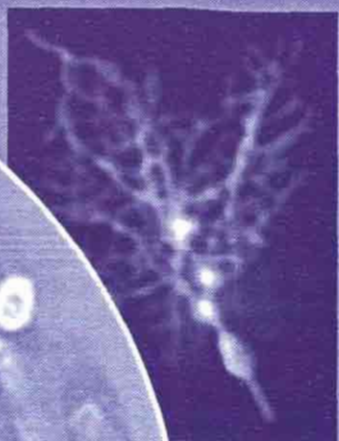




НАУКИ ОБ  
ИСКУССТВЕННОМ

Из классического наследия



М. Арбиб

**МЕТАФОРИЧЕСКИЙ  
МОЗГ**



УРСС



НАУКИ ОБ  
ИСКУССТВЕННОМ

Michael A. Arbib

THE METAPHORICAL BRAIN

---

**М. Арбиб**

# **МЕТАФОРИЧЕСКИЙ МОЗГ**

Перевод с английского  
*Э. Л. Наппельбаума*

Под редакцией и с предисловием  
профессора  
*Д. А. Поспелова*

Издание второе, стереотипное

**Москва**



**УРСС**

**Редакционный совет серии:**

Э. В. Попов — д. т. н., проф. (председатель);  
В. И. Аршинов — д. филос. н., проф.; В. Б. Бритков — к. ф.-м. н., доц.;  
В. В. Емельянов — д. т. н., проф.; О. П. Кузнецов — д. т. н., проф.;  
В. М. Курейчик — д. т. н., проф.; В. Е. Лепский — д. психол. н., проф.;  
Г. Г. Малинецкий — д. ф.-м. н., проф.; Г. С. Осипов — д. ф.-м. н., проф.;  
В. Г. Редько — д. ф.-м. н., проф.; В. М. Розин — д. психол. н., проф.;  
В. Б. Тарасов — к. т. н., доц. (ученый секретарь);  
Ю. В. Тюменцев — к. т. н., в. н. с., А. С. Ющенко — д. т. н., проф.

**Арбиб Майкл**

**Метафорический мозг:** Пер. с англ. / Под ред. и с предисл. Д. А. Поспелова.  
Изд. 2-е, стереотипное. — М.: Едиториал УРСС, 2004. — 304 с. (Науки  
об искусственном.)

ISBN 5-354-00760-7

Вниманию читателей предлагается книга известного американского ученого М. Арбиба. Автор подробно рассматривает результаты двух основных направлений в кибернетическом исследовании мышления: так называемой теории искусственного интеллекта, которая обращает основное внимание на внешнее поведение объектов, не касаясь структурного аспекта, и теории конструирования роботов, где наряду с имитацией внешних проявлений поведения стараются сохранить и принципы его структурной организации. Книга написана живо и популярно.

Предназначена для широкого круга биологов, математиков, инженеров, для всех тех, кто интересуется проблемой искусственного интеллекта.

Издательство «Едиториал УРСС». 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 9.

Лицензия ИД № 05175 от 25.06.2001 г. Подписано к печати 14.04 2004 г.

Формат 60×90/16 Тираж 1500 экз. Печ. л. 19. Зак. № 3-1339/527.

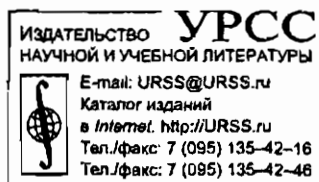
Отпечатано в типографии ООО «РОХОС». 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 9

ISBN 5-354-00760-7

© Предисловие:

Д. А. Поспелов, 1976, 2004

© Едиториал УРСС, 2004



## О серии «Науки об искусственном»

Этой монографией издательство УРСС продолжает новую междисциплинарную серию книг *«Науки об искусственном»*. Данная серия возникла по инициативе Российской ассоциации искусственного интеллекта (РАИИ). Ее основание вызвано стремлением объединить усилия специалистов различных областей — инженеров и математиков, философов и психологов, физиологов и биологов, социологов и лингвистов, программистов и системотехников — в исключительно важном деле разработки теоретических, методологических и практических основ нового класса наук, которые нобелевский лауреат Г. Саймон назвал «науками об искусственном».

