина весьма абстрактная и требует от нас столь же абстрактного мышления.

Обобщим вышесказанное. Синергетический компьютер — т. е. компьютер, построенный в соответствии с законами синергетики — может быть реализован в виде сети связанных между собой клеток, так называемых модельных нейронов. Изменения общего состояния нейронной сети можно наглядно представить через движение мяча по холмистой местности. На абстрактном уровне такое движение (изменение состояния системы) будет соответствовать ходу конкурентной борьбы между различными параметрами порядка, в результате которой один из параметров побеждает (а мяч закатывается в какую-то из долин), и система приходит наконец в некое устойчивое структурное состояние. Движение мяча (и борьбу параметров порядка) можно смоделировать как на обычном, последовательном, компьютере, так и в сети из соединенных между собой клеток.

Принимая во внимание результаты экспериментальных исследований (на кошках), которые показали, что генерируемые нейронами нервные импульсы могут накладываться друг на друга, заметим в завершение данной главы, что наша модель также предполагает такую возможность; однако это

обстоятельство не вносит сколько-нибудь существенных изменений в обсуждаемую здесь концепцию распознавания образов, и потому мы не будем его особо рассматривать.

## 21. Несколько задач на распознавание

Перейдем теперь от все еще абстрактных рассуждений к некоторым конкретным результатам. Образы, разумеется, можно выбирать совершенно произвольно, и ничто не мешает нам рассматривать не лица целиком,



Рис. 21.1. Фотографии области рта, хорошо различаемые компьютером

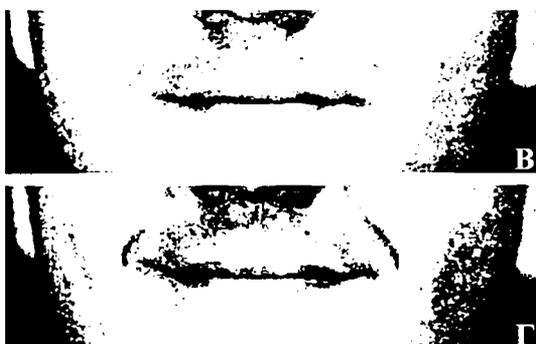


Рис. 21.2. Еще два изображения, которые компьютер отличает как одно от другого, так и от вышесприведенных



Рис. 21.3. Фотографии области глаз, хорошо различаемые компьютером

а отдельные выражения этих самых лиц. Анализ выражений лица играет существенную роль и в психологии, и при исследовании болезней состояний в психиатрии. Возникает вопрос: а способен ли компьютер однозначно определить столь тонкую вещь, как различие в выражениях лица? Приведем несколько небольших, но весьма типичных, примеров из проработанного нами вместе с Робертом Хёнлингером и Филиппосом Вангером обширного материала. Сначала о том, удастся ли компьютеру отличать друг от друга по выражению не только целые лица, но и отдельные участки лиц (например, область рта или глаз). В первой серии экспериментов мы сохранили в памяти компьютера в качестве прототипов несколько изображений двух участков лица (области рта и области глаз) одного и того же человека в различных эмоциональных состояниях, а затем предложили компьютеру одно из этих изображений в качестве тестового образа. Компьютер оказался на удивление проницательным и смог заметить различие между выражениями лица, приведенными на рис. с 21.1 по 21.3. Несколько более сложной оказалась



Рис. 21.4. Четыре сохраненных в памяти компьютера плана городов

для компьютера задача по различению мимики *разных* людей; удалась лишь небольшая часть попыток. Однако способность компьютера к распознаванию человеческих эмоций резко улучшилась — до 90% верных ответов — после того как для запоминания ему предоставляли усредненные прототипы. При создании таких прототипов были использованы фотографии различных участков лиц (например, области рта) примерно десяти человек в определенном эмоциональном состоянии; затем было вычислено среднее значение уровня серого в одинаково расположенных пикселях всех фотографий одного участка лица и на основе полученных данных создано его усредненное изображение. Выяснилось, что с помощью усредненного прототипа компьютер способен узнавать выражение лица людей, не входящих в число тех, фотографии которых использовались для создания этого самого прототипа. Исходя из результатов эксперимента можно предположить, что и человеческий мозг создает свои прототипы посредством подобного усреднения — по крайней мере, при распознавании лиц. Об удивительном подтверждении тому мы расскажем в одной из последующих глав.

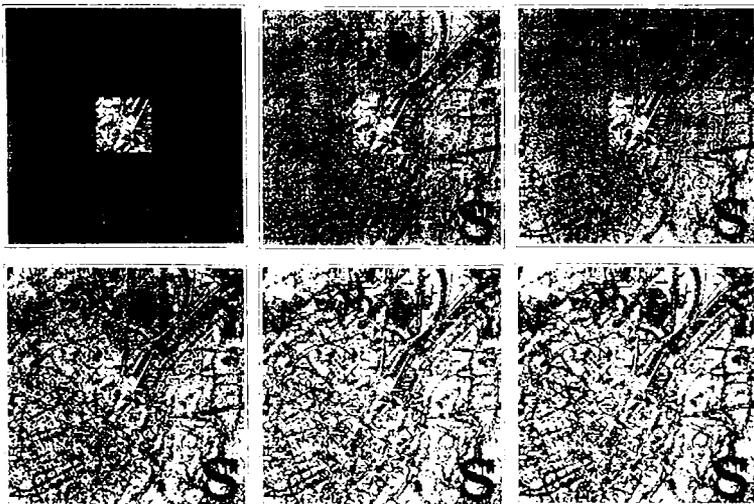


Рис. 21.5. Компьютерная реконструкция плана города по предложенному фрагменту; кроме этого, компьютер определяет и название города, закодированное буквой

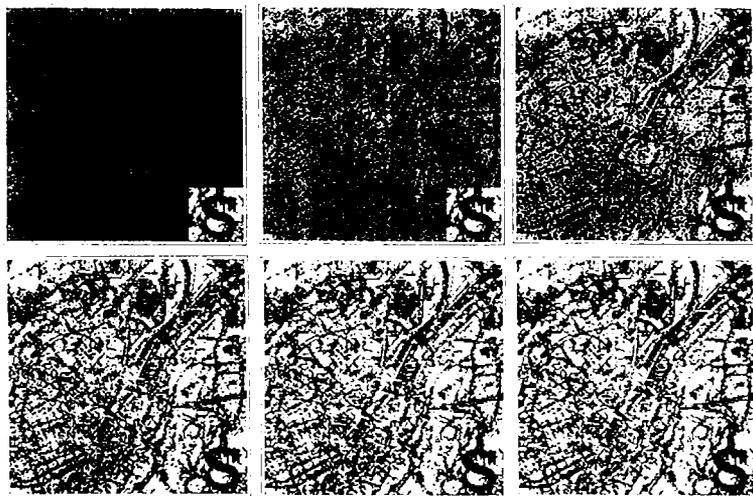


Рис. 21.6. По буквенному коду компьютер восстанавливает план города на основе сохраненных изображений

Хотя компьютер оказался способен различать сами по себе выражения лиц, интерпретация этих выражений, т. е. определение их эмоционального смысла (радость, грусть, злость) ему, *естественно*, пока не по силам. Его, однако, можно определенным образом запрограммировать и тем самым, так сказать, научить узнавать собственно эмоции — так, чтобы на экран монитора рядом с предложенным компьютеру изображением лица выводилась бы еще и его интерпретация (верная!).

В качестве следующего примера проиллюстрируем процесс распознавания плана города (рис. 21.4–21.6). Вообще говоря, область возможных применений описанного процесса распознавания практически безгранична: сравнение промышленных деталей и отыскание бракованных, сортировка упаковок по надписям на них — например, в фармакологической промышленности — и многое другое. Как бы то ни было, обсуждение радужных перспектив применения синергетического компьютера не является целью нашей книги, и поэтому мы обратимся к основным моментам, связывающим работу синергетического компьютера с деятельностью мозга.

## **22. Распознавание синергетическим компьютером зашумленных и профильтрованных изображений**

Мы уже неоднократно имели возможность убедиться в том, что концепция «образа» непосредственно связана с понятием «инвариантности». Мы распознаем образ вне зависимости от его величины и положения в пространстве, мы распознаем его даже тогда, когда изображение искажено различными помехами: растянуто, зашумлено или подвергнуто частотной фильтрации. Примеры таких искажений можно найти в главе 5 (рис. 5.4–5.7).

Попытаемся выяснить, в какой мере воспроизводит упомянутое свойство нашего мозга синергетический компьютер. Это, как мы надеемся, прольет некоторый свет и на способность самого мозга к обработке информации, а также, возможно, позволит установить, в каких случаях такая обработка производится относительно просто, а в каких встречается с трудностями. Кроме того, мы узнаем, какие модели мышления имеются в распоряжении у синергетического компьютера и как именно он ими пользуется; далее мы проведем с этими моделями некоторые психофизические эксперименты с целью выяснить их применимость в качестве возможных моделей функционирования человеческого мозга.

Прежде всего, напомним, что синергетический компьютер — в том виде, в каком мы представили его в предыдущих главах — играючи справляет-

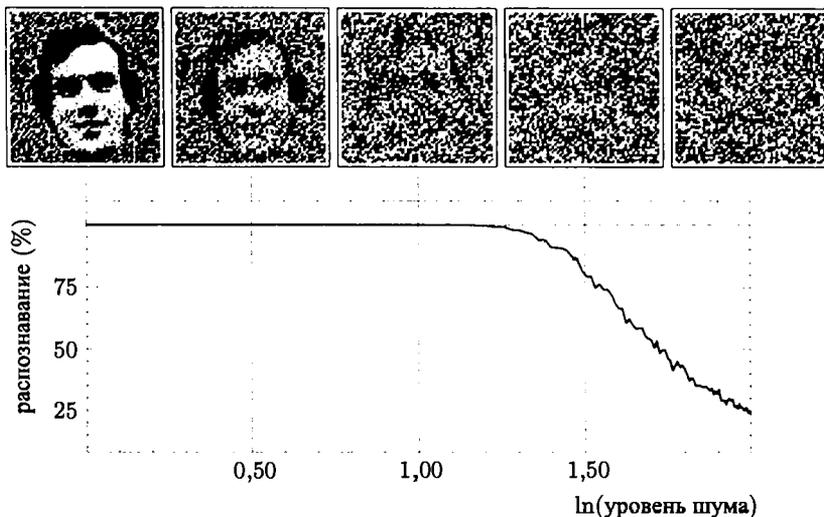


Рис. 22.1. Распознавание синергетическим компьютером зашумленного изображения. В верхней части рисунка — фотографии одного и того же лица в разной степени зашумленности; уровень зашумленности увеличивается слева направо. В нижней части — кривая, отражающая зависимость успешности опознавания (в процентах) от степени зашумленности (отложена по горизонтальной оси)

ся с целым рядом задач по распознаванию образов. Мы убедились также, что синергетический компьютер оказывается в состоянии опознать «искаженные» лица, и даже лица, скрытые в тумане — что нам, людям, удастся уже с трудом. На рис. 22.1, вверху, показано изображение лица в различной степени зашумленности (шум усиливается в направлении слева направо), а в нижней части рисунка приведен график, на котором с зашумленностью изображения сопоставлена способность синергетического компьютера опознать изображенное лицо. Как видите, степень зашумленности становится весьма высокой еще до того, как компьютер перестает опознавать лицо в 100% случаев. В ходе этого компьютеру предъявлялись изображения с разной степенью зашумленности, причем эта степень могла изменяться и в пределах одного изображения.

С поразительной легкостью компьютеру удавалось распознавать и изображения, подвергнутые высоко- и низкочастотной фильтрации. Здесь

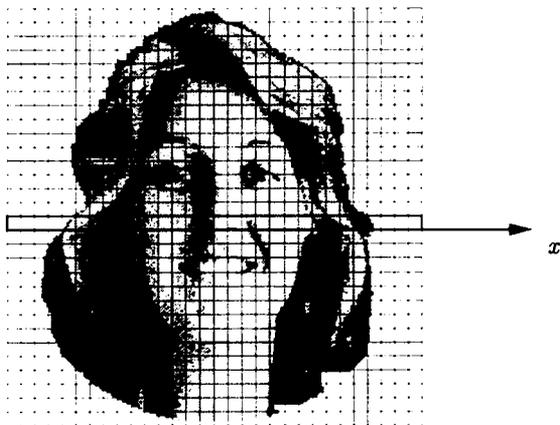


Рис. 22.2. Выделенные из изображения ряды пикселей

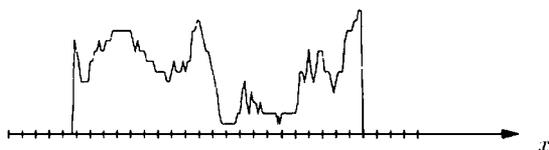


Рис. 22.3. Распределение уровней серого в ряде пикселей с рис. 22.2

следует прежде пояснить, что именно мы имеем в виду, говоря о высоко- и низкочастотной фильтрации изображений. Рассмотрим ряд пикселей, расположенных вдоль прямой, как это показано на рис. 22.2. Если теперь по вертикальной координатной оси откладывать значение уровня серого в пикселе, а горизонтальную расположить вдоль рассматриваемой линии пикселей, то мы получим некоторую кривую (рис. 22.3), которую — как утверждают математики — всегда можно представить в виде суммы некоторых волн (такие волны можно видеть на рис. 22.4). Этот метод называется анализом Фурье. Под высокочастотной фильтрацией изображения подразумевается удаление из Фурье-разложения упомянутой кривой длинных волн; при низкочастотной фильтрации, напротив, удаляются короткие волны. После фильтрации оставшиеся волны снова складываются в кривую, по которой и восстанавливается изображение. После высокочастотной фильтрации

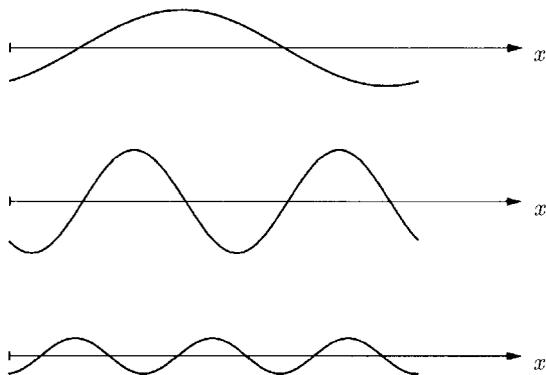


Рис. 22.4. Кривая с рис. 22.3 может быть представлена в виде суммы волн разной длины; здесь приведены лишь некоторые из них

контуры изображения становятся более резкими, при низкочастотной же более мягкими, размытыми.

Задавшись целью исследовать способность человека к распознаванию образов, американские психологи (А. Дж. О'Тул с сотрудниками) провели несколько серий экспериментов с применением в качестве тестовых образов изображений, подвергшихся той или иной фильтрации. Экспериментаторы ставили перед собой целый ряд задач. Сначала испытуемым было предложено запомнить несколько «нормальных» (т. е. непрофильтрованных) изображений лиц. Затем им предъявлялись портреты, подвергшиеся высокочастотной фильтрации; от испытуемых требовалось опознать знакомые лица, т. е. определить, какому из знакомых лиц соответствует профильтрованное изображение. Аналогичный эксперимент был проведен и с низкочастотной фильтрацией изображений. В другой серии экспериментов испытуемым предлагалось запомнить изображения, прошедшие низкочастотный фильтр, и сопоставить их затем по памяти с изображениями, прошедшими высокочастотный фильтр, и наоборот. Результаты экспериментов О'Тула представлены на рис. 22.5.

Мы провели аналогичные эксперименты с нашим синергетическим компьютером, также используя несколько предварительно «запомненных» им портретов (уже знакомых нам по рис. 17.2). Профильтрованные (как высоко-, так и низкочастотными фильтрами) изображения представлены на рис. 22.6 и 22.7. Как нам представляется, уже при низкочастот-

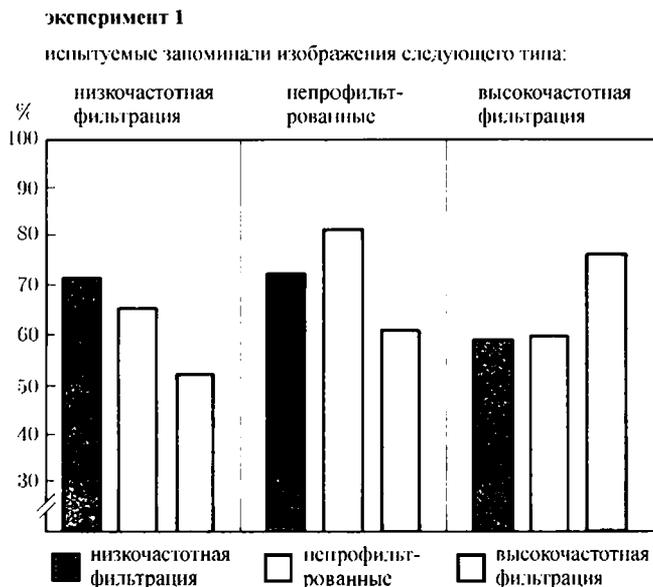


Рис. 22.5. Результаты экспериментов А. Дж. О'Тула и его сотрудников. В экспериментах принимали участие три группы. Испытуемым первой группы (левая часть диаграммы) предлагались для запоминания изображения, подвергшиеся низкочастотной фильтрации; испытуемым второй группы (средняя часть диаграммы) — непрофильтрованные изображения; испытуемым же третьей группы (правая часть диаграммы) — изображения, прошедшие высокочастотную фильтрацию. Затем испытуемым всех групп изображения всех трех типов предлагались уже для распознавания. Как показано на диаграмме, группа, запоминая лица, прошедшие низкочастотный фильтр, лучше всего, естественно, распознавала именно их, в то время как прошедшие высокочастотный фильтр изображения опознавались испытуемыми хуже всего. Группа, запоминая непрофильтрованные изображения, их же лучше всего и опознавала; на втором месте оказались изображения, подвергшиеся низкочастотной фильтрации; результаты же высокочастотной фильтрации узнавались хуже остальных. Третья группа также лучше всего узнавала изображения «своего» типа, что же до остальных изображений (непрофильтрованных и прошедших низкочастотный фильтр), то степень их узнавания оказалась приблизительно одинаковой.

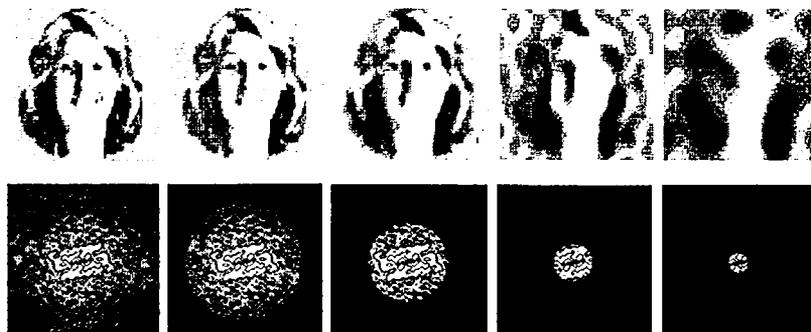


Рис. 22.6. Вверху: изображение, подвергнутое низкочастотной фильтрации; степень фильтрации возрастает слева направо. Внизу: результат Фурье-преобразования (см. рис. 22.4) этих изображений

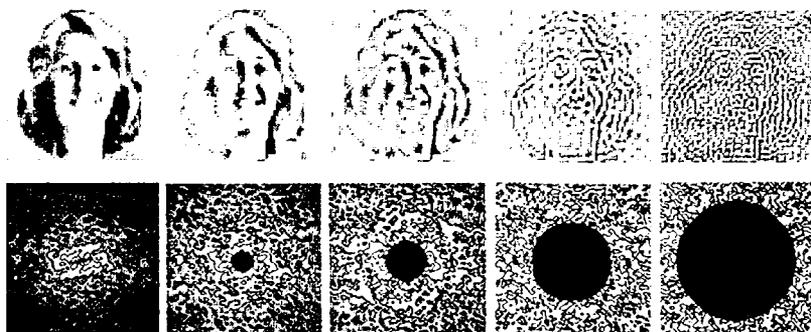


Рис. 22.7. Вверху: изображение, подвергнутое высокочастотной фильтрации; степень фильтрации возрастает слева направо. Внизу: результат Фурье-преобразования (см. рис. 22.4) этих изображений



Рис. 22.8. Распознавание синергетическим компьютером профильтрованного изображения (низкочастотная фильтрация). В ходе этого процесса компьютеру удастся опознать в предложенном исходном, т. е. непрофильтрованном изображении лица и определить его кодовое обозначение



Рис. 22.9. Распознавание синергетическим компьютером профильтрованного изображения (высокочастотная фильтрация)

ной фильтрации способность человека к восприятию профильтрованных изображений сталкивается со значительными трудностями. В качестве меры способности компьютера к распознаванию таких объектов мы использовали период времени, требующийся компьютеру для реконструкции заданного изображения к его исходному виду (запомненному ранее). Естественно, с уменьшением объема вводимой информации это время увеличивалось. Временные ряды, отражающие ход реконструкции изображения, представлены на рис. 22.8 и 22.9: от профильтрованного портрета в начале ряда до исходного изображения, сохраненного в памяти компьютера. Для большей наглядности сравнения результатов компьютерных экспериментов с результатами О'Тула по вертикальной оси на диаграммах (рис. 22.10) откладываются не значения времени, затраченного на распознавание, а обратные им величины. Наблюдается очень хорошее согласие между нашими экспериментами и экспериментами О'Тула. Как видно из диаграмм, синергетический компьютер продемонстрировал при распознавании вполне соответствующие человеческим возможности и похожие результаты.



Рис. 22.10. Теоретические результаты для синергетического компьютера. По вертикальной оси откладывается величина, обратная времени, необходимому компьютеру для распознавания изображения ( $1/t_r$ ). Проведенные испытания аналогичны экспериментам О'Тула, причем полученные результаты демонстрируют хорошее согласие с данными, представленными на рис. 22.5. Единственное исключение составляют результаты, относящиеся к серии, в которой компьютеру для запоминания предлагались изображения, обработанные высокочастотными фильтрами. При этом профильтрованные низкочастотными фильтрами изображения компьютеру распознать не удалось. Причина заключается в том, что в результате упомянутых фильтраций запомненное и распознаваемое изображения становятся слишком непохожи друг на друга, и для успешного распознавания компьютеру просто не хватает данных.

### 23. Плоские трансформации изображений — первый подход к распознаванию

Для человека не представляет никаких сложностей опознание даже такого объекта, который удален от него в пространстве или находится в движении. Точно так же безо всякого труда узнаем мы лица вне зависимости от их величины или удаленности от нас — настолько, разумеется, насколько позволяет разрешающая способность наших глаз (предмет не должен быть слишком мал, а расстояние — слишком велико). И наконец, человек в состоянии опознать предметы (и лица), повернутые на какой-либо угол. Способен ли на это описанный нами синергетический компьютер?

Будем честны и скромно ответим «нет». Ему, правда, удается распознать изображение, которое незначительно увеличено или уменьшено, либо повернуто на очень небольшой угол, однако при больших отклонениях си-

нергетический компьютер отказывается что-либо узнавать. Следует ли нам в таком случае признать несостоятельной саму концепцию? Ни в коем случае. Существует, как выяснилось, множество различных (и весьма интересных) способов помочь синергетическому компьютеру преодолеть этот барьер. Можно тем или иным образом предварительно обработать поступающие в компьютер данные, либо как-то изменить динамику его внутренних процессов. Первый подход представляет собой, как мы увидим несколько позже, чисто техническое решение проблемы, второй же, предположительно, обеспечит большее приближение возможностей компьютера к человеческому восприятию. На общедоступном языке описать реализацию первого, технического, подхода довольно сложно, а вот второе решение описывается весьма наглядно.

Несмотря на очевидную сложность, рискнем-таки начать с технического решения и рассмотрим его несколько подробнее. Читатели, не слишком интересующиеся математическими описаниями, могут просто пропустить это место, либо сразу перейти к следующей главе. Рассмотрим сначала независимость процесса распознавания от перемещений объекта в пространстве. Для этого снова применим разложение распределения уровня серого некоторого изображения на отдельные волновые составляющие, т. е. анализ Фурье. На рис. 23.1а и 23.1б представлены два изображения одного и того же лица, но смещенные друг относительно друга в плоскости страницы. Выделим ряд пикселей, расположенных вдоль горизонтальной прямой, как это показано на рис. 23.2а и 23.2б, и нанесем соответствующие значения уровня серого на графики на рис. 23.3а и 23.3б. Естественно, кривая распределения серого на графике 23.3б будет повторять кривую распределения серого на графике 23.3а с некоторым смещением (равным смещению изображения на рис. 23.2б и 23.1б). Разложим эти распределения на отдельные волновые составляющие с помощью уже упоминавшегося анализа Фурье. В результате получим некоторые наборы волн, схематично показанные на рис. 23.4а и 23.4б (рис. 23.4а соответствует рис. 23.3а, а рис. 23.4б — рис. 23.3б).

Вся информация, содержащаяся прежде в распределениях уровня серого изображений 23.2а и 23.2б, теперь представлена в виде отдельных волн на рис. 23.4а и 23.4б. Каким же образом это возможно? Каждая волна имеет определенную длину и определенную высоту (так называемую амплитуду). Сравним между собой волны одинаковой длины на рис. 23.4а и 23.4б (например, верхнюю слева и верхнюю справа). Мы видим, что амплитуды этих волн одинаковы. Однако сами волны (т. е., координаты их максимумов на горизонтальной оси) смещены друг относительно друга, причем на то же

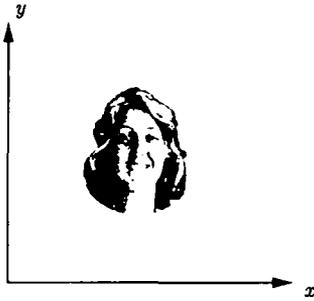


Рис. 23.1а. Прототипный образ

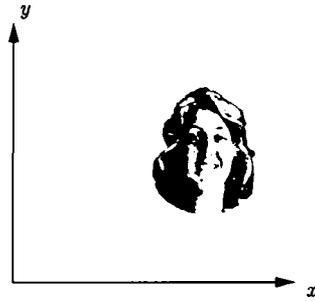


Рис. 23.1б. Он же, смещенный вправо

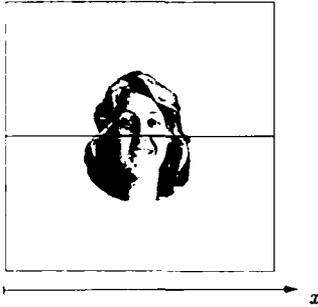


Рис. 23.2а. Выделение горизонтально-го ряда пикселей



Рис. 23.2б. То же, на смещенном изображении



Рис. 23.3а. Распределение значений уровня серого вдоль выделенного ряда пикселей



Рис. 23.3б. То же, на смещенном изображении

расстояние, на которое смещена кривая 23.3б относительно кривой 23.3а. Такое смещение называется в науке «сдвигом фазы».

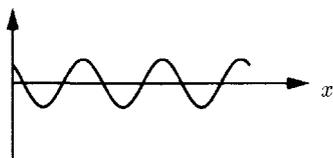
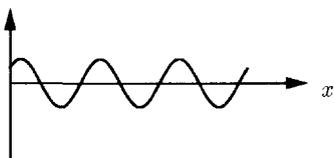
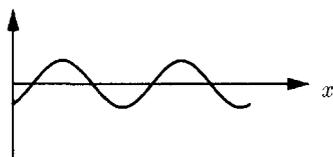
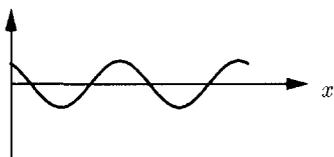
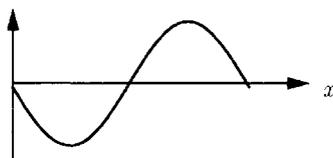
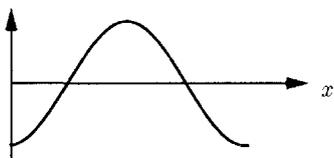


Рис. 23.4а. Разложение распределения серого на отдельные волновые составляющие (для примера приведена лишь часть составляющих)

Рис. 23.4б. То же, для смещенного вправо изображения

Теперь мы видим, как сохраняется информация о распределении уровней серого при переходе от исходной кривой к волновому разложению. Для волны каждой длины следует задать амплитуду и фазу (положение первого максимума на горизонтальной оси). Чтобы закодировать таким образом все исходное изображение (рис. 23.1а и 23.1б), еще недостаточно подвергнуть анализу распределение уровней серого лишь вдоль одного ряда пикселей — необходимо обработать все имеющиеся пиксели. Распространение же анализа Фурье из одного на два измерения не представляет для математика ни малейшей сложности; нужно лишь представить, что волны могут «бежать» не только вдоль горизонтальной оси, но и в любом другом направлении на плоскости.

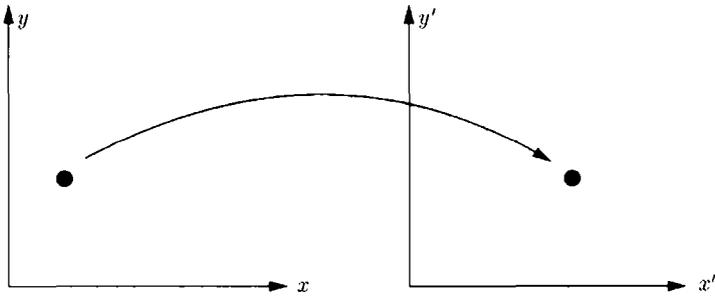


Рис. 23.5. При логарифмическом отображении каждой точке плоскости  $x, y$  соответствует некоторая точка плоскости  $x', y'$

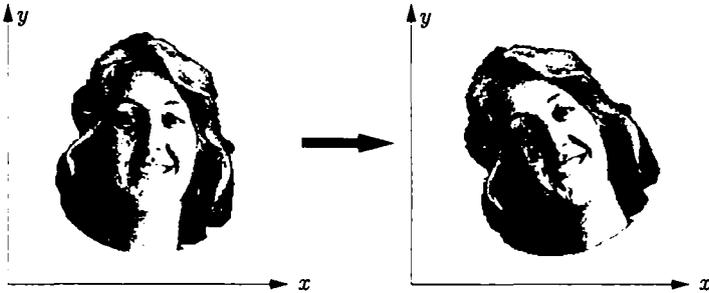


Рис. 23.6. Поворот изображения в плоскости  $x, y$

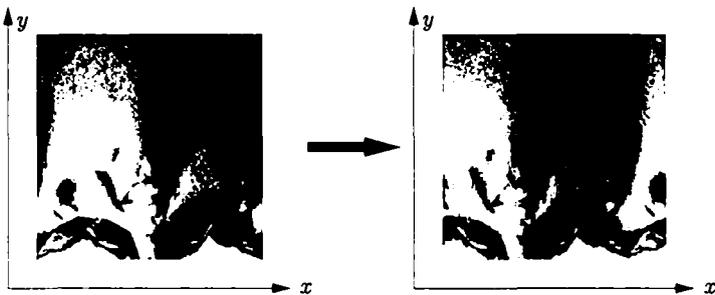


Рис. 23.7. Логарифмическое представление изображения 23.6

Вернемся, однако, к проблеме распознавания образов вне зависимости от их положения в пространстве. Как можно видеть, волны на рис. 23.4а и 23.4б идентичны во всем, кроме фазы. Если бы удалось совершенно исключить из рассмотрения величину фазы, то, очевидно, опознание исходного изображения перестало бы зависеть от его положения — а это как раз то, что нам нужно. Проведем двумерное преобразование Фурье, которое даст нам и амплитуду волн, и их фазу. Для кодирования же изображения воспользуемся только амплитудой — этого можно добиться с помощью одного совсем несложного математического приема, в результате которого в нашем распоряжении окажутся необходимые для данного случая коэффициенты Фурье.

Далее необходимо выяснить, не пропадет ли при «выбрасывании» фазы слишком много существенной для исходного изображения информации. В одномерном представлении это действительно было бы так, но в двумерном случае мы (при достаточно общих условиях) можем избавиться от фазы без каких-либо неприятных последствий. Теперь изображение описывается уже не посредством исходного распределения уровня серого, а совокупностью амплитуд, т. е. значений коэффициентов Фурье. После такой «предварительной обработки» распознавание изображения оказывается синергетическому компьютеру вполне по силам. Прежде он конструировал «холмистый ландшафт» на основе запомненных распределений уровня серого (т. е. собственно, изображений); сейчас же он проделал аналогичную процедуру с запомненными амплитудами и сумел, таким образом, распознать смещенное в плоскости изображение лица.

Процесс становится еще более абстрактным, если требуется распознать изображение объекта независимо от величины этого изображения и его ориентации в плоскости. В этом случае нам предстоит произвести так называемое логарифмическое отображение, при котором каждой точке плоскости ставится в соответствие определенная точка на другой плоскости (рис. 23.5). При таком отображении повороту изображения в плоскости (рис. 23.6) соответствует некоторый сдвиг каждой точки его отображения на другой плоскости в вертикальном направлении (рис. 23.7). Увеличению же и уменьшению изображения (рис. 23.8) соответствует сдвиг точек отображения по горизонтали (рис. 23.9).

Теперь оказывается возможным свести новую задачу к уже решенной старой (на радость всем читателям-математикам). Как добиться инвариантности распознавания относительно сдвигов в плоскости (т. е. независимости от этих самых сдвигов), мы узнали несколько абзацев назад. Нужно лишь провести преобразование Фурье, взять только значения амплитуд волно-

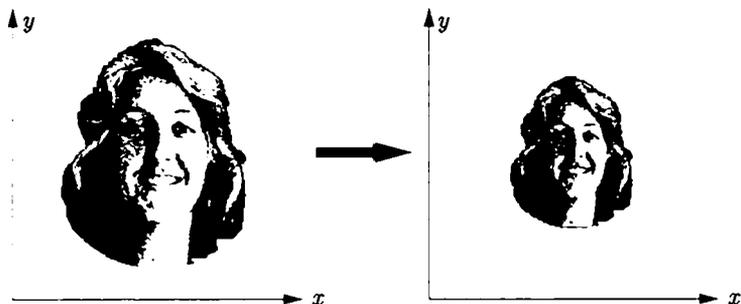


Рис. 23.8. Уменьшение изображения

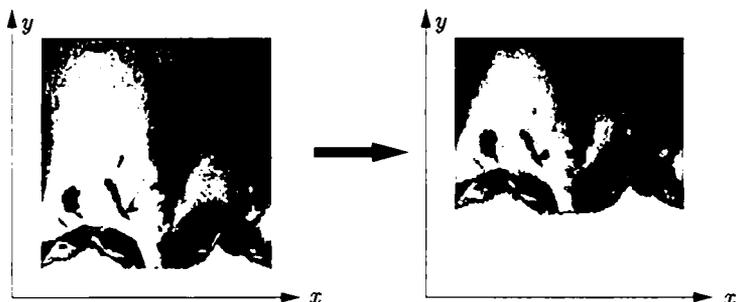


Рис. 23.9. Логарифмическое представление изображения 23.8

вых составляющих, и сдвиг отображения в плоскости не мешает нам распознать исходное изображение. Для читателей, далеких от математики, все это, наверное, представляется невообразимой абстракцией, однако результаты вполне наглядны и очень хорошо поддаются интерпретации. Рассмотрим рис. 23.10 и 23.11, на каждом из которых слева сверху помещено изображение лица: на рис. 23.10 лицо ориентировано «правильно», а на рис. 23.11 — повернуто на некоторый угол. Так как изображения двумерны, значения коэффициентов Фурье приходится наносить на двумерную плоскость; нам в этом помогает специальная компьютерная программа, причем фазовые коэффициенты она сразу отбрасывает. При построении зависимости коэффициентов Фурье от соответствующих длин волн целесообразно следующее: откладывать на осях  $x$  и  $y$  не сами длины волн, а величины,

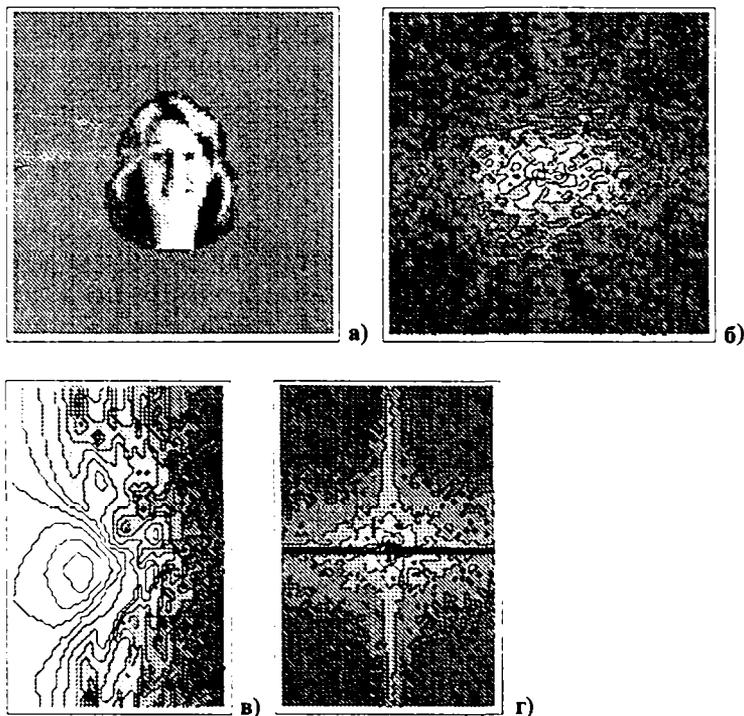


Рис. 23.10. Преобразования прототипного образа.

(а) Исходное изображение. (б) После проведения преобразования Фурье. (в) Логарифмическое представление предыдущего результата. (г) Повторное преобразование Фурье

обратные им (так называемые волновые числа), и, кроме того, соединить одинаковые значения амплитуд горизонталями. Каждая горизонталь соответствует, таким образом, какому-то определенному коэффициенту Фурье. На рис. 23.10 (б) можно видеть ярко выраженный максимум, причем значение коэффициента с различной скоростью уменьшается в направлении от центра изображения к его краям. Если сравнить эту зависимость с соответствующей зависимостью на рис. 23.11 (б), то можно заметить, что оба распределения величин коэффициентов Фурье все еще отличаются друг от друга, причем второе изображение явно повернуто относительно первого на тот же угол, на какой повернуто исходное изображение.

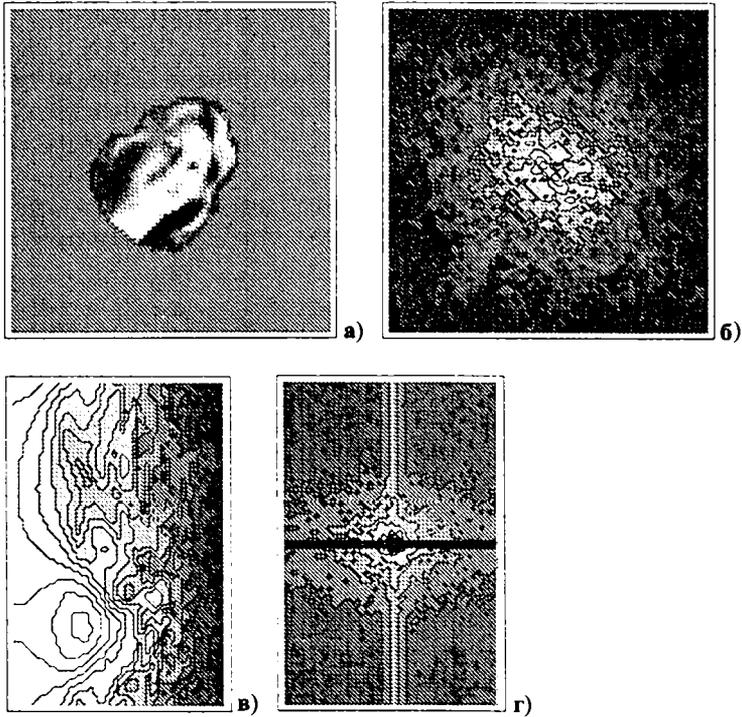


Рис. 23.11. Преобразования прототипного образа, повернутого в плоскости  $x, y$ . (а) Исходное изображение. (б) После проведения преобразования Фурье. Ясно видно, что полученная картина повернута по отношению к 23.10 (б). в) Логарифмическое представление предыдущего результата. Картинка явно смещена вниз по сравнению с 23.10 (в). (г) Повторное преобразование Фурье. Становится очевидно, что исходные изображения действительно идентичны; при этом можно определить и кодовое обозначение, присвоенное данному изображению, несмотря на то, что оно оказывается повернутым

В следующем квадрате (рис. 23.10 (в) и 23.11 (в)) можно видеть результаты следующего шага: логарифмического отображения предыдущего распределения. И здесь между изображениями существует выраженное отличие. Картинка на рис. 23.11 (в) сдвинута вниз по сравнению с аналогичной картинкой на рис. 23.10 (в). Сделаем последний шаг: произведем еще раз преобразование Фурье и вычислим значения коэффициентов (рис. 23.10 (г))

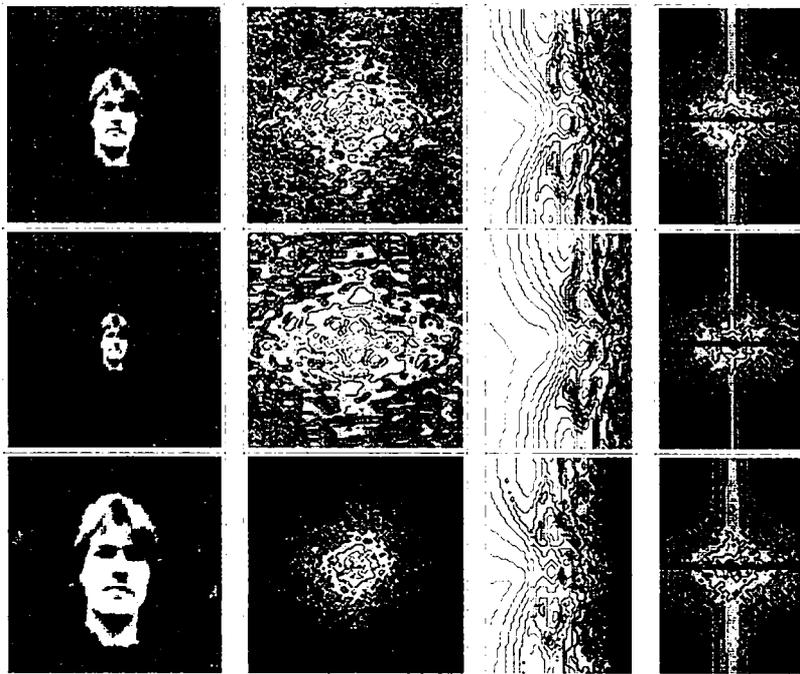


Рис. 23.12. Те же преобразования, что и на рис. 23.11, — для нормального, уменьшенного и увеличенного изображения

и 23.11 (г)). Как видите, изображения полностью совпали. Иными словами, мы добились искомой инвариантности. Картинка останется неизменной, как бы мы ни поворачивали исходное изображение лица девушки. Если подвергнуть описанной процедуре другие портреты, мы получим какие-то другие закодированные изображения. И хотя закодированное изображение выглядит совершенно непохоже на оригинал, оно обладает таким весьма важным преимуществом, как независимость от каких бы то ни было поворотов этого самого оригинала (в плоскости изображения).

Абсолютно то же самое можно проделать и с увеличенными или уменьшенными изображениями (см. рис. 23.12): после проведения описанных преобразований увеличенные и уменьшенные лица ничем не отличаются друг от друга. Наконец, можно убедиться и в том, что результаты последнего преобразования увеличенных, уменьшенных и повернутых в собственной

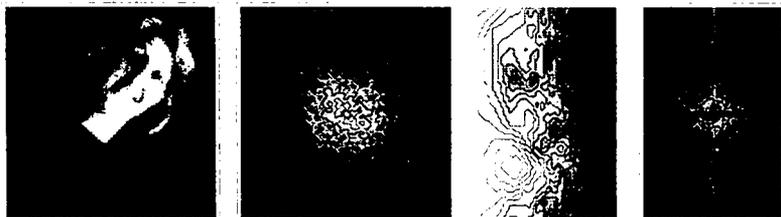


Рис. 23.13. Преобразования повернутого, смещенного и увеличенного изображения



Рис. 23.14. Способности к восприятию человеком перевернутых изображений не безграничны. На первый взгляд, представленные здесь лица кажутся одинаковыми. Попробуйте, однако, перевернуть книгу!

плоскости изображений в точности совпадают с аналогичным результатом, полученным из исходного изображения (рис. 23.13). Синергетическому компьютеру, таким образом, предъявлялись не исходные изображения, каждое со своим распределением уровней серого, а изображения, предварительно обработанные и приведенные к инвариантному виду (нижний правый квадрат в вышеприведенных рисунках). Такой процедуре подверглись и запомненные изображения, и изображения, предъявлявшиеся компьютеру для опознания. Компьютер производил с кодированными портретами те же операции, что и раньше с оригиналами, и отличал их друг от друга с той же однозначностью, даже если ему показывали только фрагмент изображения.

С помощью описанного метода можно, совершенно очевидно, распознать даже лицо, перевернутое «вниз головой». Не составляет труда также



Рис. 23.15. Здесь мы видим чашу, наполненную овощами и фруктами. А что мы увидим, перевернув книгу? (Фрагмент картины Джузеппе Арчимбольдо.)

заметить мельчайшие различия в лицах очень похожих друг на друга людей, один из которых стоит «нормально», а другой встал на голову. Способен ли на такое распознавание человек? Взгляните на рис. 23.14: обе дамы представляются нам практически «на одно лицо». Однако стоит перевернуть книгу «вверх ногами», и сразу станет очевидным разительное несходство между ними. Еще один пример представлен на рис. 23.15. И здесь обнаруживается значительная разница между «правильным» и перевернутым

изображениями. Совершенно очевидно, что в данном случае человеческие возможности восприятия уступают компьютерным; если одно лицо изображено «правильно», а другое — «вверх ногами», то человеку не удастся отличить друг от друга изображения этих лиц не только по мелким, но даже и по относительно крупным их чертам. Возникает естественный вопрос: не существует ли других компьютерных процедур, которые были бы так же похожи на человеческие способы восприятия, как вышеописанные? Подробным рассмотрением этого вопроса мы займемся в следующей главе.

## **24. Плоские трансформации изображений — альтернативное решение**

Идея, лежащая в основе этого альтернативного решения, в сущности, чрезвычайно проста. Нужно создать в дополнение к той холмистой местности, которую мы строили в главе 19, еще одну подобную местность, форма которой отражала бы только различные смещения заданного образа относительно запомненного. Мяч скатится в какую-нибудь долину, и по его положению отыщется «правильная» окрестность нуля и, соответственно, определится нужное смещение из запомненных, соответствующее смещению предложенного образа. Далее в дело вступает первоначальный ландшафт и помогает найти среди запомненных образов самый близкий к предъявленному с учетом уже известного смещения. То же самое относится и к поворотам образов, только шаг угла поворота не должен быть слишком велик во избежание возникновения нежелательных боковых долин (см. рис. 24.1). В остальном же этот способ функционирует очень хорошо, причем его можно еще усовершенствовать и тем самым совершенно исключить возникновение боковых долин. Холмистая местность при этом разглаживается, скрывая мелкие неровности и отчетливее выделяя большие перепады яркости. Больших же перепадов яркости можно добиться, как мы уже видели, с помощью низкочастотной фильтрации. Иными словами, «сглаживание» изображения приводит в действительности к сглаживанию потенциальной кривой, как это показано на рис. 24.2.