Почему и как возникла идея выпуска данной серии? В последние годы происходит бурное развитие передовых информационных и коммуникационных технологий, проникновение процессов информатизации и компьютерной интеграции во все сферы жизни общества. Образуется единое мировое информационное пространство, зарождается сетевая цивилизация, основанная на знаниях. Все это обуславливает необходимость новой стратегии развития науки, опирающейся на междисциплинарные исследования. По нашему мнению, стратегическое значение междисциплинарных исследований состоит в том, что сегодня только на их основе можно обеспечить реальный прорыв в тех или иных областях знания или разработке тех или иных инновационных технологий.

Здесь следует отметить, что пока отечественные читатели не приучены к книгам междисциплинарного характера, которые требуют философских рассуждений, построены на разнородном материале и неизбежно несут в себе элементы дискусионности. К сожалению, многие не понимают их революционной роли, предпочитая узкоспециализированную литературу или издания, написанные в стиле «руководства пользователя». Эта тенденция особенно укрепилась в последние годы. Между тем, западные, в особенности американские читатели (и, конечно, издатели) уделяют наибольшее внимание как раз междисциплинарной литературе с «налетом» философии. Именно междисциплинарные книги постановочного характера, содержащие нестандартные, неожиданные идеи и ростки оригинальных решений, могут обеспечить продвижение в неизведанные области, которые в конечном итоге породят новые технологии и обеспечат максимальную прибыль. Поэтому, книги, написанные в таком жанре,

там хорошо продаются и приносят наибольшие дивиденды. Блестящим примером служит знаменитая монография М. Хаммера и Дж. Чампи «Резинжиниринг предприятий: манифест революции в бизнесе», в которой изложены основы новой философии и психологии стратегического менеджмента. Эта книга инициировала развитие мощного направления, связанного с реорганизацией процессов и формированием сетевых структур предприятий. В течение нескольких лет она занимала лидирующие позиции среди бестселлеров американского книжного рынка.

Среди междисциплинарных научно-практических областей следует, несомненно, выделить науки об искусственном, которые по многим признакам можно отнести к наукам нового поколения. Типичными представителями современных наук об искусственном являются:

- *робототехника* и примыкающие к ней дисциплины, занимающиеся конструированием искусственных органов (эффекторов, рецепторов), а также синтезом искусственных движений и действий;
- *виртуалистика*, предметом которой выступает создание искусственных сред (виртуальных реальностей);
- *семиотика* — наука о знаковых системах и их приложениях в современных процессах и средствах коммуникации;
- *нейроинформатика* — наука об искусственных нейронных сетях;
- *компьютерная лингвистика* — наука о естественных и искусственных языках, применяемых для обеспечения работы ЭВМ.

Центральное место среди этих наук занимают *искусственный интеллект (ИИ)* и *искусственная жизнь*, — обобщающие научно-практические комплексы, которые, вобрав в себя наиболее ценные идеи и подходы современного естествознания, воплощают их в компьютерных системах, способных решать интеллектуальные задачи, ранее бывшие прерогативой специалистов, или действовать, используя принципы и механизмы организации живых существ. Можно предположить, что уже в первые десятилетия XXI-го века науки об искусственном выйдут на авансцену мирового развития и сформируются основы единой теории открытых, активных, неоднородных, развивающихся искусственных систем.

Хотелось бы отметить, что в России накоплен многолетний положительный опыт издания подобных серий. Например, большой читательский успех имел ряд проектов издательства «Наука», таких как: «Проблемы искусственного интеллекта», «Научные основы робототехники», а особенно, популярная серия «Кибернетика — неограниченные возможности и возможные ограничения». В свою очередь, издательство УРСС также имеет хороший опыт в этой сфере: с 1996 г. оно публикует междисциплинарную серию книг «Системные исследования», позже появились интересные серии «Философы XX-го века», «Из истории логики XX-го века», «Синергетика: от прошлого к будущему» и др. Им также активно издаются

монографии классиков науки, посвященные проблемам научной методологии и взаимодействия различных научных областей (например, книги К. Поппера, И. Пригожина, Р. Пенроуза и др.).

Предлагаемая вашему вниманию серия открыта для всех, кого интересует ее проблематика. Нам хотелось бы видеть в числе ее авторов не только ученых, объединяемых в рамках Российской ассоциации искусственного интеллекта, но также представителей самых различных научных школ и движений: философов, разрабатывающих методологические проблемы виртуалистики, синергетики, развития искусственных систем; психологов, исследующих процессы познания, деятельности, общения, рефлексивного поведения, взаимодействия образных и вербальных механизмов мышления; специалистов в области лингвистики и семиотики (в особенности, тех, кто занимается компьютерной лингвистикой и объединяется вокруг известных семинаров «Диалог»); многочисленных приверженцев нейроинформатики и пока еще редких энтузиастов столь многообещающего направления как искусственная жизнь; специалистов по менеджменту, реинжинирингу, логистике, теории организаций, занимающихся разработкой и приложениями искусственных агентов и виртуальных организаций; математиков, стремящихся развивать формальный аппарат для моделирования факторов сложности, неопределенности, эволюции систем различной природы, и многих-многих других.

## ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

По определению, данному еще Аристотелем, метафора — «есть перенесение имени или с рода на вид, или с вида на род, или с вида на вид, или по аналогии...». Средневековые философы считали метафору важным элементом научного мышления, позволяющим сводить непонятное и непостижимое к понятному. Жан-Жак Руссо считал, что пока ученый не располагает достаточными знаниями о предмете исследования, он вынужден прибегать к метафорам и заимствованиям из других областей науки для объяснения сути наблюдаемых явлений.

Книга, которую вы начинаете читать, называется «Метафорический мозг». Название это неслучайно. Ее автор, известный специалист в области теоретической кибернетики М. Арбиб, считает, что наши знания о структуре и функции мозга находятся еще на такой стадии, когда между нейрофизиологом, биохимиком и психологом, изучающими мозг каждый на своем уровне, нет никакого взаимопонимания. И установить это взаимопонимание, объединить экспериментальные данные разных наук в единую теорию функционирования мозга, объясняющую поведение человека, может лишь ученый, который сумеет стать выше узкоспециальных исследований и точек зрения. Такого ученого М. Арбиб называет кибернетиком, а науку, которую ему предстоит создать, — кибернетической теорией мозга.

А поскольку такую науку только предстоит создать, то естественно, что у нее еще нет сложившейся терминологии, основные понятия ее еще не вычленены и не названы, структуры и связи между понятиями еще не сформированы. Такое положение порождает необходимость обсуждать задачи и проблемы, возникающие перед исследователем, на метафорическом уровне, используя арсенал понятий, заимствованных из разных областей науки о мозге, психологии и кибернетики. Однако подобное заимствование небезопасно. Используемые понятия несут на себе отпечаток той науки, в которой они возникли, порождая у исследователя побочные иллюзии и ассоциации. Возникает стремление принимать некоторое внешнее сходство между

предметами и явлениями за глубокую внутреннюю аналогию между ними. От опасности для исследователя подобных «рецидивов» неоднократно предостерегал известный специалист в области теории решения математических задач Д. Пойа. В своей книге «Математика и правдоподобные рассуждения», выпущенной и в русском переводе (ИЛ, 1957), он писал, что всякая метафора подчеркивает некоторое сходство, но не всякое сходство можно считать аналогией. Отличие аналогии от других видов метафор, по мнению Д. Пойа, определяется намерением лица, использующего метафору. Д. Пойа по этому поводу пишет: «Сходные предметы согласуются между собой в каком-то отношении. Если вы намереваетесь свести это отношение, в котором они согласуются, к определенным понятиям, то вы рассматриваете эти сходные предметы как аналогичные. Если вам удастся добраться до ясных понятий, то вы выяснили аналогию».