С помощью такой холмистой местности компьютер сможет также распознавать вытянутые в различных направлениях изображения (рис. 24.3). Возможно, не будет большим заблуждением предположить, что и в нашем мозге функционирует подобный механизм, постоянно стремящийся посредством изменения синаптических сил привести предлагаемые ему образы в соответствие с запомненными прототипами. Здесь, по всей видимости, мы

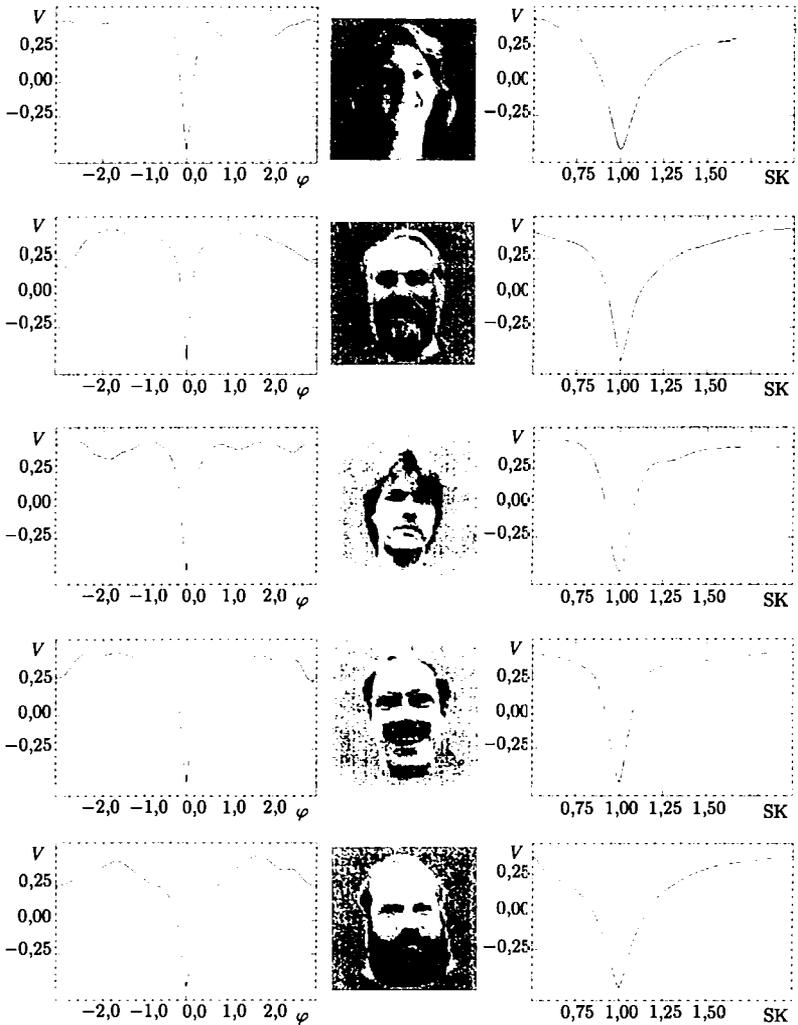


Рис. 24.1. Представленный здесь ряд изображений лиц был предложен компьютеру в повернутом виде. Левый столбец: зависимости формы холмистого ландшафта от угла поворота изображения. Помимо главного минимума в середине, здесь имеются и нежелательные боковые минимумы. Правый столбец: зависимости формы холмистого ландшафта от изменения масштаба изображения

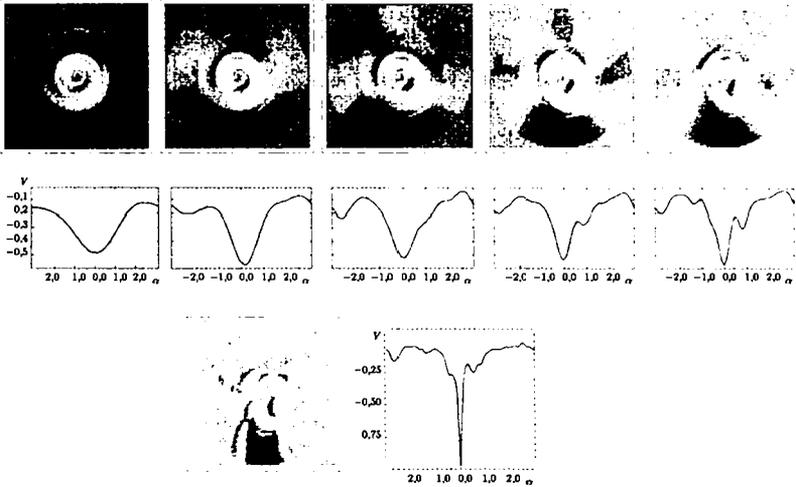


Рис. 24.2. Сглаживание холмистого ландшафта посредством «смазывания» изображения. Слева внизу: исходное изображение (Астерикс); справа внизу: холмистый ландшафт, соответствующий этому изображению. Вверху: зависимости формы холмистого ландшафта от угла поворота изображения



Рис. 24.3. Деформированные изображения лица, которые компьютер без труда распознает

имеем дело с совершенно новой точкой зрения, прежде в литературе не обсуждавшейся. Упомянутое приведение в соответствие требует непрерывного динамического изменения сил синаптических связей. До сих пор предполагалось, что синаптические связи формируются исключительно в процессе обучения. Теперь же обнаруживается, что синаптические связи могут — и даже должны — подчиняться, помимо всего прочего, некой собственной динамике. Возможно, данное обстоятельство послужит начальным толчком к проведению экспериментов непосредственно на нейронах. Все эти моменты требуют, безусловно, дальнейшего всестороннего осмысления и обобщения — следует, к примеру, учитывать, что деформация изображения вовсе не обязана быть одинаковой вдоль всех направлений плоскости этого самого изображения. Можно подумать и о возможности локальных искажений — таких, например, какие возникнут, если лицо нарисовать на резиновом коврике, а затем растягивать этот коврик в определенных участках. Учитывая, что зоны искажений на человеческом лице ограничены (они почти не затрагивают, например, лоб и нос, которые остаются относительно неподвижными по сравнению с тем, как изменяются глаза и рот), можно легко предположить в данном случае возможность компьютерного распознавания таких искаженных лиц (находящихся, например, в группе оживленно беседующих людей, либо просто демонстрирующих какие-либо эмоциональные состояния). Исследования вышеупомянутых проблем еще весьма далеки от завершения.

Только рассматривая этот альтернативный способ инвариантного распознавания образов, мы начинаем осознавать, что в основе восприятия лежит целый ряд динамических процессов непрерывного формирования синаптических связей. Эта картина полностью противоположна той, что обычно ассоциируется с восприятием. Мы наивно полагали, что мозг подобен фотопластинке, которая просто сохраняет сообщенные ей визуальные впечатления. Теперь мы знаем, что распознавание образов обеспечивается взаимодействием множества протекающих в мозге сложнейших процессов. Наш метод можно интерпретировать и так: показанный тестовый образ «подгоняется» мозгом под один из уже имеющихся у него запомненных образов. Так работает известная нам из психологии ассимиляция. И наоборот — что особенно интересно — математический формализм позволяет нам произвести совершенно иную интерпретацию: сохраненный образ может с таким же успехом и сам оказаться «подогнанным» под предложенный тестовый образ. Этот процесс психологи называют адаптацией.

Для синергетического компьютера оба эти процесса, по большей части, эквивалентны, и поэтому один из них может быть заменен другим без

какого-либо ущерба. Для людей это, судя по всему, не всегда так, однако какой-либо информацией о подобных исследованиях мы не располагаем. Мы не думаем, что будущее решение проблемы восприятия состоит в конструировании каких-либо статических фильтров или шаблонов для компьютера — так же сложно представить себе создание чего-либо подобного и для мозга. Гораздо более разумным будет примириться с мыслью о том, что в мозге при восприятии протекают высокосложные и взаимосвязанные процессы — это подтверждается и многочисленными экспериментальными данными, и результатами компьютерных исследований, которые мы еще будем обсуждать в дальнейшем.

## 25. Распознавание сложных сцен

В повседневной жизни мы, как правило, имеем дело не с отдельными лицами или предметами, а с группами лиц и предметов. Если мы намерены встретить кого-то на вокзале, мы должны суметь отыскать нужное нам лицо в большой группе других лиц, причем это лицо может оказаться частично скрытым от нашего взгляда. Может ли синергетический компьютер справиться с такой задачей, и если да, то каким образом?

Рассмотрим просто в качестве примера рис. 25.1. Так как оба изображения лиц смещены по сравнению с исходными (запомненными) образами, приблизительно дюжиной которых мы располагаем, нам предстоит сначала воспользоваться при распознавании способом, который позволяет устранить различия, вносимые в образ его смещением в плоскости. Как это делается, мы уже обсуждали в главе 23. Преобразованное изображение предложим компьютеру, который опознает лицо девушки на переднем плане и сочтет свою задачу выполненной. Теперь обратите внимание на очень важный момент, с которым мы еще неоднократно встретимся в этой книге. При описании конструктивных принципов синергетического компьютера мы упоминали о некоем параметре внимания. Присвоим параметру внимания, соответствующему портрету девушки, нулевое значение и предложим ту же сцену компьютеру еще раз. На сей раз компьютер опознает мужчину на заднем плане. Интересно, что эту процедуру можно продолжать и дальше. Компьютер может таким образом обрабатывать сцены, содержащие большее количество объектов. Доведем число участников сцены до пяти (причем одним из них сделаем Астерикса, см. рис. 25.2). Проведем вышеописанное преобразование, обеспечивающее независимость распознавания изображения от его положения в плоскости. После того, как компьютер опо-

знает первое лицо, присвоив соответствующему параметру внимания значение «0». При повторном предъявлении сцены компьютер опознает еще одно лицо; мы же вновь изменим значение соответствующего параметра внимания. Процедура повторяется до тех пор, пока наконец все лица не будут правильно опознаны компьютером.



Рис. 25.1. Сложная сцена, распознаваемая синергетическим компьютером



Рис. 25.2. Сложная сцена, составленная из пяти изображений лиц, которые компьютер распознает по очереди

Вскоре мы увидим, что понятие параметра внимания имеет для распознавания образов совершенно фундаментальное значение, и, по всей видимости, не будет большой ошибкой предположить, что и наш мозг при анализе сложных сцен использует аналогичный способ: сначала внимание концентрируется на распознавании одного из объектов, объект опознается, затем внимание «переключается» на следующий объект и т. д.

Нельзя обойти молчанием и тот факт, что при распознавании сложных сцен бывали случаи, когда компьютер выдавал неверные ответы. Так, например, при предъявлении ему сцены, составленной из двух портретов, компьютер не узнавал ни первое, ни второе лицо, а называл и вовсе третье. Такое поведение компьютера, естественно, не могло не вызвать у нас серьезных опасений, так как свидетельствовало о наличии серьезных изъянов в его конструкции. Однако известно, что и люди при распознавании образов порой совершают ошибки: взглянув на рис. 25.3, читатель легко сможет в этом убедиться. На первый взгляд, перед нами портрет Альберта Эйнштейна. Но стоит рассмотреть его более тщательно, сконцентрировав внимание

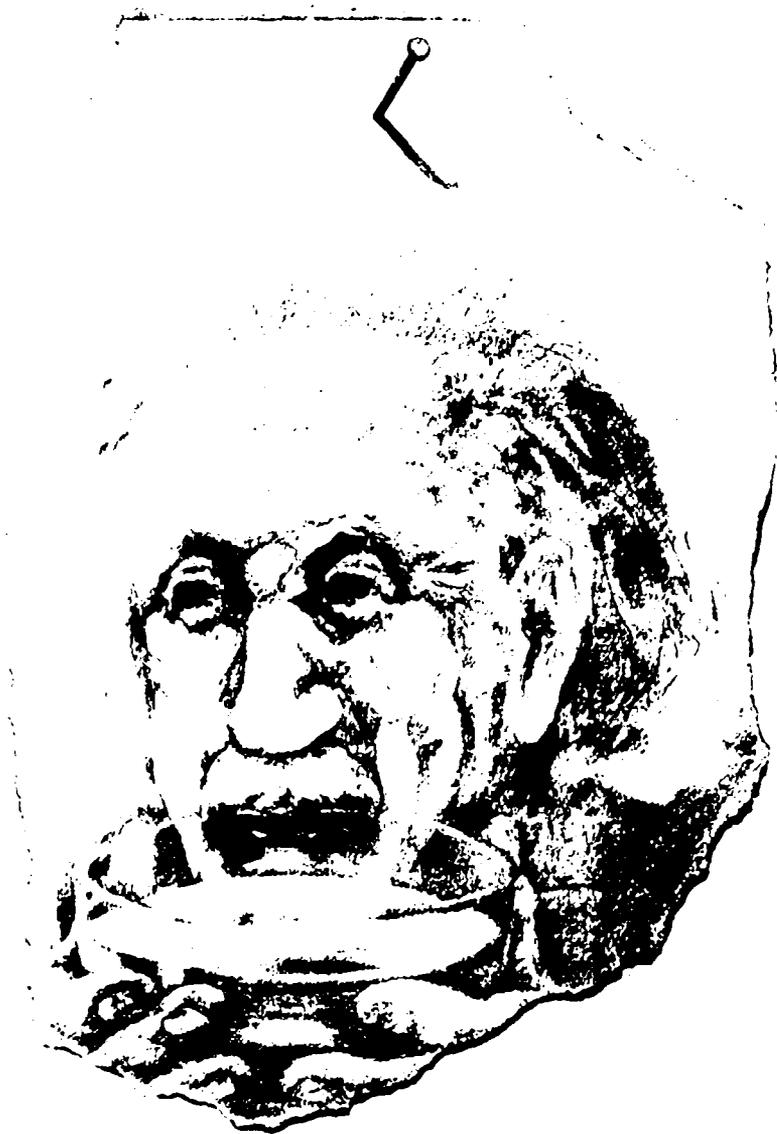


Рис. 25.3. Кто это — Альберт Эйнштейн или три купальщицы?

на области глаз, и вот мы видим сначала головы, а затем и фигуры трех «купальщиц». Этим портретом мы открываем краткий экскурс в царство двойных картинок, которые уже много лет привлекают психологов.

## 26. Очарование амбивалентности

Изображения, о которых здесь пойдет речь, известны еще с римских времен, в чем можно убедиться, взглянув на рис. 26.1. Читатель, безусловно, сумеет разглядеть в этой статуэтке и старую женщину, и влюбленную пару. С другим примером подобной двойственности мы уже неоднократно встречались на страницах этой книги (рис. 26.2). Полагая, что фон черный, мы видим на нем вазу, если же фоном счесть белый, то на этом же рисунке обнаруживаются два черных профиля. Еще один пример двойственного изображения — «Рынок рабов» Сальвадора Дали (1940 г.), помещенный на рис. 26.3. Среди прочих, хорошо известных психологам примеров и портрет женщины (молодой или старой?), и таинственное животное (утка или заяц?), и человеческое лицо, с легкостью переходящее в мышь



Рис. 26.1. Древняя амбивалентная фигура: влюбленная пара или старая женщина?

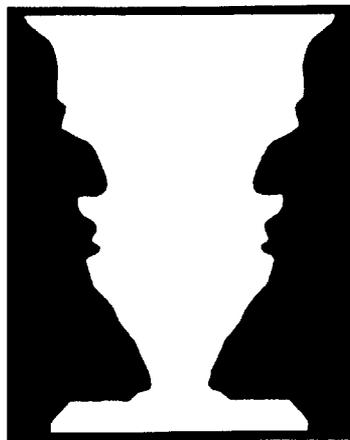


Рис. 26.2. Ваза или два лица?

(рис. 26.4–26.6). Всякий раз мы имеем дело с возможностью различных интерпретаций одного и того же изображения. Существуют, кроме того, картинки, эффект двойственности которых основывается на законах перспективы. На рис. 26.7 изображен так называемый куб Некера, передняя грань которого может вдруг стать задней, и наоборот. Похожим свойством обладают и очки на рис. 26.8, внизу. Исследуя восприятие всех этих двойных картинок, мы приходим к одному очень важному заключению, а именно — невозможно удерживать внимание на любом из «вариантов» интерпретации такой картинки дольше нескольких секунд. Например, разглядывая в течение некоторого времени белую вазу на рис. 26.2, мы вдруг осознаем, что вазы больше нет, а вместо нее на рисунке — два черных профиля; затем они пропадают, вернув на место белую вазу, но вскоре вновь возвращаются и т. д., причем происходит все это совершенно произвольно. Один из уже упоминавшихся ранее основоположников гештальтпсихологии, Вольфганг Кёлер, объяснял эту особенность человеческого восприятия насыщением внимания. Как только мы распознаем изображение вазы, внимание автоматически переключается, и на месте вазы возникают лица; затем и они оказываются распознанными, внимание снова переключается на восприятие вазы и т. д. Кёлер даже предложил для объяснения этого эффекта особую физическую модель, которая, однако, не соответствует современным представлениям об устройстве и принципах функционирования нейронов. Ниже мы рассмотрим иную модель, которая включает в себя и эффект насыщения внимания, причем таким образом, который позволит нам провести



Рис. 26.3. Что вы видите сначала: бюст Вольтера или рынок рабов? (Фрагмент картины Сальвадора Дали)

детальное (т. е. количественное) сравнение нашей компьютерной модели с имеющимися результатами психофизических экспериментов.

Сложность заключается в том, что для получения сколько-нибудь надежных количественных результатов нам необходимы экспериментальные данные, отвечающие одному неперемемному требованию, а именно — время восприятия альтернативного образа должно быть (для данного испытуемого, данной картинки и при прочих равных условиях) по возможности постоянным. Кроме того, приходится учитывать и то, что время восприятия образов различными людьми может очень существенно варьироваться. Как следствие разные авторы приводят весьма различные цифры, согласно которым время восприятия альтернативного образа колеблется от 1,5 до 5,7 с. И это при том, что сообщаемые упомянутыми авторами данные



Рис. 26.4. Молодая девушка  
или старуха?

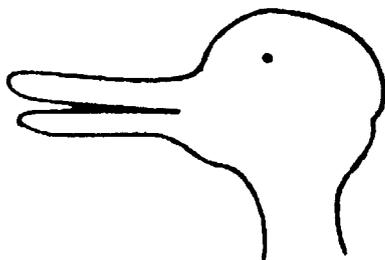


Рис. 26.5. Утка или заяц?



Рис. 26.6. Лицо или мышь?

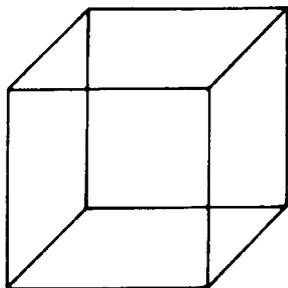


Рис. 26.7. Куб Некера

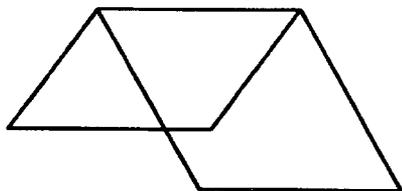
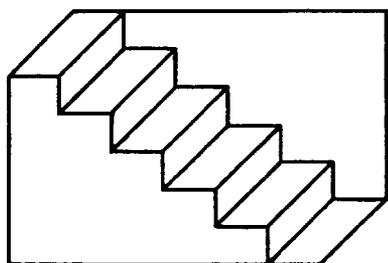


Рис. 26.8. Сверху вниз: лестница, видимая снизу или сверху; согнутый лист бумаги — которая его половина ближе к нам (левая или правая)?; очки, развернутые к нам стеклами или дужками

основаны, как правило, на очень хороших в статистическом смысле выборках (Х.Грезер, например, обследовал 133 испытуемых, которым было предложено 48 различных образов).

Следует также отметить, что выбор между двумя различными интерпретациями не всегда оказывается равнозначным. Так, например, при рассмотрении картинки, помещенной на рис. 26.4, образу «молодая девушка» испытуемые отдают явное предпочтение. Как именно будет воспринято данное изображение, и какой из образов возникнет первым («молодая девушка» или «старуха»), может зависеть и от случайных факторов, и от личностных особенностей самих испытуемых; однако если опросить достаточно большое количество испытуемых, можно получить некоторое представление о том, что же люди предпочитают видеть первым в каждой конкретной двойной картинке. Таким образом было, например, установлено процентное соотношение для данного случая: 60% испытуемых видят сначала «молодую девушку» и только 40% — «старуху». Затем происходит переключение, и «молодую девушку» сменяет «старуха», и наоборот. При этом более «сильный» из образов воспринимается в течение более продолжительного отрезка времени. Возможны также пограничные случаи, когда один из образов доминирует настолько явно, что переключения восприятия вообще не происходит.

Психологи обнаружили существование еще одного важного свойства восприятия двойных картинок: общий период, т. е. сумма временных промежутков, в течение которых воспринимается тот или иной образ, увеличивается, если один из образов оказывается «сильнее». Если же оба альтернативных варианта в равной степени значимы, то наблюдается самый короткий общий период. При этом, впрочем, следует принять во внимание, что результат может зависеть и от того, что испытуемые видели непосредственно перед опытом. Когда одной из групп испытуемых показывали сначала рисунок 26.9 (а), а лишь затем рисунок 26.4, все видели первой молодую девушку. Другой группе сначала показывали рисунок 26.9 (б), и 94% испытуемых этой группы на рис. 26.4 первой видели старуху. Без предварительной подготовки, как уже упоминалось, «голоса» как правило, разделяются следующим образом: 40% видят первой «старуху», и 60% — «молодую девушку».

Если точно определить время, затраченное в каждом случае на восприятие, то обнаружится, что в начале этого «возвратно-поступательного» процесса имеется нечто вроде переходной фазы, которая может длиться от одной до трех минут. В течение этой фазы период восприятия одного образа значительно длиннее, чем впоследствии, когда начинаются осцилляции.



Рис. 26.9. Усиление одного из альтернативных образов. (а) «Молодая девушка». (б) «Старуха»

Возникает естественный вопрос: нельзя ли волевым усилием задержать переход от одного образа к другому? На этот вопрос имеется полученный опытным путем ответ: таким образом действительно можно до некоторой степени повлиять на продолжительность какой-либо из фаз, однако это, в сущности, ничего не изменит, и переход все рано произойдет.

Для завершения картины вспомним еще об одном эффекте, о котором мы уже говорили ранее, а именно — о гистерезисе (рис. 2.18 и 2.19). В случае, представленном на этих иллюстрациях, переход от одной интерпретации к другой происходит в различных местах последовательности картинок, в зависимости от того, с какого конца мы рассматриваем эту самую последовательность.

## 27. Восприятие двойных картинок в компьютерной модели

Прежде чем перейти к подробностям, попытаемся смоделировать восприятие двойных картинок посредством синергетического компьютера. Первый вопрос, естественно, касается того, как в общем случае может протекать процесс восприятия таких сложных изображений, при котором «побеждает» то один образ, то другой. Здесь нам на помощь приходит по-

нятие параметра порядка, который способен ощутимо сократить тот огромный объем информации, что мы получаем от каждой отдельной картинки. Мы уже видели, как параметр порядка может управлять процессом распознавания человеческих лиц или иных объектов. При опознании нами, например, лица соответствующий ему параметр порядка достигает максимального значения, которое мы можем принять за единицу. Значения параметров порядка, соответствующих остальным хранящимся в памяти лицам, равны в этом случае нулю. Рассмотрим в качестве конкретного примера рисунок 26.2: если мы распознали образ «ваза», следовательно, соответствующий ему параметр порядка получает значение 1, если же мы видим профили лиц, значит здесь «сработал» другой параметр порядка, и значение 1 мы должны присвоить уже ему, в то время как параметр порядка, соответствующий вазе, оказывается равным нулю.

Динамику процесса восприятия двойной картинки можно, таким образом, свести к динамике параметра порядка, хотя и не полностью; как читатель уже, несомненно, отметил, в описанной схеме отсутствует такое понятие, как насыщенность внимания. Каждому воспринимаемому образу, будь то ваза или лица, следует поставить в соответствие некоторый параметр внимания, как мы уже делали в главе 25 при рассмотрении распознавания сложных сцен. В общем случае мы можем исходить из того, что оба параметра внимания изначально равны; однако как только один из образов (например, ваза) оказывается распознан, величина соответствующего параметра порядка очень быстро достигает своего максимального значения, равного единице. Учитывая гипотетический эффект насыщения внимания, можно предположить, что величина параметра внимания должна изменяться обратно пропорционально величине параметра порядка, т. е. уменьшаться при увеличении параметра порядка. Таким образом, по прошествии некоторого времени восприятие образа «ваза» становится для мозга — или нашего компьютера — невозможным, тогда как вероятность восприятия альтернативного образа (в данном случае, профилей лиц), напротив, увеличивается. И вот наступает момент, когда наблюдатель вместо вазы начинает видеть лица, причем параметр порядка, соответствующий «лицам», также подвержен воздействию эффекта насыщения внимания, что приводит, со всей очевидностью, к постоянной смене воспринимаемых образов. Результаты, показанные нашей компьютерной моделью, представлены на рис. 27.1. В верхней части рисунка помещен график, отражающий изменение величины параметра порядка при рассматривании рис. 26.2 (ваза и профили). Когда первый параметр порядка равен 1, воспринимается образ «ваза» (сплошная линия); пунктирная линия демонстрирует поведение па-

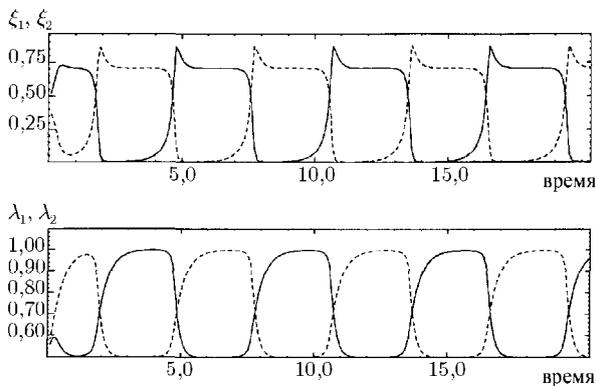


Рис. 27.1. Осцилляции восприятия (компьютерная модель). Сверху: изменения параметров порядка при распознавании альтернативных образов «двойной картинкой» (рис. 26.2); сплошной линией показан параметр порядка, соответствующий вазе, пунктирной — двум лицам. Внизу: соответствующие осцилляции параметров внимания

раметра порядка для образа «профили». В нижней части рисунка показано изменение в ходе эксперимента параметра внимания. В обоих случаях ярко выражена осцилляция, соответствующая смене воспринимаемых образов.