Именно этот процесс построения на основании подмеченного сходства и различия между мозгом и другими объектами глубоких аналогий, с помощью которых можно было бы создать фундамент метафорической теории мозга, и описан в книге М. Арбиба.

Две основные метафоры интересуют автора данной книги. Одна из них: «человек — это животное» — основана на теории эволюции биологических видов. С точки зрения этой метафоры человек рассматривается в неразрывной связи с миром животных, а его строение и поведение можно объяснить на основе богатейших данных, накопленных сравнительной биологией и теорией эволюции. Исследования, опирающиеся на эту метафору, имеют своей конечной целью создание теории мозга. Другая метафора: «Человек — это машина» — основана на использовании внешнего сходства в поведении человека и различных технических устройств; чаще всего — это сходство по результатам деятельности, а в качестве технического, машинного эталона для сравнения используется ЭВМ. Как отмечает М. Арбиб, из этой метафоры вытекают по крайней мере два различных следствия. Во-первых, подмена человека комплексом программ, реализуемых на ЭВМ, создает у многих исследователей иллюзию, что, исследуя этот комплекс, они исследуют процессы, протекающие в мозгу человека при решении аналогичных задач. Сам процесс получения человеком решения объясняется на основе весьма шаткой предпосылки о том, что одинаковость получаемых результатов свидетельствует об одинаковости процессов, приводящих к этим результатам. Во-вторых, следствием указанной метафоры является создание теории искусственного интеллекта, в которой изучение собственно человека и механизмов, лежащих в основе его интеллектуальной деятельности, отодвигается на второй план. Центральной проблемой является



выяснение возможностей ЭВМ по имитации той деятельности, которую мы склонны считать творческой и интеллектуальной, когда ее реализует сам человек.

Свою основную задачу М. Арбиб видит в развитии исследований, базирующихся одновременно на той и на другой метафорах. Его целью является создание теории мозга, основанной по терминологии автора книги на «распределенных децентрализованных машинах». М. Арбиб считает, что для эффективной имитации деятельности человека при решении задач необходимо создать машины, структура которых отражала бы столь важные для структуры мозга принципы, как параллельность операций, иерархичность связей между ними, наличие модели собственного тела и т. п. Можно сказать, что М. Арбиб посвятил свои исследования поиску принципов организации мозга, помогающих решать те задачи, с которыми мозг повседневно сталкивается.

Мне бы не хотелось пересказывать в предисловии содержание книги. Каждый читатель сам может пройти путь, по которому ведет автор. Это путешествие не из легких и требует от читателя немалых усилий. Иначе и не могло бы быть. Для того чтобы использовать обе метафоры, лежащие в основе теории мозга, которую автор книги начинает строить, необходим синтез данных нейрофизиологии, биохимии, цитологии, теории программирования, теории организации вычислительных комплексов, психологии, лингвистики и многое другое. При этом возникают огромные терминологические трудности, ибо в таком сплаве сливаются воедино языки разных наук, столь малопонятные любому непосвященному. Однако, основываясь на своем собственном опыте, я могу с уверенностью сказать, что усилия, приложенные для преодоления этих трудностей, не пропадут впустую. Преодолев их, читатель почувствует красоту и стройность тех концепций теории мозга, которые М. Арбиб предлагает нам в третьей части своей книги.

В заключение я хотел бы сделать два замечания относительно концепции автора. Первое из них касается того, как Арбиб понимает проблему планирования интеллектуальной деятельности. В этом вопросе он, как и многие другие кибернетики, стоит на позициях, известных в психологии мышления под названием «лабиринтная гипотеза». Согласно этой гипотезе, основным элементом творческой деятельности человека является целенаправленный отбор открывающихся перед ним путей в заданном ему лабиринте возможностей. Человек как бы «видит» весь лабиринт допустимых способов поиска решения с «птичьего полета» и с помощью особого, присущего ему механизма, весьма быстро отбрасывает все бесперспективные варианты и оставляет

лишь те, которые с некоторой гарантированной надежностью могут привести к успешному решению. Именно на этой основе построено большинство программ для ЭВМ, имитирующих интеллектуальную деятельность человека. В таких программах наибольшее внимание уделяется поиску методов сокращения перебора и вводятся с этой целью специальные эвристические правила. Свое логическое завершение подобный подход получил в программе Ньюэлла, Шоу и Саймона «Общий решатель задач», о которой М. Арбиб пишет в разд. 4.2.

Однако опыт построения программ, подобных программе Ньюэлла, Шоу и Саймона, показал их принципиальную ограниченность и слабость. Несмотря на столь «общее» название «Общий решатель задач» оказался не в состоянии решать даже довольно простые шахматные задачи, не говоря уже о сложных задачах, решение которых связано с такими процессами, как рассуждение по аналогии или индуктивный вывод.

Эта неудача не случайна. Психологи уже давно экспериментально обосновали ограниченность лабиринтной гипотезы интеллектуальной деятельности. Вместо этого они выдвинули модельную гипотезу, согласно которой основным актом любой творческой деятельности человека является не поиск пути в заданном лабиринте возможностей, а порождение модели такого лабиринта, в котором с гарантированной надежностью можно найти решение. Лабиринтный же принцип играет в творческой деятельности явно подчиненную, вспомогательную роль<sup>1</sup>. Поэтому в любых машинных реализациях искусственного интеллекта центральным элементом должна быть не система отбрасывания ненужных вариантов, а система порождения хороших вариантов поиска. По-видимому, только на этом пути удастся преодолеть неспособность лучших эвристических программ решать широкий круг интеллектуальных задач. Отметим попутно, что порождение вариантов поиска требует для реализации подобного процесса структурно организованной модели проблемной среды (окружающего мира), что выдвигает перед кибернетической теорией интеллектуальной деятельности много вопросов, которые в книге М. Арбиба затрагиваются лишь мимоходом либо не обсуждаются вовсе.

Второе замечание, связанное с концепцией, излагаемой в этой книге, касается некоторого умаления влияния языковой системы на интеллектуальную деятельность человека. Конечно, язык — это вторичное образование по сравнению с нейрофизиологической структурой мозга, однако, возникнув и развившись, языковая система начинает оказывать огромное влияние на

---

<sup>1</sup> См. Д. А. Поспелов, В. Н. Пушкин «Мышление и автоматы», изд-во «Советское радио», 1972.

формирование деятельности человека. Проблемам, связанным с языковой системой, посвящена последняя, восьмая, глава книги (четвертая часть). Рассматриваются они под весьма своеобразным углом зрения, в связи с языковым развитием ребенка. Выводы этой главы не имеют прямого отношения к общей концепции книги. Кроме того, такое сужение проблемы «язык — интеллектуальная деятельность» вообще вряд ли оправдано. По-видимому, эта тема заслуживает отдельного, глубокого рассмотрения и вряд ли ее можно анализировать столь поверхностно.

При русском переводе восьмая глава опущена. Помимо изложенных выше мотивов это было сделано потому, что она построена на материале развития речи у ребенка, овладевающего английским языком. Русскому читателю приводимые в связи с этим примеры и результаты ничего не говорят. Адекватный перевод текста на русский язык просто невозможен; в сущности надо было бы написать эту главу заново, используя соответствующие материалы по развитию речи у русского ребенка. Однако ни переводчик, ни редактор не считали себя настолько компетентными в данной области, чтобы взяться за такую переработку материала.

*Д. А. Поспелов*

## ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ АВТОРА

В темном переулке наперерез прохожему бросается вор. Мгновенное замешательство — и мозг прохожего выбирает одно из возможных действий: бежать или сопротивляться.