Содержание восприятия при рассматривании двойственных изображений непостоянно (что выражается в различном процентном соотношении между количествами испытуемых, распознавших первым тот или иной образ); эти различия учитываются в уравнениях для параметра порядка. Наглядно это довольно легко представить в виде потенциального холмистого ландшафта (рис. 19.1). В таком ландшафте каждому из воспринимаемых образов соответствует некая долина. Если у обоих образов имеются равные шансы быть распознанными в первую очередь, то долины симметричны относительно разделяющего их холма. Если же — как в рассматриваемом случае — шансы эти не равны, то расположение долин оказывается асимметричным. Возникает естественный вопрос, насколько сильной может быть такая асимметрия? Предлагается следующий возможный образ действий: сначала, исходя из экспериментально установленного процентного выражения вероятности распознавания первым того или иного образ, следует определить положение потенциального холма. Определив его и вычислив с помощью соответствующих уравнений время переключения, мы сможем определить величину временного интервала, на который время восприятия

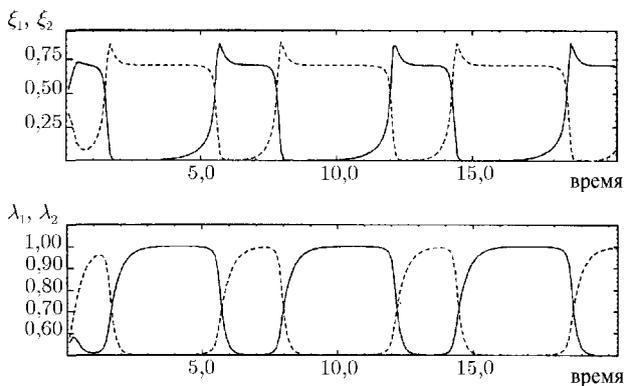


Рис. 27.2. То же, что и на рис. 27.1, но для случая, когда один из образов (сплошная линия) доминирует над другим (пунктирная линия)

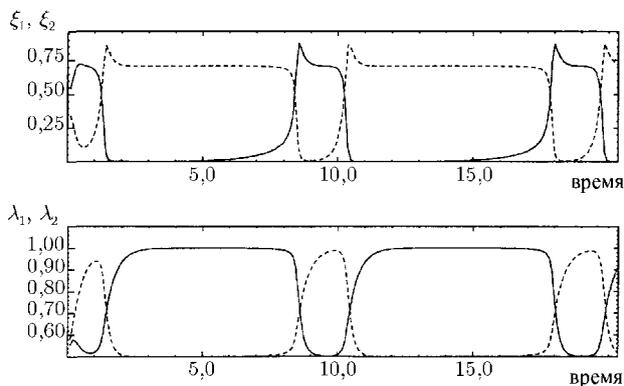


Рис. 27.3. То же, что и на рис. 27.2, но для случая еще более выраженного предпочтения одного из образов (сплошная линия)

распознаваемого первым образа больше времени восприятия альтернативного образа; отметим, что полученные нами результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными. Примеры таких удлинённых периодов восприятия первого образа даны на рис. 27.2 и 27.3; приведены кривые изменения как параметра порядка, так и параметра внимания. При большем нарушении симметрии холмистого ландшафта возможно возникновение такой ситуации, когда может быть распознан только один из образов. Можно

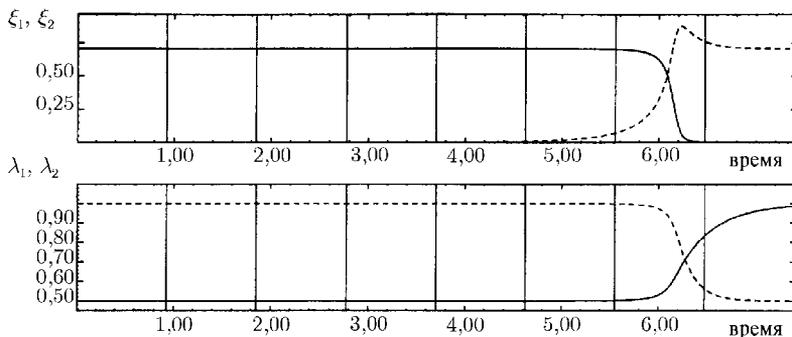


Рис. 27.4. Моделирование эффекта гистерезиса на синергетическом компьютере (по горизонтальной оси отложено время, по вертикальной — значение параметра порядка). Сплошной линией показан параметр порядка, соответствующий мужскому лицу на рис. 2.18, пунктирной линией — параметр порядка, соответствующий изображению девушки. В определенный момент времени (6,00 в данном масштабе) происходит смена одного образа другим

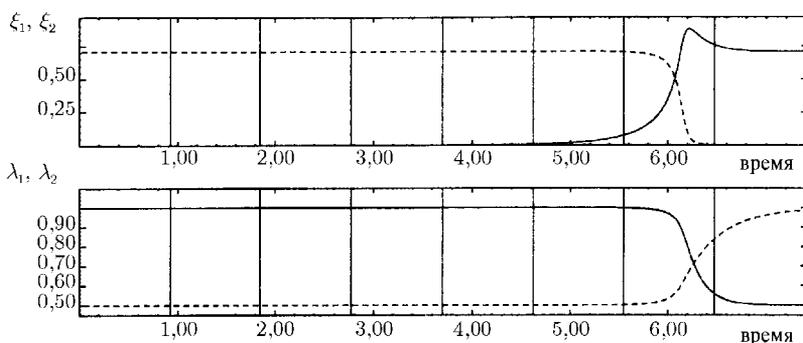


Рис. 27.5. То же, что и на рис. 27.4, но для обратного порядка рассмотрения изображений (от девушки к мужчине)

сказать, что время восприятия такого образа бесконечно велико; у второго же образа не остается ни единого шанса на распознавание.

Исходя из тех же соображений, можно рассмотреть и эффект гистерезиса. Величина сдвига потенциального холма определяется тем, какой из образов двойственного изображения будет распознан первым — при этом устанавливается так называемая предубежденность. Если на верхнем слева

рисунке (рис. 2.18) мы видим мужчину, то этот вариант восприятия изображения получит преимущество перед альтернативным образом; и только когда существование этого второго образа (т. е. девушки) становится совершенно очевидным, упомянутая предубежденность до некоторой степени разрушается, и мы получаем возможность распознать в изображении «девушку». То же самое происходит и тогда, когда мы рассматриваем рис. 2.18, начиная с правого нижнего изображения: первым воспринятым образом оказывается в этом случае как раз образ «девушки», и замена этого образа альтернативным произойдет лишь значительно позднее. Результаты моделирования этих гистерезисных процессов представлены на рис. 27.4 и 27.5. Видно, что смена образа происходит в различные моменты времени, в зависимости от того, с которого из образов начать.

## 28. Колебания периодов восприятия

Как это часто происходит с периодическими биологическими процессами, временные промежутки между соседними сменами образа не установлены точно раз и навсегда, но подвержены флуктуациям. Такие флуктуации весьма интересуют психологов, равно как и ответ на вопрос: от чего, собственно, могут зависеть эти отклонения? Особенно выделяется здесь эксперимент, проведенный А. Борзеллино и его коллегами. Испытуемым предлагался к рассмотрению куб Некера (с этим кубом мы уже встречались, например, на рис. 26.7). Борзеллино изучал закономерности в изменениях величины периода между сменами образа (передней грани куба на заднюю). Испытуемым предъявлялись кубы различных размеров, при этом было сделано удивительное открытие: чем больше был куб, тем сильнее оказывались отклонения в продолжительности временных интервалов восприятия того или другого образа.

В рамках компьютерной модели интересующий нас вопрос можно уточнить: чем могут быть вызваны эти колебания во времени, если в каждом конкретном случае доминирует один и тот же параметр порядка? Ответ однозначен: колебания при восприятии обусловлены колебаниями параметра внимания. По всей видимости, на маленьком кубе внимание концентрируется лучше, нежели на большом; возможно, это объясняется тем, что при восприятии большого изображения глаз вынужден совершать большее количество движений, вследствие чего параметр внимания оказывается подвержен значительным изменениям. Наша модель воспроизводит распределение длин периодов восприятия, полученных в ходе экспериментов Борзелли-

но, и подтверждает тот факт, что существуют, если можно так выразиться, «быстрые» и «медленные» наблюдатели, т. е. люди, чье восприятие характеризуется, соответственно, краткими или долгими временными периодами между сменами образа.

## 29. Восприятие двойственных изображений как зеркало эмоций

Нам кажется, было бы заблуждением считать занятия двойными картинками просто игрой — скорее, это своего рода искусство, которое вполне способно помочь проникнуть в тайну восприятия нами окружающего мира. Мы все больше склоняемся к убеждению, что в этом процессе исключительно важную — можно даже сказать, центральную — роль играет внимание; это подтверждается и экспериментальными данными, полученными в ходе исследования процессов распознавания образов. Мы рассказывали об этом в главе 25, посвященной распознаванию сложных сцен, и в главах, описывающих опыты с двойственными изображениями. Такие исследования являют собой широкое поле деятельности как для психологов (и, возможно, психиатров) — с одной стороны, так и для теоретиков, занятых в создании и отладке компьютерных моделей — с другой. Как известно, внимание очень сильно зависит и от предшествующего опыта индивидуума, и от его эмоционального состояния в данный момент, и от многих других факторов. Есть надежда, что на основании измерений периодов обращения при восприятии двойственных изображений теми или иными испытуемыми можно судить об их эмоциональном состоянии или — как в тестах Роршаха — об их внутренних предубеждениях. Известный пример тому — картина, помещенная на рис. 29.1. При ее обсуждении мы будем говорить не столько о флуктуациях собственно параметра внимания, сколько о нарушении симметрии в восприятии данного изображения, вызванном изменениями эмоционального состояния личности.

Картина была изначально задумана так, чтобы две изображенные на ней женщины выглядели по отношению одна к другой подчеркнута индифферентно. Интерпретация взаимоотношений этих женщин целиком зависит от внутренних установок испытуемого: так, например, старушка может казаться «недоверчивой» или «озабоченной». Это приводит к нарушению симметрии — в синергетическом смысле; будучи в действительности нейтральной, т. е. симметричной, картина оказывается в процессе восприятия наделена неким эмоционально окрашенным содержанием. Наверняка было



Рис. 29.1. Нарушение симметрии при восприятии. Картина была изначально задумана так, чтобы две изображенные на ней женщины выглядели по отношению одна к другой подчеркнуто нейтрально. Интерпретация взаимоотношений этих женщин целиком зависит от внутренних установок испытуемого

бы интересно исследовать зависимость изменений в интерпретации выражений лиц изображенных здесь женщин от эмоционального состояния испытуемого, как это было сделано в случае с «девушкой» и «старухой» с рис. 26.4. Отсюда лишь один короткий шаг до концепции ментальных репрезентаций или, возможно, точнее будет назвать их картинками, увиденными внутренним — мысленным — взглядом. Таким образом, мы снова возвращаемся к параметру внимания, благодаря которому становится возможным собственно процесс распознавания определенных образов, причем немногих исходных отличительных черт оказывается достаточно, чтобы воссоздать все изображение целиком. Внимание выступает в роли, если можно так выразиться, внутреннего прожектора, высвечивающего все новые и новые смыслы в том, что мы видим и осознаем.

### 30. Восприятие движения человеком и компьютером

Люди способны передвигаться множеством различных способов: идти, бежать, прыгать, а кроме того, пританцовывать или, если они не совсем здоровы, ковылять. Лошади демонстрируют несколько различных аллюров:

шаг, рысь, галоп и т. д. В каждом из этих случаев движения конечностей скоординированы определенным особенным образом. Люди не только оказываются способны к самым разнообразным движениям, они еще и развили в себе способность тонко различать многочисленные особенности движения: мы можем, например, уже издалека узнать человека по походке. Особенно наглядное подтверждение этой способности дает эксперимент, проведенный в 40-х годах Г. Йоханссоном. Он укрепил на суставах испытуемого маленькие лампочки, а затем снял на пленку различные движения испытуемого в темном помещении. На диапозитивах, сделанных с этой пленки, были видны, естественно, лишь неподвижные светлые точки, глядя на которые никто из участников эксперимента не мог определить их истинного смысла. Однако при демонстрации самого фильма все сразу понимали, что же означают эти движущиеся светящиеся точки: вот кто-то идет, вот бежит, вот поднимает какой-то груз (кое-кто мог даже определить по одному лишь движению точек, насколько этот груз велик). По мнению известного психолога Михаэля Штадлера, таким способом можно узнать по походке даже пол человека, т. е. по движению снятых на пленку светящихся точек понять, мужчина идет или женщина. Каким же образом человеческому мозгу удается не только распознать движение вообще, но и различить столь тонкие его особенности? Возможно ли создать компьютер, который обладал бы такими же способностями?

Попытаемся сначала ответить на первый вопрос. Рассматривая процесс зрительного восприятия, можно представить себе, что каждый участок воспринимаемой картины прежде всего «проверяется» на наличие в нем движущихся элементов. Очень тщательные исследования этого этапа восприятия были проведены Вернером Райхардтом. Эксперименты он проводил на существах, сильно уступающих человеку в сложности организации — проще говоря, на обычных мухах. Как показывают полученные Райхардтом результаты и их теоретические обоснования, у мух имеются специальные детекторы движения, которые способны определить, насколько быстро и в каком направлении движется воспринимаемый объект. И хотя природа аналогичных детекторов у человека еще не до конца разгадана, мы все же можем предполагать, что наша зрительная система также располагает такого рода способностями.

При восприятии паттернов движения отдельные локальные двигательные впечатления сводятся в единую целостную картину. У ученых пока нет однозначного ответа на вопрос, как это происходит. Тем интереснее становится выяснить, сможет ли наш компьютер распознать и отличить друг от друга различные двигательные процессы.



Рис. 30.1. Стробоскопическая картина движения лампочек

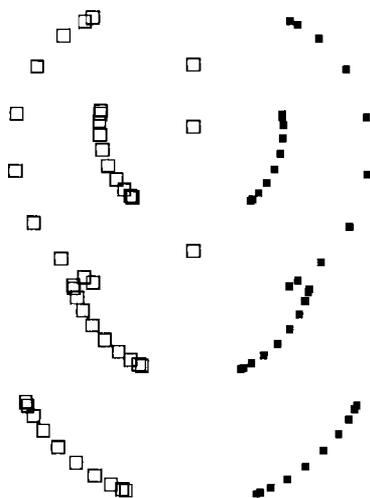


Рис. 30.2. Стробоскопическая картина движения другого типа

Как мы вскоре убедимся, синергетический компьютер действительно способен и распознать объект в движении, и отличить друг от друга различные объекты по характерным для каждого из них особенностям однотипного движения; однако предварительное программирование оказывается весьма и весьма трудоемким, что наталкивает нас на мысль о том, что человеческий мозг, по всей видимости, располагает каким-то более «острым» способом решения подобных задач. Окончательной ясности в этом вопросе также нет, и новые идеи только приветствуются.

Остановимся пока что на решении, имеющемся в нашем распоряжении уже сейчас. При этом будем исходить из следующего начального условия: предположим, что люди с закрепленными на их суставах лампочками движутся в одной плоскости, причем линия взгляда наблюдателя перпендикулярна этой плоскости. Как вообще возможно только на основании видимых движений лампочек сделать вывод, что перед нами движущийся человек? Единственное, что нам изначально доподлинно известно — это то, что светящиеся точки, соответствующие суставам одной конечности (например, плечевому и локтевому суставу), должны находиться на неизменном расстоянии друг от друга, ведь длина плеча или предплечья во время движения не может измениться. Нет ничего сложного в том, чтобы велеть компьюте-

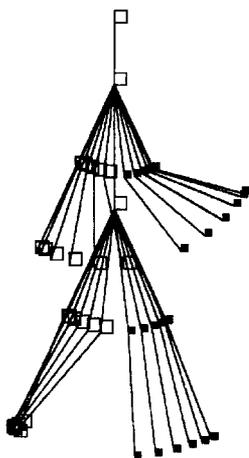


Рис. 30.3. Реконструкция условной фигуры движущегося человека по стробоскопической картине на рис. 30.1

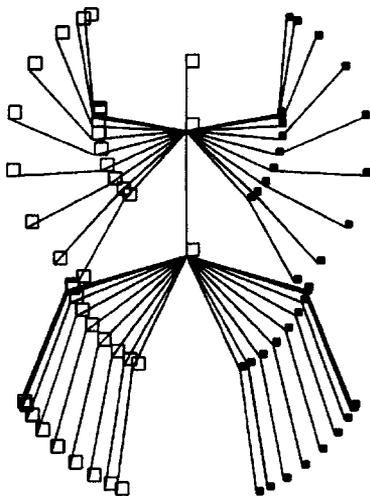


Рис. 30.4. Реконструкция условной фигуры движущегося человека по стробоскопической картине на рис. 30.2

ру рассортировать все светящиеся точки, исходя из их «принадлежности» к той или иной части тела. При этом, разумеется, предполагается, что отдельные точки движутся, иначе будет невозможно определить, сохраняют ли они постоянное расстояние между собой во время движения. Компьютеру довольно быстро удается «собрать» из отдельных точек, показанных на рис. 30.1 и 30.2, соответствующую условную фигурку (см. рис. 30.3 и 30.4). Следующим шагом компьютера стало определение углов при каждом суставе; результат можно видеть на рис. 30.5. Во время движения величины некоторых углов, естественно, изменяются (например, углы при коленях, локтях, плечах). Для каждого типа поступательного движения характерна особая корреляция между этими углами: при ходьбе, скажем, мы размахиваем руками в противофазе с движением одноименных ног.

Тип движения, таким образом, можно определить через совокупность временных характеристик всех этих углов. Если рассматривать течение времени как непрерывный процесс, то для описания каждого типа движения потребуется бесконечно большой набор данных. Каждому моменту времени мы должны поставить в соответствие определенный угол, а поскольку в

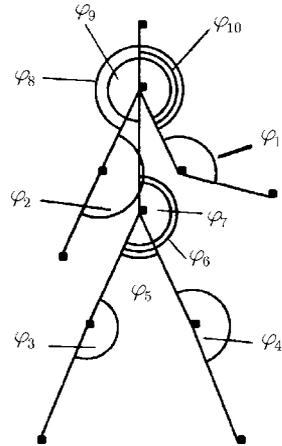


Рис. 30.5. Определение углов при отдельных суставах

рассматриваемом случае нам придется иметь дело с бесконечным количеством моментов времени (поскольку течение времени непрерывно), в итоге мы получим бесконечно большое количество данных (или бит). Очевидно, следует каким-то образом значительно уменьшить объем необходимой для описания движения информации. Такое уменьшение вполне возможно, если применить тот же способ, что мы уже использовали при распознавании смещенных, деформированных и профильтрованных изображений. Представим кривую изменения угла в зависимости от времени в виде суммы отдельных волновых составляющих, т. е. произведем анализ Фурье. При этом каждая составляющая может быть полностью описана своей амплитудой и фазой. Для воспроизведения характера изменения угла, оказывается достаточно задать амплитуды и фазы лишь нескольких волновых составляющих соответствующего разложения.

Таким образом, нам удастся получить необходимый и достаточный способ кодировки двигательного процесса, который мы можем ввести в наш компьютер. Так же, как мы описывали изображение через распределение уровней серого в отдельных его ячейках — пикселях, можно описать и процесс движения, задав совокупность амплитуд и фаз волновых составляющих, взятых нами для данного конкретного случая движения. Далее мы можем сохранить определенные прототипы (ходьба, бег и т. д.) в памяти компьютера и предложить ему для распознавания какой-нибудь предварительно обработанный образ. Пусть это будет, к примеру, мужчина, который хотя и бежит, но делает это иначе, чем этот тип движения описан в запомнен-

ных компьютером прототипах. Так мы сможем, с одной стороны, провести категоризацию различных типов движения, а с другой стороны, — аналогично тому, как мы вводили тонкие различия при распознавании компьютером выражений лица различных людей — определить характерные различия, на основании которых компьютер сможет впоследствии различать людей по походке (или, например, отличать прихрамывающего человека от здорового).

До сих пор мы исходили из условия, что человек с лампочками на суставах движется в плоскости, перпендикулярной линии взгляда наблюдателя. С помощью несложных геометрических соотношений можно научить компьютер распознавать движения, совершающиеся в какой-либо другой плоскости и даже в том случае, когда движущийся человек поворачивается. Так как при этом не происходит ничего принципиально нового, мы, пожалуй, ограничимся простой констатацией возможности распознавания компьютером такого движущихся объектов. Как продемонстрировали М. Штадлер и его коллеги (с помощью другой программы), компьютер также оказывается в состоянии отличить по походке мужчину от женщины.

Читатель, конечно же, обратил внимание на то, что применение синергетического компьютера требует целого ряда предварительных этапов обработки, которые нужно программировать. В то же время нам доподлинно известно, что человеческий мозг ни в каких программах не нуждается и обходится при построении своих нервных связей собственными силами; как же быть с самоорганизацией восприятия паттернов движения? Этот вопрос, насколько нам известно, еще не решен, хотя мы недавно разработали концепцию новой нейронной сети в дополнение к синергетическому компьютеру. Если такой системе демонстрировать все новые и новые типы движения, она обучается самостоятельно осуществлять их предварительную обработку и последующее распознавание. Однако все эти исследования еще слишком далеки от завершения, и окончательные выводы делать пока рано.

В этой и предыдущих главах мы говорили о синергетическом компьютере и результатах его деятельности. Теперь же, для полноты картины, рассмотрим и другую концепцию — нейрокомпьютер.

## **31. Нейрокомпьютер: традиционный путь**

Название говорит само за себя: нейрокомпьютер (т. е. нейронный компьютер) — это конструкция, составленная из отдельных нейронов; примером может служить человеческий мозг. Следует подчеркнуть, что при рас-

смотрении подобного «устройства», нам придется смириться с огромным количеством упрощений — на что иные поклонники нейрокомпьютеров, конечно же, легко смогут закрыть глаза. В отличие от человеческого мозга, насчитывающего почти сотней миллиардов нейронов, нейрокомпьютеры располагают максимум несколькими тысячами — как в аппаратной реализации, так и при программном моделировании на обычных последовательных компьютерах. Нейроны человеческого мозга могут относиться к различным типам и сами по себе являются весьма сложными образованиями; «нейроны» же нейрокомпьютера представляют собой в высшей степени простые переключательные элементы, наделенные все же некоторыми важнейшими свойствами, присущими настоящим нейронам. Что касается принципов, на которых основаны современные нейрокомпьютеры, то они заложены в фундаментальной работе У. С. Мак-Каллока и У. Г. Питса, опубликованной в 1943 году. Авторы выдвинули предположение, что нейронная сеть состоит из отдельных связанных друг с другом элементов, способных обмениваться сигналами. Каждый элемент должен иметь только два состояния: состояние покоя и состояние возбуждения. В первом случае элемент не посылает никаких сигналов, во втором же — посылает сигналы определенной силы. Если сумма входящих, принятых нейроном сигналов оказывается ниже некоторого порогового значения, то нейрон остается в состоянии покоя, в противном же случае он переходит в возбужденное состояние (рис. 31.1).

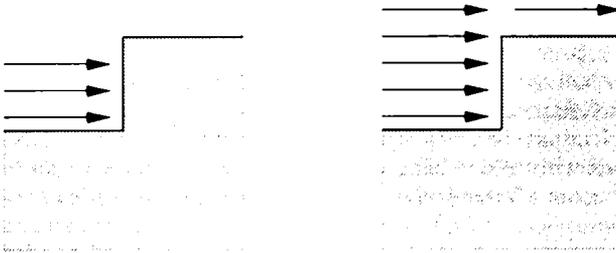


Рис. 31.1. Представление свойств модельного нейрона с двумя состояниями. Если сумма поступающих слева сигналов меньше порогового значения, то нейрон остается в исходном состоянии (слева). Как только сумма сигналов выходит за пороговое значение, нейрон переходит в возбужденное состояние и может генерировать импульс (справа)

Мак-Каллок и Питс смогли продемонстрировать, что такая сеть из связанных между собой модельных нейронов, обменивающихся сигналами,

вполне способна реализовать все логические операции, или связей (среди них, в частности, можно упомянуть такие операции, как «И» и «ИЛИ»). Для специалистов заметим, что в общем случае способности такой сети охватывают все операции булевой алгебры. Концепция Мак-Каллока и Питса легла в основу модели, созданной Р. Розенблаттом и названной им «перцептроном». Розенблатт же и занимался обучением своей машины.

В США правит бал жесткая конкуренция, и научные круги не являются исключением. В то время в рамках имеющегося спроса на проведение исследований по искусственному интеллекту были изысканы средства — прежде всего из военного бюджета — которые и распределили между разработчиками так называемых последовательного и параллельного компьютеров. В последовательных компьютерах, к которым можно отнести все механические вычислительные машины, а также почти все существовавшие уже тогда и используемые в наши дни электронные компьютеры, все операции производятся последовательно. И вот после того, как в 50-е годы выяснилось, что такие вычислительные машины могут обрабатывать не только числа, но и символы — на что способен любой современный «текстовый редактор» — казалось, что наконец-то пробил час искусственного интеллекта. Ведь ведущие представители этой новой отрасли науки единодушно утверждали, что человеческое мышление представляет собой не что иное, как совокупность последовательных процессов обработки символов.

Другим путем пошли разработчики параллельного компьютера (в частности, прежде всего, нейрокомпьютера), обрабатывающего информацию не последовательно, а одновременно, т. е. параллельно. В те времена было еще сложно предсказать, какая из компьютерных концепций имеет больше шансов на успех. Однако вскоре параллельному компьютеру в лице перцептрона был нанесен сокрушительный удар, и нанес его Марвин Мински в своей книге «Вычисление: конечные и бесконечные машины»<sup>2</sup> (в сотрудничестве с С. Пейпертом). В книге, в частности, говорилось о том, что перцептрон, среди прочего, оказывается не в состоянии выполнить некую логическую операцию (так называемую операцию исключаящего «ИЛИ»). Операция исключаящего «ИЛИ» заключается в том, что если два входных сигнала имеют одинаковое значение, то на выходе должен получиться нуль, единицу же на выходе получаем только тогда, когда одно из входных значений равно единице, а другое — нулю. Дальнейшие разработки перцептрона были в результате прекращены, и о нем позабыли все, кроме немногих энтузиастов.

---

<sup>2</sup>Marvin L. Minsky. *Computation: Finite and Infinite Machines*, 1967.

Триумфальное возвращение нейронных сетей состоялось только в начале 80-х, когда наши представления о составляющих их элементах (т. е. нейронах) претерпели некоторые изменения, вследствие чего проблема исключающего «ИЛИ» оказалась весьма просто решаемой. Одно из изменений заключалось в том, что ступенчатая зависимость от порогового значения, допускавшая только значения «1» и «0» (или «да» и «нет»), была заменена гладкой S-образной кривой (рис. 31.2). Смысл такого изменения нагляднее всего можно представить так: на месте прежнего жесткого «да» или «нет» появилось теперь более мягкое «возможно». Иными словами, нейрон может генерировать импульс и тогда, когда сумма входящих сигналов окажется ниже порогового значения; когда же сумма входящих сигналов превысит пороговое значение, нейрон вовсе не обязательно немедленно перейдет в возбужденное состояние. Кроме того, однослойная сеть перцептрона была заменена трехслойной (см. рис. 31.3).

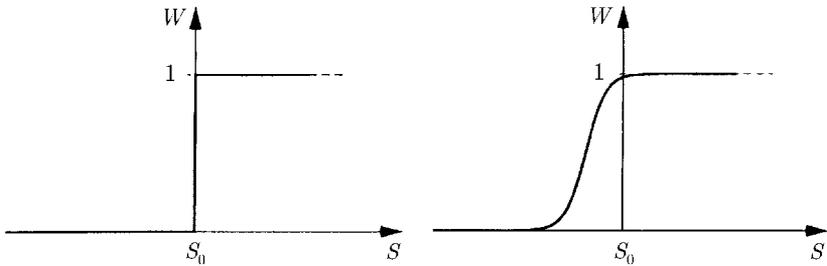


Рис. 31.2. Так называемая пороговая кривая. По горизонтали отложена величина поступающего сигнала  $S$ ; при этом  $S_0$  — пороговое значение. По вертикальной оси отложена вероятность, с какой нейрон при получении сигнала соответствующей силы перейдет в возбужденное состояние. Слева: если  $S < S_0$ , то вероятность перехода равна нулю; при  $S > S_0$  вероятность скачкообразно возрастает до единицы, т. е. нейрон обязательно переходит в возбужденное состояние. Справа: здесь скачок кривой отсутствует, а изменение происходит плавно. Уже при некотором  $S < S_0$  нейрон может с ненулевой вероятностью перейти в возбужденное состояние. Когда же сила сигнала превышает  $S_0$ , нейрон не обязательно переходит в возбужденное состояние, хотя вероятность перехода очень высока

Особенно интересным примером такой сети является так называемый адаптивный фильтр (рис. 31.3), состоящий из входного слоя, слоя с так называемыми скрытыми переменными и выходного слоя. При этом нейроны каждого из слоев, не связанные между собой внутри слоя, связаны

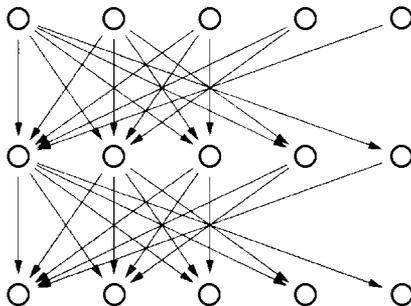


Рис. 31.3. Адаптивный фильтр, состоящий из трех слоев. Нейроны внутри каждого слоя не связаны между собой, но связаны с нейронами других слоев, причем передача сигналов осуществляется только от вышележащего слоя к нижележащему. Модельные нейроны представленного здесь адаптивного фильтра обладают совершенно иными свойствами, нежели модельные нейроны синергетического компьютера

с нейронами других слоев, причем передача осуществляется только от вышележащего слоя к нижележащему. Связи эти характеризуются некоторыми синаптическими силами и могут формироваться в процессе обучения. Смысл же такой конструкции заключается в следующем: на вход фильтра подаются определенные сигналы, при этом заранее задано, что должно получиться на выходе. В каждой отдельной пробе фильтр выдает на выходе некоторое значение, которое затем сравнивается с ожидаемым значением. Если они не совпадают, синаптические силы изменяются до тех пор, пока требуемое совпадение не будет достигнуто. Перед нами, таким образом, сеть, способная к обучению, пусть это обучение и требует присутствия человека.

Одним из наиболее известных случаев такого обучения стал эксперимент Терренса Сейновски, который обучал нейронную сеть чтению текстов на английском языке вслух. Сложность английского языка заключается в том, что произношение отдельных букв не жестко определено, а зависит от позиции, занимаемой буквой в слове и от окружающих ее букв. Так, например, буква «а» в слове «apt» произносится совершенно иначе, чем в слове «ash». Читатель очень легко сможет представить себе процесс такого обучения: на вход нейронной сети подавались все новые и новые написанные слова. По ходу дела определенные подаваемые на вход буквенные комбинации объявлялись «недействительными», а синаптические связи с

соответствующими им нейронами среднего слоя обнулялись; другие буквенные комбинации признавались действительными, в результате чего в выходной слой отправлялся определенный сигнал, который, пройдя через процедуру фонетического кодирования, превращался затем в особом синтезаторе в звуки речи. Поскольку неверное «произношение» исправляется здесь посредством обратной передачи сигнала от нижнего слоя к среднему, и далее к верхнему, такой способ обучения называют также методом обратной передачи (англ. *back propagation*) — следует, впрочем, заметить, что этот принцип открывали уже несколько раз, из чего можно заключить, что он довольно-таки очевиден. Хотя упомянутый принцип сформулирован достаточно четко, его практическое применение связано с рядом неясностей. Каким должно быть количество элементов среднего слоя для решения стоящей перед нами задачи распознавания образов? Как долго продлится процесс обучения? Сколько образов следует сохранить в памяти такой сети для успешного распознавания? Общих характеристик и средних значений здесь недостаточно — для решения конкретных задач необходимы конкретные исходные данные. Как показывают компьютерные испытания, попытка сохранить в такой сети новый образ в дополнение к уже существующим может привести к уничтожению результатов всего предыдущего процесса обучения.

В физике концепция нейронных сетей вызвала особый интерес благодаря исследованиям Джона Хопфилда. В 1981 году Хопфилду удалось показать, что нейронную сеть можно реализовать в модели так называемых спиновых стекол. Небывалый резонанс, вызванный среди физиков работой Хопфилда, интересен и с точки зрения теории науки. Еще до Хопфилда Уильям А. Литтл предложил модель нейронной сети, полностью аналогичную хопфилдовой, однако она осталась почти незамеченной из-за одного своего маленького «недостатка»: она не имела никакого отношения к теории спиновых стекол. Чрезвычайно сложными проблемами, связанными со спиновыми стеклами, занимались многие выдающиеся физики, однако конкретных примеров практической реализации спиновых стекол насчитывалось, к сожалению, до обидного мало. И вот появляется работа Хопфилда, обратившегося к моделированию деятельности мозга и открывшего, тем самым, перед теоретической физикой новые горизонты, связав процессы распознавания с долинами среди «энергетических холмов» — об этой концепции мы, впрочем, уже говорили в 1977 году.

Что же собственно представляют собой эти загадочные спиновые стекла? И что общего у них может быть с нейронными сетями? Подобно тому, как модельные нейроны Мак-Каллока и Питса обладают двумя состояниями-

ми, двумя состояниями характеризуется и спин (который представляет собой не что иное, как миниатюрный магнетик): эти состояния обозначаются как «вверх» и «вниз». В атомах твердого тела локализируются только спины, находящиеся в одинаковых состояниях и вступающие во взаимодействие попарно. При взаимодействии одинаково направленных спинов их энергия увеличивается; то же самое происходит и в магнитах, где, как известно, одноименные полюса отталкиваются, а разноименные притягиваются. Разумеется, в спиновом стекле спины могут находиться в различных состояниях. При этом сила взаимодействия (т.е. увеличение или уменьшение энергии) между двумя спинами (обозначим их через  $j$  и  $h$ ) может изменяться в очень широком диапазоне в зависимости от расположения этих спинов и расстояния между ними (см. рис. 31.4). Можно даже вообразить, что эта сила взаимодействия каким-то образом устанавливается извне, хотя на сегодняшний день осуществить такое воздействие не представляется возможным.

На что же годится сеть, состоящая из таких взаимодействующих спинов? Представим себе, что спины в спиновом стекле расположены так, что образуют в совокупности некий образ — например, прямоугольник, как на рис. 31.5. Взаимодействия между отдельными спинами выберем таким образом, чтобы спиновое стекло находилось в состоянии с минимальной энергией тогда, когда все спины внутри центрального прямоугольника оказываются сориентированы в одном направлении, а все остальные спины — в другом. Теперь вообразим такое состояние спинового стекла, при котором только часть спинов центрального прямоугольника сориентирована в «правильном» направлении — оказавшись в таком состоянии, спиновое стекло будет стремиться достичь состояния с минимальной энергией, при этом все «неправильные» спины внутри прямоугольника развернутся и займут должное положение. Обобщая эту идею, можно сохранить в спиновом стекле некоторое количество образов, выстроив соответствующие конфигурации спинов. Приведя затем такую систему в состояние, соответствующее фрагменту какого-либо образа, мы можем ожидать, что система устремится в самое энергетически выгодное состояние, попутно восстанавливая «предъявленный» фрагмент до полного образа. Можно сказать, что спиновое стекло функционирует как ассоциативная память.

Разумеется, такое «дополнение образа» будет происходить не всякий раз. Существует множество энергетических минимумов, никак не связанных с сохраненными образами, но возможных для спинового стекла. Иными словами, спиновое стекло «обнаруживает» при этом новые образы, которые нам совсем не нужны. Вместо того, чтобы в ответ на имя Алекс Мюллер

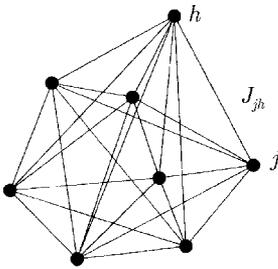


Рис. 31.4. Сеть Хопфилда, между модельными нейронами (спинами) которой действуют определенные силы связи ( $J_{jh}$ )

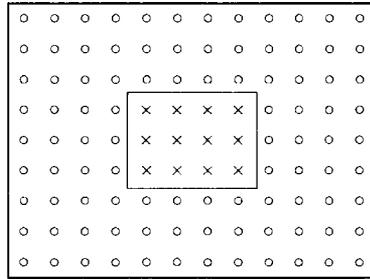


Рис. 31.5. Расположение спинов с сохранением образа центрального прямоугольника. Крестиками обозначены спины, направленные вверх, а кружками — спины, направленные вниз

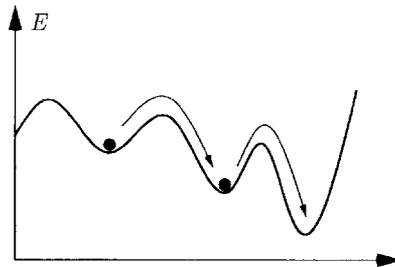


Рис. 31.6. Проявление нежелательных минимумов в распределении энергии в нейрокомпьютере. Горизонтальные координаты соответствуют различным конфигурациям спинов, по вертикали откладывается их энергия  $E$ . Только самый глубокий минимум на кривой распределения энергии действительно соответствует сохраненному образу. Другие минимумы энергии соответствуют нежелательным конфигурациям спинов. Чтобы избежать влияния нежелательных минимумов, используют различные методы, в особенности, так называемую имитацию нагрева, при которой шарик с помощью случайных колебаний в конце концов достигает самого глубокого минимума. Описанный метод требует весьма значительных затрат времени и при этом не гарантирует полного успеха

сообщить нам его верный телефонный номер 8743, спиновое стекло выдает, например, номер 7643. Физиками был разработан целый ряд методов, обеспечивающих относительно надежный переход спиновой сети только в верные и желаемые состояния (например, имитация нагрева). При нагревании кристаллических или аморфных твердых тел (в нашем случае, стекла) тепловое движение атомов становится интенсивнее, т. е. усиливаются случайные колебания отдельных атомов. Такие колебания можно не только моделировать математически, но и «назначать» отдельным спинам компьютерной модели. Но так как энергия спина зависит от его положения (которое, как известно, случайно), в результате случайных колебаний энергия спина может приобрести сколько угодно малое значение. Для решения этой проблемы был разработан своего рода «отладочный» процесс, призванный исключать из рассмотрения нежелательные спиновые конфигурации, соответствующие ложным минимумам энергии, а желательные конфигурации, напротив, погружать в еще более глубокие энергетические ямы (рис. 31.6). Если случайные колебания оказываются слишком велики, может возникнуть и обратный эффект, и поиски пойдут по ложному следу, т. е. система устремится к энергетическому максимуму! Определение нужной величины случайных колебаний (которая, впрочем, еще не раз изменится в процессе поиска энергетического минимума) требует от программиста большого опыта и известной чуткости рук. Едва ли результатом долгой эволюции мозга мог оказаться столь трудоемкий и ненадежный способ.

Подведем итог. Рассмотрев сегодняшнее положение дел в области нейрокомпьютерных исследований, мы обнаружили огромное количество всевозможных трудностей, которые ученым еще предстоит преодолеть. На данный момент не существует общей теории обучения, способной дать ответы на поставленные нами вопросы относительно количества нейронов или скрытых переменных, необходимых нейрокомпьютеру для решения конкретных задач. Неизвестно также, как долго должен длиться процесс обучения и как добиться того, чтобы введение новых данных не разрушало уже достигнутых в обучении результатов. До сих пор нейронные сети располагали лишь относительно небольшим количеством нейронов и, если можно так выразиться, страдали «галлюцинациями» (т. е. нежелательными энергетическими минимумами, о которых мы говорили выше). Наконец, нейрокомпьютеры могут работать только с образами, лишенными оттенков серого (иначе говоря, с образами, состоящими лишь из черных и белых пикселей). Ни одной из перечисленных проблем у синергетического компьютера не возникает. Одно это могло бы стать достаточным основанием для разработки синергетического компьютера как модели мозга. Есть, од-

нако, и более фундаментальная причина. Спиновое стекло представляет собой замкнутую систему, для сохранения состояний которой не требуется ни энергии, ни вещества — иными словами, типичный образчик мертвой материи. Состояния синергетической системы остаются неизменными лишь при условии постоянного притока энергии или вещества, так что она гораздо ближе к системам, функционирующим в живой природе. Вернемся же к синергетическому компьютеру: до сей поры мы держали читателя в неведении относительно возможностей обучения синергетического компьютера, теперь пришло время наверстать упущенное.

## 32. Обучение синергетического компьютера

Как нам известно из главы 7, у людей и животных процессы обучения могут быть сведены к закреплению определенных изменений, происходящих в синапсах. Как же выглядит процесс обучения в случае синергетического компьютера? Для начала отметим, что синергетический компьютер изначально располагает некоторыми заранее установленными силами «синаптических» связей, которые непосредственно определяются из заданных прототипных образов. Об этом мы уже говорили в главе 18. Нет никакого сомнения в том, что в человеческом мозге ничего подобного нет; соединения между синапсами возникают самостоятельно посредством самоорганизации.

Можно ли добиться от синергетического компьютера сколько-нибудь положительных результатов в обучении, поставив его в такие же условия? Принципиально это возможно, однако требует весьма и весьма объемистого математического обоснования, которое в рамках данной книги мы, разумеется, предоставить просто не в состоянии. Именно по этой причине мы и здесь воспользуемся одним очень наглядным представлением, тесно связанным с тем, что мы описывали ранее, в главе 19. Там мы убедились, что принцип работы синергетического компьютера можно продемонстрировать с помощью потенциального холмистого ландшафта, по которому катается мяч или шар. Положение мяча описывает «воспринимающее состояние» компьютера, а долины соответствуют сохраненным прототипам. Прежде всего подумаем, как же на основании предложенных прототипов сконструировать такой ландшафт? Представим себе плоскую поверхность, которая будет до некоторой степени олицетворять состояние человеческого мозга (или нашего синергетического компьютера) при отсутствии каких бы то ни было воздействий извне. Каждой точке этой плоскости соответствует некий образ. Представим также, что в действительности образ существует в неко-

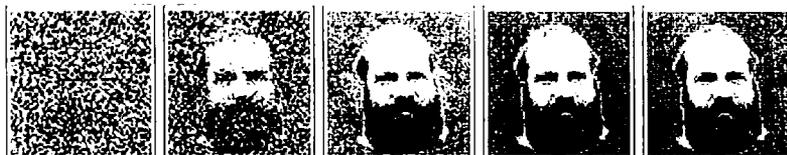
тором пространстве более высокой размерности, так что в данном случае перед нами лишь двумерная проекция связей и отношений, имеющих место в упомянутом многомерном пространстве.

В таком представлении координаты  $x$  и  $y$  (т. е. значения, отложенные по осям  $x$  и  $y$ ) соответствуют значениям серого в двух пикселях. Далее представим, что наша плоская поверхность сделана из некоей пластичной субстанции, поддающейся деформации и сохраняющей приданную ей форму до следующего воздействия. Когда системе предлагается для запоминания некий образ, это означает, что в точку, соответствующую этому образу, мы помещаем стальной шарик, который вдавливается в пластичный материал поверхности. Часто случается так, что из-за различных внешних помех (изменение освещения или зашумленность) образы, относящиеся к одному и тому же лицу или символу (например, букве), оставляют «след» не точно в той же точке; так в поверхности образуются скопления близко расположенных углублений, т. е. каждому из прототипных образов соответствует уже не одна-единственная точка, а некоторая совокупность точек, при этом расстояния между отдельными скоплениями (или различия между разными прототипами) по-прежнему остаются относительно большими. При каждом новом предъявлении одного или нескольких образов наш стальной шарик оставляет в поверхности соответствующие углубления, формируя тем самым весьма наглядный ландшафт с холмами и долинами.

В случае синергетического компьютера обучение означает «запечатление» в самом буквальном смысле этого слова. Поверхность получаемого ландшафта в каждой отдельно взятой долине приобретает, разумеется, — в силу особенностей построения этого самого ландшафта — довольно неправильную форму, которую, впрочем, можно до некоторой степени сгладить. В результате возникает ландшафт, похожий на тот, что представлен на рис. 19.1. Применяя описанный метод можно «выучить» компьютер распознавать также зашумленные и деформированные изображения; для этого достаточно раз за разом предъявлять ему эти изображения (например, фотографии людей, которых компьютер должен опознавать), подвергшиеся тем или иным модификациям. Именно таким образом и сглаживаются неровности холмистого ландшафта. Пример такого сглаживания можно видеть на рис. 32.1. С той же целью можно предъявлять компьютеру и частично скрытые прототипы, примеры которых показаны на рис. 32.2. Несмотря на то, что скрывающие изображение «заплатки» располагаются всегда в разных местах прототипных образов, компьютеру удается реконструировать такие изображения, отфильтровывая помехи и безошибочно воссоздавая идеальные прототипы; этот процесс проиллюстрирован на рис. 32.3.



а)



б)

Рис. 32.1. (а) Процесс обучения синергетического компьютера. Компьютеру последовательно предлагаются изображения лиц: оригинальные (вверху) и зашумленные (внизу). (б) Компьютер оказывается способен не только воссоздавать оригинальные изображения, но и формировать одновременно с этим новые синаптические связи



Рис. 32.2. Процесс обучения синергетического компьютера. Компьютеру последовательно предлагаются частично скрытые изображения лиц

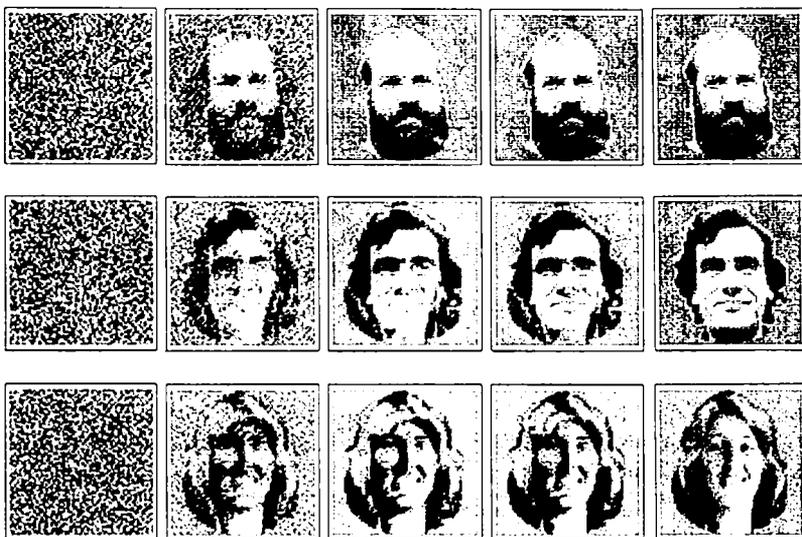


Рис. 32.3. Из предложенных изображений (рис. 32.2) компьютер оказывается способен не только восстановить оригинальные изображения, но и реконструировать одновременно с этим синаптические связи



Рис. 32.4. Предложенные компьютеру изображения

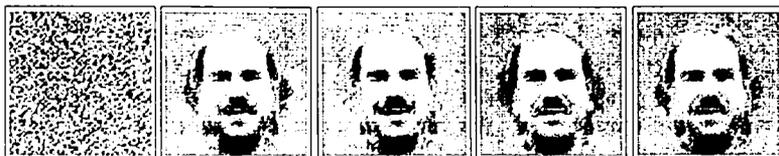


Рис. 32.5. Из предложенных портретов (рис. 32.4) компьютер должен был создать общий усредненный прототипный образ. Представленная последовательность отражает процесс создания этого «идеального» лица

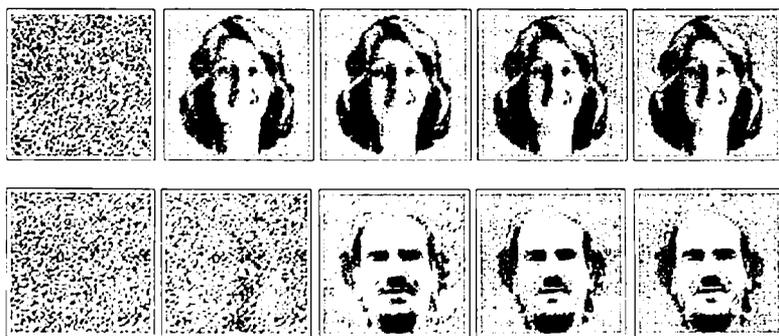


Рис. 32.6. Если компьютеру предложить еще один портрет и позволить создать на его основе новый прототипный образ, отличный от показанного на рис. 32.5, то при распознавании компьютеру удастся восстановить оба прототипа

Таким образом, мы видим, что каждому холмистому ландшафту соответствует совершенно определенный рисунок сил синаптических связей. Построение ландшафта одновременно означает и формирование синаптических связей; собственно говоря, построение ландшафта явилось для нас лишь способом продемонстрировать процесс формирования синаптических связей. Здесь, однако, имеется еще один подводный камень, который, впрочем, очень быстро обнаруживается, если не пускать деформацию ландшафта на самотек. Если один из двух образов предьявляется чаще, чем другой, то его «долина», разумеется, становится значительно глубже, чем «долина», соответствующая второму образу. В человеческом мозге, однако, этот феномен проявляется лишь в очень ограниченной степени: хотя буква «Е» встречается нам на письме гораздо чаще, чем, скажем, буква «Х», мы все же выучиваем букву «Х» ничуть не хуже, чем букву «Е». По всей видимости, нам следует ввести в нашу модель еще один механизм, который следил бы за тем, чтобы долины получались одинаковой глубины. Достичь этого, очевидно, очень просто — нужно лишь «вдавливать» поглубже те долины, которые оказываются недостаточно глубоки. Тот же эффект имеет и соответствующая деформация синаптических сил; при этом можно даже «назначать» одной долине несколько прототипов, причем не обязательно одинаковых. Таким образом можно осуществлять категоризацию образов.

Мы можем, например, указать компьютеру, что лица, портреты которых помещены на рис. 32.4, следует отнести к одной долине. Компьютер создаст на некотором участке поверхности долину, учитывающую максимальное количество общих черт указанных лиц. Сгенерированное таким искусственным образом лицо показано на рис. 32.5. Можно сделать и следующий шаг: предложить компьютеру еще один портрет, указав при этом, что изображенному на нем лицу следует сопоставить другую долину, отличную от уже созданной. Компьютер решит поставленную задачу без каких бы то ни было затруднений, создав при этом новые синаптические связи, которые сделают возможным различение между группой лиц с рис. 32.4 и лицом с рис. 32.6, но не между лицами, принадлежащими первой группе (рис. 32.5).

### 33. Мозг и идеал красоты

В ходе проверки синергетического компьютера на предмет наличия способности к различению выражений лиц, мы установили, что ему это удается самым блестящим образом, если позаботиться прежде о том, чтобы



Рис. 33.1. «Идеальный рекрут» прусской армии. Изображение получено путем усреднения представленных здесь фотографий

в его памяти был сохранен для каждого выражения лица особый прототип, созданный путем наложения одна на другую фотографий многих людей. Разумеется, это вовсе не обязательно должны быть фотографии только отдельных участков лиц (как в главе 21), можно брать за основу усредненного прототипа и все лицо целиком. Если проделать такую операцию, не сортируя лица по мимике, обнаруживается нечто удивительное: полученное в результате усредненное лицо оказывается не просто правильным (в смысле расположения своих черт), но даже, возможно, красивым. Такого рода усредненные представления не новы. Например, в прусской армии был создан образ «идеального рекрута» (рис. 33.1). В замечательной книге Инго Ренчлера и др.<sup>3</sup> приведено полученное таким способом усредненное изображение женского лица (рис. 33.2). Это лицо, хотя и слегка «размазанное»

<sup>3</sup>I. Rentschler, B. Herzberger, D. Epstein. *Beauty and the Brain*. Basel/Boston/Berlin, 1988.



Рис. 33.2. Лицо «идеальной женщины», созданное путем усреднения представленных слева фотографий

(особенно в области рта), все же кажется нам — должны признаться — по меньшей мере, привлекательнее иных лиц, внесших в него свой вклад.

В этой связи в новом и интересном свете предстает взаимосвязь между эстетическим восприятием и целесообразностью. Для нашего компьютера, решающего задачу распознавания выражения лица, будет в высшей степени целесообразным, если мы предоставим в его распоряжение необходимые усредненные изображения. Аналогичным образом должно обстоять дело и у людей. В самом деле, процесс распознавания также происходит у нас с меньшими затратами, когда мы запоминаем усредненные образы; природа же по своему обыкновению решила некогда совместить полезное с приятным, т. е. целесообразность с эстетическим удовольствием, благодаря чему такое усредненное лицо представляется нам ко всему прочему еще и красивым. Однако было ли это лицо заложено в нашем мозге изначально, или попало туда в детстве в процессе обучения? Принимая во внимание

невероятную приспособляемость мозга, можно предположить, что верно, скорее всего, последнее — и подобным вещам мы все-таки обучаемся. Тогда возникает очередной интересный вопрос: как такое обучение происходит у разных народов? Если принять наш случай за типичный, то придется предположить, что и у японцев, например, возникает свое представление о красоте через усреднение их японских лиц. А если рассматривать все человечество в целом — иными словами, что мы получим, если усредним всех мужчин и всех женщин всевозможных рас и народностей? Ответы на эти вопросы, как нам думается, будут найдены в самом ближайшем будущем.

Вместе с тем прояснятся, вероятно, и еще более глубокие взаимосвязи, относящиеся к вопросу о том, как человеческий мозг в общем случае создает категории. Наши примеры распознавания мимики указывают на то, что в основе этого процесса лежит усреднение. С другой стороны, существуют такие категории, когда усреднение попросту невозможно. Попросите нескольких человек назвать не раздумывая какой-нибудь цветок — многие назовут розу, попросите назвать инструмент — назовут молоток, а уж диким животным непременно окажется лев. В этих случаях мозг, по всей видимости, работает с представителями категории, а никак не с усредненными «величинами». А как же нам быть с такой категорией, как «человек»? Если вас попросят представить себе лицо человека, то появится ли перед вашим мысленным взором лицо какого-то определенного человека или же это будет некое «идеальное лицо», т. е. усредненная величина? Возможно, случится так, что и то, и другое сольются воедино — вспомните Мону Лизу. Так мы снова возвращаемся к вопросу о том, на чем основывается наше чувство прекрасного. Не кажется ли нам роза прекрасной лишь потому, что представляет собой как раз такую «усредненную величину»? Усредненную от чего? Усредненный цветок, полученный наложением друг на друга изображений всевозможных цветов? Едва ли, ведь цветы различных растений зачастую обладают и разной симметрией, и в результате наложения их всех мы не получим ничего, кроме более или менее гомогенной каши. Что же такое есть в человеческом лице, что кажется нам столь очевидно связанным с задачей распознавания и чего недостает розе?

#### **34. Восприятие есть создание реальности**

В главах с 16 по 32 мы попытались всесторонне рассмотреть вопрос, насколько воспроизводима посредством синергетического компьютера человеческая способность восприятия зрительных впечатлений. При этом мы

довольно широко пользовались одной далеко ведущей аналогией между распознаванием образа и созданием такового, причем в последнем случае мы могли опираться на фундаментальные основы синергетики. В настоящей главе мы делаем следующий шаг и утверждаем, что распознавание образов и есть создание образов. Разумеется, следует сразу определить, какого рода образы мы имеем в виду, когда говорим о создании образов. Как нам известно, нейронная сеть может не только сохранить целый набор всевозможных образов, но и «вспомнить» их впоследствии в результате воздействия определенного ключевого внешнего раздражителя. Таким образом, внутри распознающей системы может быть «создан» или — выражаясь осторожнее — воссоздан весь внешний мир, причем действительно или мнимо отсутствующий материал будет произведен для этой цели самой системой. Осуществляется этот процесс на основании опытных и ожидаемых данных, тем или иным способом сохраненным системой.

Такая интерпретация опирается не только на описанные нами механизмы функционирования нейронных сетей, но и подтверждается нашей реакцией на фигуры Канижи (см. рис. 5.9). Фундаментальные исследования нейронов мозга обезьян, проведенные группой цюрихских ученых во главе с Гюнтером Баумгартнером, показывают, что генерировать нервные импульсы могут не только нейроны, возбужденные поступившими извне по зрительным нервам сигналами; их деятельность дополняется нервными импульсами нейронов, не подвергшихся непосредственному раздражению, но участвующих в воссоздании (дополняя его на основе запомненного) того же образа, что и первые. Например, обезьяне показывают изображение разорванной прямой; реагируют на это изображение не только те нейроны, что воспринимают два разделенных отрезка, но и те, что «обращают внимание» на необычную пустоту между этими отрезками.

Наши идеи ведут к новой интерпретации роли внутреннего вызова мысленных изображений к постановке некоей проблемы, которая, впрочем, широко и ожесточенно обсуждается сегодня представителями когнитивных наук. В нашей интерпретации различие между образами, вызванными чисто мыслительными процессами, и образами, вызванными раздражителями внешнего мира, может быть весьма малым или вовсе отсутствовать. Вызванные внешними раздражителями образы практически — по крайней мере, в общем случае — не нуждаются в «дополнении». Хотя, конечно, может статься, что и они дополняются, и в гораздо большей степени, чем мы фактически воспринимаем и осознаем. В качестве примера можно привести

чение: зачастую всего по нескольким буквам мы воссоздаем слово целиком, не дав себе труда прочесть все буквы, и составляем из таких слов целые предложения. Порой мы ловим себя на том, что буквы «дополнились» не в то слово, но только после того, как мы осознаем смысл всего предложения, мы понимаем, насколько сильно ошиблись при первом, беглом прочтении (т. е. прочтении с «дополнениями»).

Наши результаты проливают новый свет и на понятие «гештальта». Гештальт воспринимается нами двояко. С одной стороны, мозг способен дополнять отсутствующий материал (как, например, в случае деформированных, зашумленных или профильтрованных изображений). С другой стороны, образ может быть распознан независимо от его положения в пространстве и упомянутых деформаций. Иными словами, концепция гештальта обладает свойством инвариантности.

Разумеется, многие вопросы так и остаются открытыми. Насколько, например, мыслительные способности человеческого мозга основаны на генетической программе или какова роль самоорганизации в возникновении этих самых мыслительных способностей? Эти вопросы порождают следующие — скажем, такой: насколько мозг в своем морфогенезе (т. е. в создании паттернов активности) повторяет разрабатываемые нами структуры? Естественно ответы на все вопросы можно найти только путем сотрудничества теоретиков синергетики, нейрофизиологов и психологов, причем мы имеем основания полагать, что синергетика со своей концепцией распознавания образов будет играть в этом сотрудничестве влиятельнейшую и постоянно возрастающую роль.

Из предыдущего изложения нам известно, что синергетический компьютер может быть реализован различными способами, в том числе и путем моделирования всего процесса на последовательном компьютере. Однако мы познакомились и с реализацией синергетического компьютера в виде совершенно параллельной сети, причем возможна и альтернативная параллельная реализация — основанная на так называемых «бабушкиных клетках». На первый взгляд может показаться, что последовательные и параллельные реализации синергетического компьютера различаются лишь степенью сложности, качественных же различий между ними нет. В строго математическом смысле это действительно так: обе могут быть сведены к одной и той же так называемой машине Тьюринга, а значит, полностью эквивалентны. Однако с нашей точки зрения между последовательной и параллельной реализациями синергетического компьютера существует огромная разница.

При последовательной обработке данных — т. е. когда за каждый отдельный такт обрабатывается некоторое определенное количество информации — нам не удастся в подлинном смысле распознать пространственный образ. При параллельной же обработке образ возникает у нас буквально перед глазами, и мы легко можем сопоставить этот образ с определенными паттернами возбуждения в нашем мозге. В этом заключается принципиальное различие между последовательным и параллельным способами обработки данных. Параллельная обработка, среди прочего, позволяет осуществлять локальный возврат к отдельным фрагментам воспринятого содержания. Здесь можно провести аналогию с сохранением музыки на грампластинке или компакт-диске — с одной стороны, и на магнитной ленте — с другой. Чтобы отыскать нужный фрагмент музыки на магнитной ленте, нам приходится ее перематывать, тогда как на грампластинке или компакт-диске в любой момент времени открыт доступ к любому фрагменту. Преимущество полной открытости доступа к данным при параллельной обработке заключается не столько в сокращении времени обработки, сколько в ее одновременности. С магнитной ленты два фрагмента можно прослушать только в разные промежутки времени, при параллельной же обработке мы можем одновременно отыскать в предложенном образе и обработать не только две, но и гораздо большее количество деталей. Мы даже можем обработать весь образ сразу, как единое целое. Таким образом, обсуждаемый в иных книгах вопрос о том, является ли человеческий мозг своего рода машиной Тьюринга, просто неверно поставлен. Даже если бы мозг в процессе своей деятельности моделировал машину Тьюринга, некоторые аспекты этой деятельности оказались бы качественно совершенно иными. По некотором размышлении мы приходим также к тому, что процесс зрительного восприятия заключается не в обработке некой последовательности сигналов (как утверждают ведущие теоретики от искусственного интеллекта); речь, скорее, может идти о непрерывном создании паттернов возбуждения, которые как таковые не несут в себе отдельных символов. Для компьютера это возбуждение будет только электрическим, для мозга же — как электрическим, так и химическим.

Протекающие в синергетическом компьютере абстрактные процессы можно описать через изменение с течением времени его состояния, которое наглядно представляется как положение шарика среди потенциальных холмов; после всех своих метаний шарик наконец находит покой на дне одной из долин, что и означает окончание процесса распознавания обра-

за. Как только шарик достигает нужной долины, задача системы оказывается выполненной, т. е. образ распознан. Следует, однако, упомянуть и о том — весьма фундаментальном, на наш взгляд — обстоятельстве, что, как показывают наши эксперименты с синергетическим компьютером, целый ряд непосредственно связанных с восприятием процессов нельзя описать с помощью этой простой картины; к таким процессам относятся, например, анализ сложных сцен. Компьютер справляется с подобными задачами только в том случае, если долины обладают собственной динамикой, т. е., проще говоря, самостоятельно приподнимаются по распознаванию соответствующего образа, выравниваются в плоскость или даже перерождаются в холмы. Ландшафт в этом случае постоянно изменяется под воздействием предлагаемых конкретных сцен по мере распознавания составляющих их объектов. Картина соединенных друг с другом нейронов или синапсов с постоянными силами связи здесь уже не подходит. Свою неперемennую роль в этом процессе играет и эффект насыщения внимания, особенно выразительно проявляющийся в осцилляциях при восприятии «двойных картинок».

Можно, таким образом, утверждать, что наша холмистая местность со всеми ее долинами и их аттракторными состояниями оказывается лишь первым приближением к решению проблемы восприятия: потенциальный ландшафт оказывается подвержен постоянным изменениям под воздействием самых различных факторов. Факторы эти могут быть, с одной стороны, внешними: так распознанный объект влияет на параметр внимания и, как следствие, на силу синаптической связи; с другой стороны, этот же параметр внимания формируется и изменяется изнутри. Параметр внимания оказывается, таким образом, обусловлен не только воспринимаемыми реалиями, но и эмоциями и многими другими, не менее влиятельными факторами. Мы знаем, что процесс зрительного восприятия совершенно не похож на запечатление картинки на фотопластинке — в мозге протекает огромное количество разнообразных и взаимосвязанных процессов: анализ и синтез образов и сцен, фильтрация и многие другие.

Вся эта деятельность поддерживается с помощью несложных физиологических процессов. Так, известно, что глаз не направлен в одну точку, а совершает характерные прерывистые движения; при этом зрачок не фокусируется на отдельных объектах, а подвержен непрерывным колебаниям. В нашем распоряжении имеется в высшей степени тонко настроенная и пребывающая в постоянном движении система распознавания образов, механические детали которой теснейшим образом скоррелированы с нерв-

ными возбуждениями в коре головного мозга. С помощью этой системы мы создаем картину внешнего мира, причем действительно скорее «создаем», нежели просто «воссоздаем». Многое мы привносим из собственного опыта. Допустим, вам особенно понравилась какая-то местность, и вы решили сфотографировать ее; а разглядывая затем готовые фотографии, вдруг обнаруживаете, что местность кажется вам уже иной, не той, что вы сохранили в памяти, не той, какую вы в действительности видели. Наш мозг синтезирует внутри себя свои собственные ландшафты, причем законы перспективы в этом процессе иногда принимают весьма необычные формы.

Многих вопросов мы здесь не касались совсем. Безусловно, важную роль в описанных процессах играет память — как краткосрочная, так и долгосрочная (а возможно, и среднесрочная). Совершенно очевидно, что нам еще предстоит решить ряд очень непростых задач, если мы действительно хотим с помощью компьютера воспроизвести процессы зрительного восприятия в том же виде, в каком они протекают в мозге. С другой стороны, первый шаг в этом направлении мы уже сделали, и — как нам представляется — этот шаг помог нам обрести новое видение проблемы, опирающееся на строгие компьютерные результаты.

### **35. Другие вопросы, связанные со зрительным восприятием**

В третьей, «теоретической», части нашей книги нам удалось осветить далеко не все важные аспекты, касающиеся даже самых простых зрительных процессов. К таковым относится, например, пространственное восприятие. Глубину пространства мы воспринимаем благодаря тому, что у нас два глаза, видящие мир несколько по-разному. Основываясь на этой разнице (на профессиональном жаргоне именуемой диспропорцией), мозг может воспринимать глубину и оценивать расстояние до различных объектов. Последние исследования, проведенные в нашем (Г.Х.) институте, показывают, что такое восприятие глубины пространства способен продемонстрировать и синергетический компьютер: из двух двумерных картинок ему удастся реконструировать трехмерный образ. Незатронутыми остались также важные аспекты цветового зрения. Как отмечал Эдвин Лэнд, создатель «полароида», цвет мы воспринимаем как угодно, но только не основываясь на физической длине волны. Гораздо важнее для восприятия цвета

оказываются цветковые пятна или многоцветные изображения, позволяющие мозгу скомпенсировать влияние освещения. Лэнд обнаружил, что мозг сначала определенным образом собирает сообщения о цвете всех точек какого-либо цветного участка изображения, а затем присваивает всему рассматриваемому участку усредненное по всем этим точкам значение цвета. Вследствие этого даже при совершенно иной освещенности нам кажется, что цвет виденного нами ранее участка изображения остается неизменным, хотя воспринимаемый нашими глазами отраженный свет имеет совсем другой спектральный состав. Представляется весьма интересным попытаться встроить такой эффект в концепцию синергетического компьютера. Для нейрокомпьютера эта задача уже решена в работах Жанны Рубнер и Клауса Шультена.

В главе 34 мы уже упоминали о внутренних представлениях. Добавим к сказанному еще несколько слов, имея в виду будущие исследования в этой области. Прежде всего стоит рассказать об экспериментах, проведенных Р. Н. Шепардом и Т. Метцлером. В ходе этих экспериментов испытуемым предлагались изображения, подобные помещенным на рис. 35.1. Все фигуры были самым очевидным образом развернуты по отношению к своему «нормальному» положению. Результаты экспериментов показывают, что время, необходимое испытуемым для того, чтобы мысленно повернуть изображенную фигуру в ее исходное положение, зависит от угла поворота фигуры. Чем больше угол поворота, тем больше времени занимает у испытуемых ее мысленный обратный разворот. Согласно некоторым недавним разработкам нашего (Г. Х.) института, аналогичные результаты демонстрирует и синергетический компьютер. Это, конечно же, не означает, что наблюдаемую разницу во времени компьютер использует для рисования неких мысленных картин перед своим собственным «внутренним взором». Это указывает лишь на то, что на основании компьютерных результатов мы можем просчитать зависимость времени, необходимого на возвращение развернутой фигуры в исходное положение, от того, насколько сильно ее развернули.

Следующая важная область, на которую синергетика окажет существенное влияние, это изучение управления сенсорно-моторными функциями. Как мы уже видели, нейронная сеть способна дополнять неполный образ недостающими данными, насколько это позволяет тот исходный набор прототипов, которым она располагает. До сих пор мы исходили из того, что поступившие извне и «добавленные» данные имеют одну и ту же природу, т. е. в рассмотренных случаях, содержат информацию об изображениях.

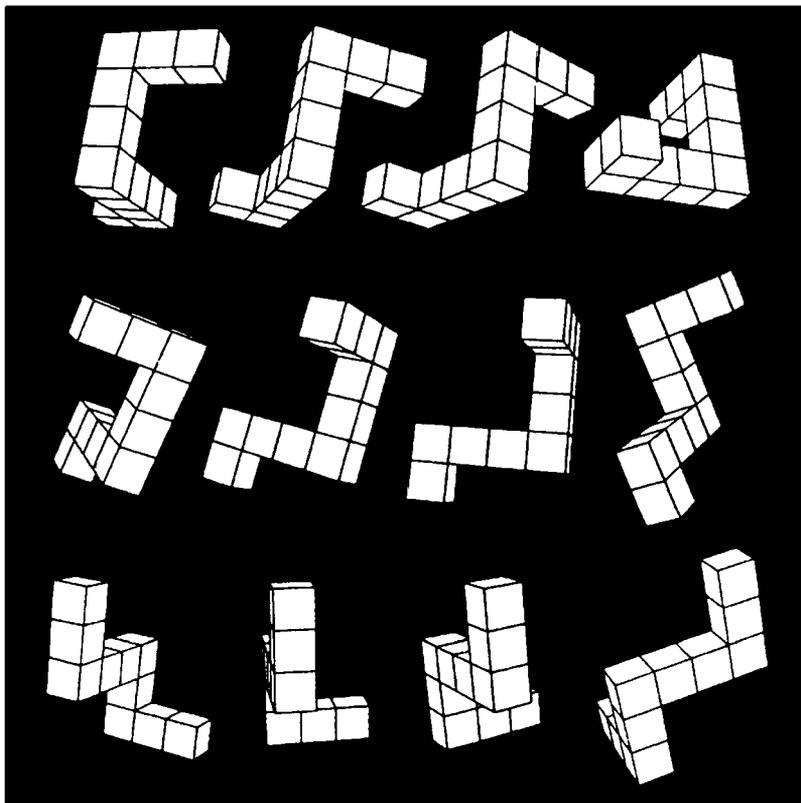


Рис. 35.1. Фигуры, использовавшиеся в экспериментах Р.Н. Шепарда и Т. Метцлера

Однако так бывает далеко не всегда: данные на входе могут и в самом деле содержать информацию об изображении, тогда как недостающие данные могут относиться, например, к осуществлению каких-либо действий (таких, как речевые действия или движение). В этом случае дополнение полученных данных на основании исходного прототипа приводит к формированию целостного перцептивно-моторного паттерна. Впрочем, такие перцептивно-моторные паттерны управляются теми же немногими параметрами порядка, что и было показано в фундаментальной работе Германа Хакена, Скотта Келсо и Герберта Бунца (см. главу 3). И хотя это и не входит

в задачу данной книги, мы все же хотели бы добавить (раз уж все равно начали), что идея формирования перцептивно-моторных паттернов имеет одно весьма важное следствие. Она, возможно, позволит нам получить ответ на вопрос, каким образом теннисисту удастся вовремя отреагировать на летящий в его сторону мяч, хотя совершенно очевидно, что на сознательном уровне такая скорость реакции практически невозможна? Допустив же существование перцептивно-моторных паттернов, мы очень легко сможем все объяснить: в ответ на содержание воспринятой картинки (летающий мяч) немедленно активизируется некий паттерн поведения, причем для такой активации вовсе не требуется непременно дополнение воспринятого содержания до полного прототипного образа или подъем его до уровня сознания. Здесь, вне всякого сомнения, открываются необъятные возможности для дальнейших исследований.

## ЧАСТЬ IV

# Выводы

### 36. Что мы понимаем под «пониманием»?

Мы попытались поближе познакомить читателя с результатами современных исследований мозга. При этом, однако, обнаружилось, что в само понятие «понимание» разные исследователи вкладывают порой совершенно различный смысл. Вспомним хотя бы о нашем расхождении с редукционистами (глава 15) относительно толкования сути биомолекулы: сами биомолекулы мы сравнивали с кирпичами, а весь организм — с домом, из этих кирпичей построенным. Собственно говоря, осматривая ландшафты современной науки, мы начинаем все отчетливее понимать, что цели и взгляды исследователей отнюдь не едины. Они зависят, по всей видимости, и от личных вкусов, и от предшествующего образования, и конечно же, от духа времени. При этом в науке очень легко выделить какие-то отдельные течения и их, если можно так выразиться, «антитечения». Среди примеров таких пар можно назвать универсализм и сингуляризм. Согласно определению одного шутника, универсалисты не знают ничего обо всем, а сингуляристы (или «специалисты»), напротив, знают все ни о чем. Едва ли, впрочем, кому-либо удастся описать взаимоотношения между универсализмом и сингуляризмом лучше, чем это уже сделал Гёте:

*«Когда знание вызревает до такой степени, что становится наукой, обязательно возникает кризис: настолько очевидна разница между теми, кто предпочитает разделять и выделять, и теми, кто охотнее обобщает, составляя целостную картину путем добавления и сложения отдельных особенностей. Причем по мере того, как научное, идейное, всеобъемлющее мировоззрение завоевывает себе все больше и больше приверженцев, друзей и соратников, это разделение не исчезает — теперь оно, правда, уже не столь разительно, но все же заметно. Те, кого я хотел бы назвать универсалистами, убеждены, что существует — и может быть обнаружено — все и везде, в бесконечном разнообразии правил и отклонений от них. Другие же — их я назову*

*сингуляристами* — в общем случае признают существование того, что поддается наблюдению, определению и, как следствие, чему-то учит; однако они *всегда заняты поисками исключений* там, где недостаточно ясно определено общее правило — и в этом они, надо сказать, правы. *Ошибка их заключается лишь в том, что они не признают существования основного образа там, где он скрыт, полагая, что если его не видно сразу, то его вовсе нет.* Так как эти позиции изначально и навсегда противостоят одна другой, не будучи способны ни объединиться, ни уничтожить друг друга, то следует избегать двусмысленностей и излагать свои убеждения ясно и прямо. И я продолжаю утверждать: на этой ступени нельзя *знать*, но нужно *делать*.»

«... Точно так же и с теми, кто перевозносит исключительно опыт: они не задумываются над тем, что опыт есть лишь половина знания.» (*Курсив наш.* — Г. Х., М. Х.-К.)

Синергетику, вне всякого сомнения, следует относить к универсалистскому направлению. Еще два важнейших течения — это уже упоминавшийся выше редукционизм и холизм. Синергетика занимает промежуточное между этими двумя крайностями положение — или, лучше сказать, положение посредника. Синергетику занимают вопросы, касающиеся не столько происходящих на микроскопическом или макроскопическом уровнях процессов, сколько установления связей между этими процессами. И это ей удастся благодаря введению понятия параметра порядка и принципа подчинения. Убежденный редукционист мог бы сказать: «Мы сможем разобраться в том, что представляет собой нейронная сеть лишь тогда, когда выясним, что есть отдельный нейрон». Фанатик холизма сказал бы: «Мы поймем, что такое нейронная сеть лишь тогда, когда выясним, каковы ее макроскопические свойства». Наша же позиция такова: для проникновения в тайну мозга нам необходимо и то, и другое — иными словами, понимание сущности связи между процессами, происходящими как на микроскопическом, так и на макроскопическом уровнях. Нельзя не признать, что относясь к делу таким образом, мы оказываемся все же ближе к позициям холизма, нежели к точке зрения редукционистов.

В английском языке подобный образ мыслей часто характеризуется с помощью словосочетания «bottom-up»<sup>1</sup>, смысл которого можно передать приблизительно следующим образом: исходя из свойств отдельных элемен-

<sup>1</sup>Англ. «восходящий», «снизу вверх». — *Прим. перев.*

тов системы (в нашем случае — нейронной сети) можно попытаться воспроизвести свойства системы в целом. Обратный подход можно обозначит английским же словосочетанием «top-down»<sup>2</sup> — исходя из свойств системы делаются выводы о свойствах отдельных ее элементов. В современных экспериментальных исследованиях мозга используются, вне всякого сомнения, «bottom-up» методы, причем на передний план выходит изучение отдельных межнейронных процессов, а также процессов, происходящих внутри отдельных нейронов. И только в последнее время с помощью новых методов измерения удалось исследовать и взаимодействие групп нейронов, что и привело к уже упоминавшемуся открытию связи между колебаниями состояний этих групп.

Попытаемся познакомиться поближе и с холистической точкой зрения. Имеются ли в языке соответствующие метафоры, отражающие общее состояние наших современных знаний о мозге. Так, например, в течение нескольких предыдущих столетий мозг часто сравнивали с часовым механизмом. С наступлением века электричества мозг начинают сравнивать с электрической схемой и говорят о «переключении» мыслей. Революционное развитие электроники в наше время привело к тому, что мозг представляется в виде какого-то невообразимо сложного компьютера. Каждый раз бросается в глаза то, что мозг воспринимается людьми как машина, причем в каждой из перечисленных метафор само понятие «машина» подвергается постепенному малозаметному переосмыслению. Когда-то машиной считалось какое-либо механическое устройство, типа паровой машины или часов. Затем под «воздействием» электромагнитных полей понятие «машины» расширилось и вобрало в себя динамо-машины и электродвигатели, а также средства электрической передачи и приема сигналов. Компьютер воспринимается как следующая ступень развития технологий, хотя логические вычислительные операции в нем выполняются теперь уже не механическими, но электрическими элементами. И все же любое из представлений о понятии «машина» включает в себя следующее содержание: «изобретена человеческим разумом и сделана руками человека для выполнения определенных специфических задач».

В настоящее время в науке осуществляется процесс очередного переосмысления понятия «машина». Мы хотим создавать такие компьютеры, которые способны обучаться, которые способны самостоятельно изменять свои внутренние и внешние связи — иными словами, машины, способные самостоятельно организовывать свое устройство и функционирование. Мы

---

<sup>2</sup> Англ. «нисходящий», «сверху вниз». — *Прим. перев.*

хотим, чтобы наши компьютеры сами себя ремонтировали и умели рисовать картины. (Заметьте, какое участие принимает в процессе привнесения в машину «самости» наука.) Создается впечатление, что все воплощенное на материальном субстрате в конечном счете начинает считаться машиной, т. е. приравнивание мозга к машине может показаться вполне обоснованным с научной точки зрения. Хотя, на первый взгляд, все же имеется одна лазейка, ведь машины — это устройства, функционирующие — в нашем понимании — строго каузально или, по меньшей мере, вполне предсказуемо.

В природе же помимо строго каузальных и детерминированных процессов существуют еще и всевозможные случайные явления, и непредсказуемые отклонения, т. е. флуктуации. Такие отклонения наблюдаются и в физиологических системах; в этой книге мы уже не раз сталкивались с подобными явлениями: это и спонтанное изменение положения при движении пальцев в опытах Келсо, т. е. флуктуация относительной фазы, и примеры флуктуаций в процессе восприятия, скажем, «двойных картинок». Казалось бы, можно сказать, что вот мы и обнаружили различие между мозгом и машиной . . . но не тут-то было: нетрудно привести многочисленные примеры возникновения внутренних спонтанных отклонений и в машине — достаточно рассмотреть в качестве машины лазер или обыкновенную лампу накаливания. Их световое излучение основано на так называемых квантовых колебаниях, которые в принципе, происходят всегда, однако в лазерном источнике случайный характер этих колебаний оказываются сильно подавлен. Но даже и теперь вышеприведенную концепцию «машины» все еще можно «спасти», нужно лишь принять во внимание радикальную смену значений.

Естественно, было предпринято немало попыток понять мозг в более широких концептуальных рамках. Сюда относится, к примеру, сравнение мозга с универсальным последовательным компьютером, так называемой машиной Тьюринга. Прекрасное объяснение принципов действия машины Тьюринга дал Роджер Пенроуз в книге «Новый разум императора»<sup>3</sup>, где он, впрочем, пришел к выводу о том, что мозг нельзя-таки считать машиной Тьюринга, поскольку последняя не обладает сознанием. Далее Пенроуз делает попытку объяснить феномен сознания в рамках квантовой теории и еще одной новой теории, которую только предстоит разработать.

Поскольку мы уже затронули в связи с функционированием мозга квантовую теорию, представляется уместным остановиться на ней несколько подробнее. Центральными понятиями квантовой теории являются так называемый корпускулярно-волновой дуализм и тесно связанный с ним принцип

---

<sup>3</sup>R. Penrose. *The Emperor's New Mind*. Oxford Univ. Press, 1989.

неопределенности Гейзенберга. Суть корпускулярно-волнового дуализма заключается в том, что одна и та же микроскопическая сущность (например, электрон) в одних экспериментах ведет себя как частица, в других же — как волна. Два электрона, столкнувшись, могут, подобно теннисным мячам, отскочить друг от друга и разлететься в разные стороны; с другой стороны, электронный луч может пройти одновременно сквозь два отверстия в ширме, при этом на экране за ширмой регистрируется дифракционная картина, характерная для световой (или водной) волны. Таким образом, одна и та же сущность проявляется физически в двух различных формах, что в корне противоречит нашему макроскопическому мировоззрению: частицы должны вести себя, как приличествует частицам, а волны, соответственно, всегда оставаться волнами.

Конкретные проявления электрона либо в качестве частицы, либо в качестве волны подчиняются принципу неопределенности Гейзенберга; с ним же связана принципиальная невозможность предсказать дальнейшее движение электрона. Кроме того, согласно принципу неопределенности Гейзенберга, нельзя точно установить одновременно скорость и местоположение частицы; обладай мы такой возможностью, мы предположительно смогли бы, применяя законы ньютоновой механики, вычислить траекторию дальнейшего движения частицы.

Нельзя предсказать также предсказать, в какой именно момент времени тот или иной электрон в атоме перейдет из возбужденного в основное состояние под воздействием светового излучения (или кванта света). Несмотря на это, некоторые закономерности здесь все же имеются. Так, например, физики могут вычислить, с какой вероятностью электрон может за определенный отрезок времени испустить световую волну. Квантовая теория позволяет рассчитать так называемые вероятностное поле, благодаря которому можно предсказать, с какой вероятностью электрон оказывается в том или ином месте. Весьма заманчиво, конечно, выглядит идея привлечь концепцию вероятностного поля и для объяснения процессов, происходящих в мозге, ведь в таком случае у нас появляется возможность включить в его естественнонаучное описание и непредсказуемые события. Однако, согласно сегодняшним научным воззрениям, процессы, изучаемые нейрологией, протекают на таком уровне, который следует определять уже как макроскопический, так что возможность участия здесь квантовых процессов отнюдь не очевидна (хотя и не исключена окончательно). Возможно, в этой области нас еще ждут поразительные открытия.

В заключение еще несколько слов о математике Курте Гёделе и его теореме о неполноте — в последние годы стало модным упоминать о них в

связи с исследованиями мозга. Согласно теореме Гёделя, внутри системы логических высказываний невозможно доказать или опровергнуть то или иное высказывание; отсюда следует, что человеческий мозг в принципе неспособен понять сам себя. Такая ситуация просто обязывает нас хотя бы вкратце коснуться сугубо философских аспектов рассматриваемой темы, чем мы и займемся в следующей главе.

### 37. Немного философии

В предисловии мы уже упоминали о том, что результаты исследований мозга могут оказать на наше мировоззрение самое радикальное воздействие. На протяжении тысячелетий философы развивали различные представления об окружающем нас мире, создавая тем самым этикие «сундучки», в которые затем можно было очень легко поместить любую возникавшую в науке теорию. Настал момент, когда и мы можем (и должны) приоткрыть завесу и рассказать, что — по нашему мнению — представляет собой синергетический подход в философском смысле.

Разумеется, внутри собственно синергетического подхода могут образоваться свои течения — как материалистические, так и идеалистические — т. е. такие, на которые следует обратить особое внимание. Материалистическое мировоззрение подразумевает первичность материи, идеализм же основывается на том, что первичным, формообразующим признается духовное начало. Мы, конечно же, не сможем поговорить здесь обо *всех* исследователях мозга, однако многие из них оказываются материалистами: они убеждены в том, что поняв принципы функционирования нейронов, наука сможет разобраться и в том, каким образом осуществляется психическая деятельность.

Представителем идеалистического направления можно считать известного исследователя мозга сэра Джона Экклса. В книге «"Я" и его мозг»<sup>4</sup>, написанной им в соавторстве с сэром Карлом Поппером, мозг представлен как машина, управляемая и программируемая неким нематериальным «я».

В течение многих лет в живописном горном замке Эльмау в Баварии мы (Г. Х.) проводим семинары по синергетике. На один из таких семинаров, посвященных исследованиям мозга, был приглашен и сэр Джон. На всех без исключения участников семинара глубокое впечатление произвели обширнейшие познания сэра Джона в обсуждаемой области. Однако, несмотря на это, его идеи не получили признания среди других ученых.

<sup>4</sup>К. R. Popper, J. C. Eccles. *The Self and its Brain*. Springer, Berlin/Heidelberg, 1977.

Интересно, что в ходе семинара сэр Джон выдвинул еще одну теорию, которая призвана была поддержать его концепцию: программирующее мозг «я», утверждал сэр Джон, как раз и является тем самым аналогом вероятностных полей квантовой теории, который управляет нейронными процессами. На мой взгляд, такое заявление есть не что иное, как шаг в сторону материалистического мировоззрения, ведь вероятностное поле — это физическое понятие, которое, в принципе, может участвовать в физических экспериментах. С точки зрения физика, такое утверждение абсолютно истинно. Проведя серию опытов по определению, скажем, местоположения электрона, физик может дать обоснованную оценку вероятностного поля. В несложных случаях (например, при движении электрона в атоме) вероятностное поле может быть вычислено точно с помощью так называемого уравнения Шрёдингера; затем это значение сравнивается со значением, полученным экспериментальным путем. Нельзя ли применить аналогичный подход к исследованиям мозга? Здесь перед исследователями встают сразу две сложные проблемы. Во-первых, на одном мозге нельзя провести один и тот же эксперимент дважды. Каждый опыт оставит свой след, необратимо изменив мозг, так что мы никоим образом не можем получить представления о вероятностном поле мозга, как это удастся сделать в случае иных физических систем. Во-вторых, нам не под силу провести теоретический расчет вероятностного поля такого сложного образования, как мозг: такое не всегда удастся даже с относительно простыми молекулами. Читатель, должно быть, уже почувствовал, насколько зыбка та почва, на которую мы ступили, взявшись рассмотреть философские аспекты нашей проблемы; на сегодняшнем уровне развития науки было бы, пожалуй, опрометчиво делать какие бы то ни было окончательные выводы.

Какова же наша собственная позиция в отношении выбора между духом и материей? Ответить на этот вопрос несложно: для этого достаточно отослать читателя к главе 2, где были представлены основные принципы синергетики, в соответствии с которыми элементы системы создают один или несколько параметров порядка, одновременно (в истинном смысле этого слова) воздействующих на отдельные элементы системы по принципу подчинения. Происходящий при этом процесс круговой каузальности поддается подробному математическому описанию. Для нас в данном случае важно следующее: все элементы описываемых структур имеют материальную природу, будь то атомы рабочего тела лазера, молекулы жидкости или нейроны. Параметры же порядка могут по своему «происхождению» отличаться друг от друга. Так, например, в лазере — это электромагнитные волны, в жидкости (в нашем примере) — особая форма движения, т. е. нечто

уже не совсем материальное, и наконец, имея дело с процессами в мозге мы снова сталкиваемся с нематериальными параметрами порядка. Великолепной иллюстрацией этого может служить эксперимент Келсо: несмотря на свою простоту, он прекрасно демонстрирует изменение фазового угла; потрогать его, конечно, нельзя, но являясь — подобно дырке — до некоторой степени нематериальным, он все же поддается точному измерению (как и размер дырки). Другие проявления деятельности параметров порядка мозга можно наблюдать в опытах по изучению процессов зрительного восприятия.

В соответствии с вышесказанным, духовные — или, выражаясь точнее, — психические проявления мозга и материальное его состояние взаимно обуславливают друг друга. С этой точки зрения, электрические и химические процессы в нейронах обуславливают возникновение мыслей, и наоборот.<sup>5</sup> При этом представляется важным отметить тот факт, что упомянутые мыслительные процессы могут протекать и на абсолютно иных субстратах, нежели нейроны — мы убедились в этом, наблюдая за процессами в синергетическом компьютере. Итак, одни и те же результаты психической деятельности могут быть получены на самых различных субстратах, причем в каждом конкретном воплощении возможен весь спектр разумного поведения такого субстрата. Понятие «разумность» само по себе очень и очень деликатно и потому требует в каждом отдельном случае весьма точных классификации и описания. Напротив, на одном и том же субстрате могут осуществляться различные виды психической деятельности и возникать совершенно различные концепции, так что между духом и материей попросту невозможны линейные, одномерные и однозначные отношения. Не оказывается ли, в таком случае, синергетика неким ключом к пониманию мозга?

### 38. Синергетика — ключ к пониманию мозга

Представьте себе, что мозг — это огромный сказочный замок. Продолжая метафору, зададим вопрос: какие же двери открывает для нас в этом

---

<sup>5</sup>Приверженцу материализма будет достаточно сложно воспринять нашу позицию. Он, возможно, скажет: «Совершенно очевидно, что психическая деятельность представляет собой не что иное, как эмергентное свойство материи.» Странник же идеалистического взгляда на мир останется непоколебим: «Разве не прослеживаются здесь духовные принципы организации? Именно они упорядочивают материю — не сама же материя это делает!» Было бы замечательно обсудить все эти и связанные с ними вопросы подробнее — однако на данных естественнонаучных страницах мы вынуждены ограничиться лишь постановкой их. — *Прим. автора*

замке синергетика? Попадаем ли мы с ее помощью в маленькие, незначительные каморки — или же нашему взору открываются огромные роскошные палаты этого замка? Для ответа на этот вопрос нам придется вновь вернуться к вопросу о том, что же мы вкладываем в понятие «понимание», которое играет здесь главную роль. Думается, что синергетические концепции — такие, как параметр порядка и принцип подчинения — могут помочь нам в постижении сути процессов восприятия, благодаря чему мы окажемся в самом сердце этого сказочного, полного тайн и загадок замка, с которым мы в начале главы сравнили мозг. Мы уверены, что синергетика поможет нам разобраться и с целым рядом других феноменов, являющихся результатом психической деятельности мозга; одновременно с этими открытиями мы, вне всякого сомнения, сделаем еще одно: за стенами уже известных нам палат и комнат есть и другие, огромные, никем не исследованные пространства. Что мы, например, знаем об ощущении человеком качеств объектов?

Люди способны различать цвета и запахи, испытывать разнообразные эмоции от радости до скорби (и даже такой особый род эмоций, как религиозные чувства). Все это порождает новые и новые вопросы. Нам, например, известно, что в основе всех воспринимаемых нами цветов лежит спектральный состав попадающего в глаза света, что в сетчатке имеются особые рецепторные молекулы, которые определенным образом реагируют на волны различной длины и посылают свои сигналы в мозг, . . . но вот как происходит ощущение собственно «цвета», мы не знаем. Все ли люди ощущают цвета одинаково? Известно, что некоторые люди страдают цветовой слепотой, т. е. вовсе не воспринимают цвета. Нам (авторам) представляется, что наличие у восприятия качественного аспекта есть величайшее изобретение Природы, однако оно останется недоступным для нашего понимания до тех пор, пока мы не найдем способа соотнести этот самый качественный аспект с количественным. Человек может без труда определить, что он видит тот или цвет из своего спектрального диапазона, однако он не в состоянии сказать, тот ли это самый цвет, что видят в этой области спектра другие люди. Созданием машины, которая при предъявлении ей видимого излучения определенного спектрального состава сообщит нам, что она «видит», скажем, желтый цвет, мы проблемы не решим. Это в чистом виде вопрос определения: способна ли машина испытывать ощущения? Нам никогда не удастся на него ответить, да и — честно говоря — сам по себе вопрос представляется нам довольно бессмысленным.

Собственно, следует лишь выяснить, с какими именно процессами взаимодействия отдельных нейронов связаны те или иные ощущения. В этом

смысле ощущения тоже располагают своего рода организацией, которая, однако, качественно отлична от той, что мы рассматривали в рамках теории восприятия. Имея дело с количественными характеристиками, мы пользуемся для их оценки в некоторой степени универсальной единицей — числом. Для описания же качественных характеристик в нашем распоряжении ничего подобного нет. Вероятно, можно сопоставлять различные качества друг с другом, создав, к примеру, таблицу соответствий между цветами и ощущениями, как предложил недавно один психолог. Подобные попытки, впрочем, предпринимались и раньше: мы привычно полагаем синий цвет холодным, а красный — теплым. По всей видимости, способность ощущать качества объектов — такие, например, как цвет и запах — является типичным свойством биологических систем вообще. Смогут ли идеи синергетики дать нам ключ к разгадке этих тайн, покажет будущее.

## Список литературы и примечания

Литература, посвященная темам, обсуждаемым в этой книге, весьма обширна.

Мы ограничимся тем, что дадим заинтересованному читателю ссылки на использованные нами источники, а кроме того, перечислим некоторые книги, посвященные более подробно рассмотрению отдельных вопросов, затронутых нами.

### Часть I

Литература по синергетике:

Н. Haken. *Erfolgsgeheimnisse der Natur*. DVA, Stuttgart, 1983.

Есть издание карманного формата, выпущенное издательством Ullstein. Чтение этой книги не требует никакой специальной математической подготовки.

Н. Haken, A. Wunderlin. *Die Selbststrukturierung der Materie*. Friedr. Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1991.

На этот раз читателю потребуются некоторые познания в математике (на уровне выпускных классов средней школы).

Н. Haken. *Synergetik. Eine Einführung*. Springer, Berlin/Heidelberg, 1990.

Для чтения этой книги необходима серьезная математическая подготовка.

О самоорганизации рекомендуем прочесть, к примеру, книгу R. Paslack. *Urgeschichte der Selbstorganisation*. Friedr. Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1991.

Следует, конечно, упомянуть и выдающиеся работы по проблемам пребиотической эволюции, рассматриваемой как процесс самоорганизации материи:

M. Eigen. *Stufen zum Leben*. Piper, München, 1987.

Взгляд на мозг как на синергетическую систему изложен Г. Хакеном в сборнике: *Synergetics of the Brain*, hrsg. von E. Başar, H. Flohr, H. Haken, A. J. Mandell. Springer, Berlin/Heidelberg, 1983.

О синергетике в биологических науках можно прочесть в книге: H. Haken, M. Haken-Krell. *Entstehung von biologischer Information und Ordnung*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1989.

К четвертой главе рекомендуем:

Работу Р. Фридриха, А. Фукса, Г. Хакена и Д. Лемана в сборнике: *Computational Systems — Natural and Artificial*, hrsg. von H. Haken. Springer, Berlin/Heidelberg, 1987, а также Р. Фридриха, А. Фукса и Г. Хакена в сборнике: *Rhythms in Physiological Systems*, hrsg. von H. Haken, H. P. Koerchen. Springer, Berlin/Heidelberg, 1991.

Несомненно, стоит прочесть и книгу Вольфганга Кёлера по гештальтпсихологии:

W. Köhler. *Die physischen Gestalten in Ruhe und im stationären Zustand*. Friedr. Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1920.

А кроме того, работу М. Штадлера и П. Крузе в книге: *Synergetics of Cognition*, hrsg. von H. Haken, M. Stadler. Springer, Berlin/Heidelberg, 1990.

## Часть II

### Книги

#### *Общая биология*

Подробное изложение основ биологии:

G. Czihak, H. Langer, H. Ziegler. *Biologie*. Springer, Berlin/Heidelberg, 1990, а также

G. Vogel, H. Angermann. *dtv-Atlas zur Biologie* (3 Bände). Deutscher Taschenbuchverlag, München, 1984.

#### *Синергетика в биологии*

H. Haken, M. Haken-Krell. *Entstehung von biologischer Information und Ordnung*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1989.

#### *Обучение*

G. Adam. *Empfindung, Bewußtsein, Gedächtnis mit den Augen des Biologen*. Frankfurt a. M., 1980.

S. Y. Schmidt (Hrsg.). *Gedächtnis*. Suhrkamp, Frankfurt a. M., 1991.

R. Sinz. *Lernen und Gedächtnis*. Stuttgart, 1981.

R. Sinz. *Neurobiologie und Gedächtnis*. Berlin, 1979.

F. Vester. *Denken, Lernen, Vergessen*. DVA, Stuttgart, 1975.

*Нейрофизиология и физиология ощущений. Мозг*

Изложение основ нейрофизиологии можно найти в следующих книгах:

- U. Bäßler. *Sinnesorgane und Nervensysteme*. Metzler, Stuttgart, 1979.
- J. Boeckh. *Nervensysteme und Sinnesorgane der Tiere*. Herder, Freiburg/Basel/Wien, 1975.
- J. C. Eccles. *Das Gehirn des Menschen*. München/Zürich, 1984.
- О восприятии и поведении животных (прежде всего жаб):
- J. P. Ewert. *Neuro-Ethologie*. Springer, Berlin/Heidelberg, 1976.
- K. D. Mörike, E. Betz, W. Mergenthaler. *Biologie des Menschen*. Quelle und Meyer, Heidelberg, 1991.
- R. F. Schmidt. *Grundriß der Neurophysiologie*. Springer, Berlin/Heidelberg, 1987.
- R. F. Schmidt. *Grundriß der Sinnesphysiologie*. Springer, Berlin/Heidelberg, 1985.
- R. F. Schmidt, G. Thews (Hrsg.). *Physiologie des Menschen*. Springer, Berlin/Heidelberg, 1987.

*Восприятие и зрительная система*

- H. Dinse. *Informationsverarbeitung im visuellen System der Katze*. Thieme, Stuttgart/New York, 1989.
- J. P. Ewert, B. Ewert. *Wahrnehmung*. Quelle und Meyer, Heidelberg, 1981.
- G. Fels. *Der Sehvorgang*. Klett, Stuttgart, 1967.
- D. Hubel. *Auge und Gehirn*. Spektrum, Heidelberg, 1989.
- I. Klebe, J. Klebe. *Durch die Augen in den Sinn*. Aulis-Deubner, Köln, 1988.
- I. Rock. *Wahrnehmung — Vom visuellen Reiz zum Sehen und Erkennen*. Spektrum, Heidelberg, 1985.

**Журнальные публикации**

- D. L. Alkon. *Eine Meeresschnecke als Lernmodell*. Spektrum 9, 38–49 (1983).
- Geo Wissen. *Gehirn, Gefühl, Gedanken*. Nr. 1, 255 (1987).
- M. Glickstein. *Die Entdeckung der Sehrinde*. Spektrum 11, 112–119 (1988).
- R. H. Masland. *Die funktionelle Architektur der Netzhaut*. Spektrum 2, 66–75 (1987).
- H. Wässle. *Auge und Gehirn — Informationsverarbeitung im visuellen System der Säugetiere*. Umschau 5, 290–296 (1986).

## Литература на английском языке

Множество очень интересных книг по нашей тематике написаны по-английски и, к сожалению, не переведены на немецкий язык, поэтому мы перечислим лишь некоторые из них:

F. E. Bloom, A. Lazerson. *Brain, Mind and Behavior*. W. H. Freeman, New York, 1988.

V. Bruce, P. Green. *Visual Perception — Physiology, Psychology and Ecology*. Lawrence Erlbaum, London/Hillsdale, 1987.

E. R. Kandel, J. H. Schwartz. *Principles of Neural Science*. Elsevier, North-Holland/New York, 1985.

S. W. Kuffler, J. G. Nichols, A. R. Martin. *From Neuron to Brain*. Sinauer, Sunderland (Mass., USA), 1984.

I. Rentschler, B. Herzberger, D. Epstein (eds.). *Beauty and the Brain — Biological Aspects of Aesthetics*. Birkhäuser, Basel/Boston/Berlin, 1988.

К главе 14 см. W. J. Freeman. *Biol. Cybern.* 56, 139 (1987), статью К. М. Грея, П. Кёнига, А. К. Энгеля и В. Зингера в книге: *Synergetics of Cognition*, hrsg. von H. Haken, M. Stadler. Springer, Berlin, 1990; там же есть и работы Р. Экхорна и Х. Й. Райтбёка.

## Часть III

Выводы, приведенные в главах с 16 по 32, основаны на математической теории, подробно изложенной в книге H. Haken. *Synergetic Computers and Cognition*. Springer, Berlin/Heidelberg, 1991.

Описание процесса распознавания образов с помощью динамики шарика, движущегося по потенциальному ландшафту, было представлено Г. Хакеном в 1970 году в одном из научных докладов, а затем включено в книгу H. Haken. *Synergetics, An Introduction*, 1. Aufl. Springer, Berlin/Heidelberg, 1977.

Аналогия между созданием и распознаванием образов проведена Г. Хакеном в книге:

*Pattern Formation by Dynamical Systems and Pattern Recognition*, H. Haken (ed.). Springer, Berlin/Heidelberg, 1979.

О синергетическом компьютере можно прочесть в книге:

*Computational Systems — Natural and Artificial*, H. Haken (ed.). Springer, Berlin/Heidelberg, 1987.

- Иллюстрации в главе 21 получены А. Фуксом на компьютере Vax. См. также: A. Fuchs, H. Haken. *Biological Cybernetics* 60, 17 (1989) и 107 (1988).
- Рассказывая о распознавании мимики, мы опирались на неопубликованные работы Г. Хакена, Р. Хёнлингера, М. Вангера.
- В главе 22 мы ссылаемся на дипломную работу Р. Хёнлингера (Штутгарт, 1989).
- Выводы, приведенные в главах с 23 по 25, основаны на следующих работах: A. Fuchs, H. Haken. *Biological Cybernetics* 60, 17 (1988); 107 (1988).
- О восприятии двойственных изображений написано очень много. Ряд ссылок по этой теме можно найти в уже упоминавшейся книге Н. Хакен. *Synergetic Computers and Cognition*.
- Источниками информации в главах 26–28 послужили работы Т. Дитцингера и Г. Хакена в *Biological Cybernetics* 61, 279 (1989); 63, 453 (1990).
- В главе 30 мы представляем результаты, полученные Р. Хаасом, А. Фуком, Г. Хакеном, Э. Хорватом, А. С. Пандья и Дж. А. С. Келсо.
- В последнее время о нейрокомпьютерах пишут очень много; мы назовем лишь некоторые "ключевые" публикации:
- W. S. McCulloch, W. H. Pitts: *Bull. Math. Biophysics* 5, 115 (1943);
- W. A. Little: *Math. Biosci.* 19, 101 (1974);
- W. A. Little, G. L. Shaw: *Math. Biosci.* 39, 281 (1978);
- R. Rosenblatt. *Principles of Neurodynamics*. Spartan Books, New York, 1962;
- J. L. Hopfield: *Proc. Natl. Acad. Sci.* 79, 2554 (1982)
- а также несколько книг, содержащих кое-какие обобщения по данной теме:
- P. D. Wassermann. *Neural Computing. Theory and Practice*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1989;
- I. Aleksander, H. Morton. *Neural Computing*. Chapman and Hill, 1990;
- H. Ritter, T. Martinez, K. Schulten. *Neuronale Netze*. Addison-Wesley, 1991.
- Описанная в главе 32 методика была разработана Г. Хакеном, Р. Хаасом и В. Банцхафом и представлена в *Biological Cybernetics* 62, 107 (1989), а Р. Хаас (дипломная работа, Штутгарт, 1989) реализовал ее на компьютере.
- Взаимоотношения между красотой и мозгом исследуются в увлекательнейшей книге
- I. Rentschler, B. Herzberger, D. Epstein. *Beauty and the Brain*. Basel/ Boston/Berlin, 1988.
- В связи с рассуждениями главы 34 появляются интересные философские идеи в духе конструктивизма (представленные, к примеру, Эрнстом фон Глазерсфельдом).

Исследования мозга обезьян:

Статья Г. Баумгартнера, Э. Петерханса и Р. фон дер Хейдта в сборнике: *Computational Systems — Natural and Artificial*, Н. Хакен (ed.). Springer, Berlin, 1987.

Очень интересные работы о применении нейрокompьютера для исследования цветовосприятия:

J. Rubner, K. Schulten. *Biological Cybernetics* 62, 193 (1990), а также диссертация Ж. Рубнер (Мюнхен).

## Часть IV

О машине Тьюринга:

Roger Penrose. *The Emperor's New Mind*. Oxford Univ. Press, 1989.

А здесь вы найдете очень обстоятельную, хотя — с нашей точки зрения — и не очень плодотворную дискуссию о сознании:

K. R. Popper, J. C. Eccles. *The Self and its Brain*. Springer, Berlin/ Heidelberg, 1977;

см. также статью Дж. Экклса в сборнике: *Complex Systems — Operational Approaches*, Н. Хакен (ed.). Springer, Berlin/Heidelberg, 1985.

## Именной указатель

- Аристотель 10, 53  
Арчимбольдо, Джузеппе 46, 193
- Баблюяцц, Агнес 43  
Бардин, Джон 154  
Баумгартнер, Гюнтер 237  
Беднорц, Йоханнес Георг 154  
Борзеллино, А. 212  
Брока, Поль 66  
Бунц, Герберт 244
- Вангер, Филиппос 172  
Велькер, Генрих 154  
Вертхаймер, Макс 47  
Визел, Торстен 127, 129, 131, 138  
Вундерлин, Арне 14
- Гёдель, Курт 249  
Гёте, Иоганн Вольфганг фон 46, 245  
Гален, Клавдий 10, 54  
Галль, Франц Йозеф 64  
Гальвани, Луиджи 58  
Гейзенберг, Вернер 154  
Гельмгольц, Герман фон 90, 145  
Геринг, Эвальд 120, 145  
Герофил Халкедонский 53  
Гилберт, Чарлз 129  
Гиппократ 10, 53  
Гольджи, Камилло 54  
Грезер, Х. 206  
Грей, К. М. 150
- Дали, Сальвадор 202
- Дженнари, Франческо 125, 128  
Дитцингер, Томас 259
- Зингер, Вольф 150, 152
- Иноуйе 125
- Йоханссон, Г. 215
- Кёлер, Вольфганг 47, 203  
Кёпхен, Ханс-Петер 46  
Канижа, Г. 48, 50, 237  
Кахаль, Сантьяго Рамон-и- 99  
Келсо, Скотт 35, 46, 244  
Кох, Кристоф 152  
Крик, Фрэнсис 152, 155  
Крис, Йоханнес фон 146  
Крузе, П. 47  
Купер, Леон 154  
Куффлер, Стивен 102, 105, 120, 127
- Левенгук, Антони ван 54  
Леман, Дитрих 41, 42  
Ливингстон, Маргарет 150  
Листер, Уильям Тинделл 127  
Литтл, Уильям А. 224  
Лондон, Фриц 154  
Лэнд, Э. 242
- Маккаллок, У. С. 13, 220, 224  
Маршалл, Уэйд 127  
Мейер, Онно 37  
Метцлер, Т. 242  
Мински, Марвин 221

Моне, Клод 49  
Мунк, Герман 125  
Мюллер, Алекс 154  
О'Тул, А. Дж. 178, 181

Пейперт, С. 221  
Пенроуз, Роджер 248, 260  
Питс, У. Г. 13, 220, 224  
Пошпер, Карл 250

Райтбёк, Герберт 151  
Райхардт, Вернер 216  
Ренчлер, Инго 234  
Розенблатт, Р. 221  
Рубнер, Жанна 242

Сейновски, Терренс 223

Толбот, Сэмюэл 127  
Тьюринг, Алан 35

Уотсон, Джеймс Д. 155

Ферье, Дэвид 125  
Фрёлих, Герберт 154

Фрейд, Зигмунд 141  
Фридрих, Рудольф 44  
Фримен, Уолтер 150  
Фукс, Армин 44

Хёнлингер, Роберт 172, 259  
Хаас, Рихард 259  
Холмс, Гордон 127  
Хопфилд, Джон 157, 224  
Хьюбел, Дэвид 127, 129, 131, 138,  
150

Шепард, Р. Н. 242  
Шмид-Шёнбайн, Хольгер 46  
Шрёдингер, Эрвин 154  
Шриффер, Роберт 154  
Штадлер, Михаэль 47, 216, 219  
Штайнбух, Карл 156  
Шультен, Клаус 242

Экклс, Джон 250  
Экхорн, Р. 151  
Эрасистрат Александрийский 53

Юнг, Томас 145

## Предметный указатель

- Адаптация 86, 198
  - невральная 99
  - фотохимическая 98
- Аккомодация 89
- Аксон 56
- Активность, нейронная 163
- Альфа-волны ( $\alpha$ -волны) 41, 43
- Амплитуда волны 17, 184, 219
- Аплизии 33, 78
- Аппарат, зрительный 89
- Area striata* 125
- Ассимиляция 198
- Ассоциация 75
  
- БКШ-теория 154
- Бистабильность 20, 21, 29
- Близорукость 89
- Борьба, конкурентная 16
  
- Вероятность 249
- Верхнее двуххолмие четверохолмия 121, 124
- Вещество белое 125
  - серое 125
- Внимание 99, 203, 213
- Волна, когерентная 31
- Волновая функция, макроскопическая 155
- Воспоминание 141
- Восприятие 75, 79, 99, 153, 253
  - зрительное 53, 75, 127, 239, 241
  - зрительное, процесс 52, 216
  - колебания восприятия 208
  - направления 134, 136
  - паттернов движения 204, 214, 220
  - пространства (объема) 90
  - пространственное 241
  - содержание 170, 208, 213, 252
  - эстетическое 234
- Выражение лица 172, 173, 196
  
- Ганглиозидные группы 83
- Гейзенберга, принцип неопределенности 248
- Гештальт (образ) 47, 175, 237
- Гештальтпсихология 46, 156
- Гиперколонки (*hypercolumns*) 138
- Гистерезис 26, 29, 208
  - при движении пальцев 39
- Глаз 84
- Глазное яблоко 89
- Глазодоминантность 136
  
- ДНК 11, 155
- Дальнозоркость 89
- Двигательный процесс, кодировка 219
- Движение глаз 124, 141
  - детекторы 217
  - координация 72
  - пальцев 36
  - паттерны 35
  - поступательное 35
  - способы (походки, аллюры) 215
- Дендриты 56, 101
- Дефект зрения 11

- Диафрагма ирисовая 84  
 — отверстие 84, 88  
 Дофамин-2-рецепторы 34  
 Дуализм, корпускулярно-волновой 248  
 Дух 10, 250  
 Жидкость 14, 251  
 — внутриглазная 88  
 Закон Ома 52  
 Замедление, критическое 21  
 Зона, полосатая 125  
 Зрачок 85, 98  
 Зрение, пространственное 89, 122  
 Идеал красоты 234  
 Идеализм 250  
 Изменение синаптических сил, динамическое 196  
 Изображения двойственные («двойные картинки») 49, 157, 201, 213  
 — двойственные, в компьютерной модели 208  
 — двойственные, динамика 208  
 — зашумленные 175  
 — лиц, зашумленные 48, 175  
 — лиц, искаженные 196  
 — лиц, профильтрованные 176  
 — обработка 13, 91  
 — ориентация в собственной плоскости 189  
 — преобразование 182, 194  
 — распознавание 160, 200  
 — точка (пиксель) 94, 99, 102  
 Имитация нагрева 225  
 Инвариантность 175, 191  
 Интеллект искусственный 12, 221, 239, 252  
 Канал, передающий 64  
 Капли (*blobs*) 148  
 Категория 235  
 — представитель 235  
 Качества 253  
 Квантовая теория 154  
 Келсо опыты 252  
 Клетки «бабушкины» 141, 168  
 — амакриновые 100, 101, 110, 113  
 — биполярные 99, 112  
 — биполярные, *off*- 112  
 — биполярные, *on*- 112  
 — ганглиозные 100, 102, 111, 114  
 — ганглиозные, *on*- 115, 117  
 — ганглиозные, X-, Y- и W- 105  
 — гиперкомплексные 138, 153  
 — горизонтальные 99, 110  
 — двойные контрастные 147  
 — зрительные 92, 99, 101  
 — комплексные 133, 136  
 — простые 133  
 — простые контрастные 147  
 — рецепторные 63, 99, 102  
 — фоторецепторные 97, 121  
 Клетки, нервные (нейроны) 53, 100  
 Когерентность 31, 150, 155  
 Колбочки 92, 102, 146  
 Колебания 212  
 — квантовые 247  
 — критические 21  
 — случайные 225  
 — фазы (при движении пальцев) 36  
 Колонки 137, 142  
 — глазодоминантные 138  
 Компьютер параллельный 221, 238  
 — персональный (*personal computer*) 12  
 — последовательный 221, 238

- синергетический 13, 160, 182
- электронный 40
- Контрастность 117, 145, 148
- Координация 35
- Кора зрительная 121, 125, 127, 131
- зрительная, первичная 124, 127
- Кофеин 34
- Кровяное давление 46
- Куб Некера 49, 202, 205, 212
  
- Лазер 30, 247, 251
  
- Магнетизм 52
- Магнетик, элементарный 20, 52
- Магнитоэнцефалограмма 46
- Материализм 250
- Материя 10, 250
- Машина 246, 250
- Тьюринга 238, 248
- Медиатор (нейромедиатор) 63, 73, 78, 80, 112
- Метаморфоза (превращение) 47
- Метод обратной передачи (*back propagation*) 224
- Механика, ньютонова 33, 249
- Мимика 173
- Модель, компьютерная 10, 12, 162, 208
- Мозг 10, 40, 53
- болезни 66, 76
- большие полушария 64, 69, 125
- височные доли 64
- волны 43
- затылочная доля 64, 69, 121, 125
- кора больших полушарий 64, 125
- лобная доля 64, 67
- модель 156
- полушария 64, 70, 122
- продолговатый 64
- промежуточный 64, 72
- спинной 56
- средний 64, 121
- теменные доли 64
- токи 41
- точка неустойчивости 42
- Мозжечок 64, 72
- Мозолистое тело 64, 69
- Моллюски 78
- Морфология 46
- Мотивация 75
- Мультистабильность 22, 29
- Мышление 12, 252
- процесс 13, 53
  
- Намагничивание 26
- Насыщение внимания, гипотеза 208
- Науки, когнитивные 237
- Нейрокомпьютер 13, 157, 220
- Нейроны 53, 56
- модельные 162, 165
- Нерв, зрительный 101
- Нервная система 56, 78
- периферийная 56
- центральная 56
- Нервное волокно 56, 61
- Нервный импульс 61, 98, 104
  
- Область претектальная 121, 124
- синаптическая 92
- Обработка, параллельная 13, 142
- Образ 159, 169
- прототипный 161, 173, 228
- распознавание 157
- распознавание, синергетическим компьютером 159
- создание 157
- Обучение 78
- контролируемое 223

- матрица 165
- процесс 75
- процесс, для синергетического компьютера 228
- Общее состояние системы 163
- Объекты, движущиеся 152
- on-Нейроны 105, 109, 119
- Операция исключающего «ИЛИ» 221
- Опсин 95
- Оптическая сила (линзы) 88
- Опыт 78
- Осцилляция, когерентная 151
- Отображение, логарифмическое 189
- off-Нейроны 105, 109, 119
- Палочки 92, 102
- Память 75, 79
  - ассоциативная 156, 225
  - долговременная 76, 78, 79
  - кратковременная 76, 78, 80
  - среднесрочная 76, 78
- Параметр внимания 165, 200, 240
  - порядка 17, 21, 23, 36, 43, 156, 167, 208, 244, 245, 252
  - порядка, конкурентная борьба 25, 158, 167, 169
  - управляющий 18
- Паттерн, перцептивно-моторный 244
- Переменные, скрытые 223
- Периодические колебания при восприятии 212
- Перцептрон 221
- Пигмент, зрительный 98
- Пиксель 94, 160, 162, 165, 176, 182
- Подход «сверху вниз» (*top-down*) 246
  - «снизу вверх» (*bottom-up*) 246
- Поле ассоциативное 69
  - вероятности 249
  - вероятности в квантовой теории 249
  - зрения 122
  - зрительное 69, 124, 125
  - зрительное, первичное 125, 127
  - зрительное, фронтальное 69
  - морфогенетическое 35
  - моторное 69
  - моторное, коры головного мозга 69
  - рецептивное 104, 107, 110, 114, 131, 133, 142, 147
  - рецептивное, периферийная зона 105, 113, 115
  - рецептивное, центральная зона 105, 112, 115
  - сенсорное, коры головного мозга 69
- Понимание 245
- Пороговое значение 63, 220
- Потенциал поля 151
  - электрический 150
- Прегнантность 48
- Представление, внутреннее 242
- Привыкание 99
- Признак, отличительный 158
- Принцип подчинения 23, 37, 245, 251
- Приступ, эпилептический 43
- Программа, моторная 40
- Процессор, текстовый (*word processor*) 12, 221
- Пурпур, зрительный (красный) 91, 92, 95, 102
- Пятно желтое 94, 102, 107, 123, 126
  - слепое 95
- Равновесие, неустойчивое 16
- Радужная оболочка 84

- Раздражитель адекватный 64  
 — внешний 63  
 — действительный 131  
 Распознавание 75, 156  
 — образов, процесс 165  
 — планов городов 173  
 Расстояние, оценка 90  
 Редукционизм 155, 245  
 Роговица 88  
 Роршаха, тест 213  
  
 Самоорганизация 10, 13, 228  
 — восприятия 83, 153  
 — процесс 40  
 Сверхпроводимость 154  
 Свет 91, 143  
 Светочувствительность глаза 98  
 Сдвиг фазы 184  
 Сегмент, наружный (палочек и кол-  
 бочек) 92  
 Серотонин 34  
 Сетевая архитектура синергетиче-  
 ского компьютера 162  
 Сетчатка 74, 84, 91, 99, 102, 126, 160  
 Сеть, нейронная 10, 153, 155, 220,  
 224  
 Сила, синаптическая 83, 162, 166,  
 223  
 Символы 12  
 — обработка 239  
 Симметрия, нарушение 19  
 Синапсы 11, 56, 62, 79, 112, 162  
 Сингуляризм 245  
 Синергетика распознавания образов  
 156  
 — основные положения 14  
 — пример 14  
 Синтез белка 81  
  
 Системы, самоорганизующиеся 11,  
 40, 155  
 Скотофобин 81  
 Слепота вербальная (алексия) 142  
 — душевная (зрительная агнозия)  
 142  
 — куриная (гемералопия) 91  
 Слой, пигментный 102  
 Смешение цветов аддитивное 144  
 — субтрактивное 144  
 Смещение объектов в пространстве  
 182  
 Сознание 152, 248  
 Соппротивление, электрическое 154  
 Состояние аттракторное 240  
 Спектр 144  
 Спин 224  
 Стекло, спиновое 224  
 Стереофильм 91  
 Структурализм 47  
 Сцена, сложная 198  
  
 Таламус 72, 121, 123  
 Тело клетки (сома) 56, 92, 99  
 — латеральное колленчатое 121, 123,  
 129  
 — стекловидное 88  
 Теннисист 244  
 Теорема о неполноте (теорема  
 Гёделя) 249  
 Теория трехкомпонентного цветово-  
 го зрения 145  
 Ток, электрический 52  
 Тон, цветовой 143  
 Тракт, зрительный 91, 121  
  
 Увеличительное стекло 88  
 Универсализм 245

- Управление сенсорно-моторными функциями 243
- Уравнение Шрёдингера 251
- Фаза, относительная 37
- Ферромагнит 20
- Физика 52
- Физикализм 35
- Фильтр 223  
— адаптивный 223
- Фильтрация высокочастотная 177  
— низкочастотная 177  
— частотная 41
- Флуктуация, критическая *см.* Коллебанья
- Фотоаппарат 84
- Фурье анализ 182, 219  
— коэффициент 189  
— преобразование 189
- Халдол 34
- Хаос, детерминированный 32, 44  
*Hermisenda* 78
- Холизм 245
- Холм потенциальный 224
- Холмистый ландшафт 37  
— процесса восприятия 156, 163, 228
- Хрусталик 86
- Цвет 143  
— промежуточный 144
- Цветовое зрение 92, 142  
— теория дополнительных цветов 145
- теория трехкомпонентного цветового зрения 145
- Цветовосприятие 94, 143, 145
- Целесообразность 234
- Центр зрения 74, 125  
— обоняния 69  
— речи 66, 124  
— речи, моторный 69  
— речи, сенсорный 69  
— слуха 66  
— чтения 69, 124
- Частота дыхания 46  
— сердечных сокращений 46
- Чувствительность тактильная 67, 122  
— температурная 120
- Шаблоны 198
- Электрод 59, 66, 96, 102, 110  
— стеклянный 58
- Электроны 52, 248
- Электрофизиология 54
- Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) 41
- Элемент раstra 160
- Эмергенция новых качеств 34, 47
- Эмоции 213
- Энграмма, динамическая 80  
*encephalos* 10
- Ячейки, цилиндрические 22  
— конфигурация 16

## Источники иллюстраций

В книге были использованы иллюстрации из следующих работ:

- Ulrich Bäßler, et al.: Sinnesorgane und Nervensystem. Stuttgart 1975: рис. 6.4, 6.12, 9.1, 10.13
- Biologie heute, S II, hrsg. von W. Miram, K.-H. Scharf. Hannover 1988: рис. 6.8, 6.13, 7.2, 7.4
- Biologie heute, S II, Lehrerhandbuch, hrsg. von J. Jaenicke, W. Miram. Hannover 1991: рис. 6.11, 7.1, 10.3
- Floyd E. Bloom, Arlyne Lazerson: Brain, Mind and Behavior. New York 1985, 1988: рис. 6.9
- Jürgen Boeckh: Nervensysteme und Sinnesorgane der Tiere. Freiburg/Basel/Wien 1975: рис. 6.7
- Karl Daumer, Renata Hainz: Verhaltensbiologie. München 1980: рис. 7.3
- Sandro Del-Prete: Illusorismen. Bern 1980: рис. 25.3
- Jörg-Peter Ewert, Sabine Beate Ewert: Wahrnehmung. Heidelberg 1981: рис. 8.1, 10.1
- Gerhard Fels: Der Sehvorgang. Stuttgart 1967: рис. 10.12
- Gehirn und Nervensystem. Spektrum der Wissenschaft. Heidelberg 1983: рис. 6.10 (фрагмент)
- Hermann Haken: Synergetics. An Introduction. Berlin/Heidelberg 1977: рис. 16.1
- W. E. Hill: My Wife and my Mother-in-Law. Puck 1915: рис. 26.4
- David H. Hubel: Auge und Gehirn. Heidelberg 1989: рис. 12.3, 12.5
- J. Jastrow: Fact and Fable in Psychology. Houghton Mifflin, New York 1900: рис. 26.5
- Eric R. Kandel, James H. Schwartz: Principles of Neural Science. New York/Amsterdam/Oxford 1985: рис. 12.2, 12.7, 13.1, 13.2

- Stephen W. Kuffler, John G. Nicholls: From Neuron to Brain. Sunderland (Mass., USA) 1976: рис. 10.4, 10.6
- Ingo Rentschler, Barbara Herzberger, David Epstein: Beauty and the Brain. Basel/Boston/Berlin 1988: рис. 5.8, 5.9, 33.2
- R. F. Schmidt (Hrsg.): Grundriß der Neurophysiologie. Berlin/Heidelberg/New York 1974: рис. 6.2, 6.3
- R. F. Schmidt (Hrsg.): Grundriß der Sinnesphysiologie. Berlin/Heidelberg/New York/Tokio 1985: рис. 10.2, 10.5, 10.8, 12.6, 12.8, 12.9
- Richard F. Thompson: Das Gehirn. Heidelberg 1990: рис. 6.1, 10.11, 11.1, 12.4
- M. Bestehorn, H. Haken (неопубликованные рукописи): рис. 2.13
- B. R. Bugelski, D. A. Alampay в: Can. J. Psychol. 15, 205 (1961): рис. 26.6
- T. Ditzinger, H. Haken в: Biological Cybernetics 61, 279 (1989); 63, 453 (1990): рис. 27.1–27.5
- R. Friedrich, A. Fuchs, H. Haken в: Rhythms in Physiological Systems, hrsg. von H. Haken, H. P. Koeperchen. Berlin/Heidelberg 1991: рис. 4.2, 4.3
- A. Fuchs, H. Haken в: Biological Cybernetics 60, 17 (1988): рис. 17.2–17.4; 107 (1988): рис. 23.10, 23.12, 23.13, 25.1, 25.2
- A. Fuchs, H. Haken в: Dynamic Patterns in Complex Systems, hrsg. von J. A. S. Kelso, A. J. Mandell, M. F. Shlesinger. World Scientific, Singapore (1988): рис. 24.1, 24.2
- C. M. Gray, P. König, A. K. Engel, W. Singer в: Synergetics of Cognition, hrsg. von H. Haken, M. Stadler. Berlin/Heidelberg 1990: рис. 14.1
- R. Haas. Stuttgart 1989 (дипломная работа): рис. 32.2–32.6
- H. Haken, R. Haas, W. Banzhaf в: Biological Cybernetics 62, 107 (1989): рис. 32.1
- H. Haken, R. Hönlinger, M. Vanger (неопубликованные рукописи): рис. 21.1–21.3
- H. Haken, J. A. S. Kelso, B. Bunz в: Biological Cybernetics 51, 347 (1985): рис. 3.4
- H. Haken, J. A. S. Kelso, A. Fuchs, A. S. Pandya в: Neural Networks 3, 395 (1990): рис. 30.1
- R. Hönlinger. Stuttgart 1989 (дипломная работа): рис. 22.6–22.10, 24.3

- A. J. O'Toole, R. B. Millward, J. A. Andersen в: *Neural Networks*, Vol. 1 (1988):  
рис. 22.5
- Physik in unserer Zeit*, 22. Jg., Heft 6 (1991): рис. 33.1
- Römisch-Germanisches Museum, Köln: рис. 26.1
- H. Schröder в: *Poggendorffs AnnaLen der Physik und Chemie* 181 (1858):  
рис. 26.8
- Science*, Vol. 171, No. 3972 (1971): рис. 35.1 (фрагмент)
- Spektrum der Wissenschaft* 11, (1988): рис. 12.1
- M. Stadler, P. Kruse в: *Synergetics of Cognition*, hrsg. von H. Haken, M. Stadler.  
Berlin/Heidelberg 1990: рис. 2.10, 2.12, 5.2
- Не упомянутые в данном списке иллюстрации взяты из архива авторов.

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

**subscribe@rcd.ru**

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

**http://shop.rcd.ru**

Книги также можно приобрести:

1. Москва, ФТИАН, Нахимовский проспект, д. 36/1, к. 307,  
тел.: 332–48–92, (почтовый адрес: Нахимовский проспект, д. 34).
2. Москва, ИМАШ, ул. Бардина, д. 4, корп. 3, к. 414, тел. 135–54–37.
3. МГУ им. Ломоносова (ГЗ, 15 этаж).

4. Магазины:

Москва: «Дом научно-технической книги» (Ленинский пр., 40)

«Московский дом книги» (ул. Новый Арбат, 8)

«Библиоглобус» (м. Лубянка, ул. Мясницкая, 6)

С.-Пб.: «С.-Пб. дом книги» (Невский пр., 28)

**Германн Хакен, Мария Хакен-Крелль**

## ТАЙНЫ ВОСПРИЯТИЯ

*Дизайнер М. В. Ботя*

*Технический редактор А. В. Ширококов*

*Компьютерная верстка Д. К. Князев*

*Корректор М. А. Ложкина*

---

Подписано в печать 19.04.02. Формат 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,81. Уч. изд. л. 15,65.  
Гарнитура Таймс. Бумага офсетная №1.  
Тираж 2000 экз. Заказ №

АНО «Институт компьютерных исследований»  
426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.  
Лицензия на издательскую деятельность ЛУ №084 от 03.04.00.  
http://rcd.ru E-mail: borisov@rcd.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством  
предоставленных диапозитивов в ГИПП «Вятка».  
610033, г. Киров, ул. Московская, 122.

---