На листе кувшинки сидит лягушка. В ее поле зрения появляются две жужжащие мухи, и картина электрического возбуждения, передающегося из сетчатки лягушки в мозг, изменяется. Мозг интегрально оценивает новый сигнал и выбирает одну из мух в качестве цели. Лягушка поворачивается, бросок — и одной мухой стало меньше.

В заставленной предметами комнате находится робот. Его «глаз» (телевизионная камера) снабжает его «мозг» (вычислительную машину) необходимыми данными. Машина преобразует эти входные данные в представления находящихся в комнате объектов и их локализации. Затем она намечает путь, двигаясь по которому робот может выполнить стоящую перед ним задачу, не натываясь ни на какие препятствия.

Мы хотим понять, как люди думают и как они управляют своим поведением. В частности, мы хотим понять, какую роль в мышлении и поведении играет мозг. В некоторых отношениях мозг человека сходен с вычислительной машиной робота, а в других он ближе к мозгу лягушки. Цель настоящей книги состоит в том, чтобы в какой-то степени разобраться в работе мозга, опираясь на две метафоры: кибернетическую — «человек — это машина» — и эволюционную — «человек — это животное». Мы не собираемся преуменьшать различия между человеком и машиной или человеком и другими животными, но мы надеемся, что черты сходства между ними позволят нам понять многое.

Таким образом, озаглавив книгу «Метафорический мозг», мы не имели в виду, что те сведения о функционировании мозга, которые можно из нее извлечь, менее «реальны», чем содержащиеся в других книгах. Просто нам хотелось четко указать, что мы в известной мере опираемся на эти метафоры, а также

уменьшить вероятность ложных интерпретаций, которые могут возникнуть из-за смещения неявной метафоры с реальностью.

Прежде чем разбирать содержание книги по главам, я хотел бы вкратце охарактеризовать принятый в ней уровень изложения. Книга в целом, хотя она отнюдь не предназначена для легкого чтения, вполне доступна всем тем, кто читает журнал *Scientific American*. Впрочем, мы надеемся, что материал третьей части заслуживает внимания не только «просвещенных дилетантов», но также специалистов и серьезных студентов, занимающихся кибернетикой, искусственным интеллектом или физиологической психологией. В отличие от моей более ранней книги «Мозг, машины и математика», где я пытался рассказать читателю, знакомому с современной алгеброй, о некоторых математических моделях (к сожалению, эти модели остались несколько разобращенными), полезных для кибернетического подхода к изучению мозга, настоящая книга не требует от читателя никакой математической подготовки и содержит последовательное изложение предмета. Она знакомит читателя с основами теории систем, исследованиями по искусственному интеллекту и физиологической психологии в той мере, в какой это необходимо для того, чтобы оценить предлагаемый здесь новый и целостный взгляд на работу мозга. На некоторых страницах можно встретить небольшое число формул, дающих математически подготовленному читателю более глубокое представление об излагаемом предмете, но всем другим читателям для понимания основных идей достаточно одного только текста. Поэтому они могут спокойно продолжать чтение, опуская формулы и не опасаясь, что книга окажется непонятной.

В этой книге много труда было затрачено на рисунки. Ауру Лекки удалось превратить мои корявые наброски и 26 страниц машинописи в прекрасные схемы, украсившие книгу. У меня нет слов, чтобы выразить ему благодарность за все внимание и мастерство, которые он вложил в работу. Надписи на рисунках составлены таким образом, чтобы их можно было просматривать, не обращая все время к тексту, это позволит читателю получить представление о книге, прежде чем начинать читать ее внимательно.

Книга разбита на четыре<sup>1</sup> части.

Первая часть «Введение» открывается главой «Мозг, поведение и метафора», в которой довольно подробно освещается роль наших двух метафор и отмечается, что из кибернетической метафоры вырастают сразу два подхода: 1) работы по искусственному интеллекту, в которых разумное поведение ста-

---

<sup>1</sup> Четвертая часть (восьмая глава) в русском переводе опущена. (См. «Предисловие к русскому изданию».) — *Прим. ред.*

раются моделировать, не уделяя внимания структуре модели; 2) теория мозга, которая требует, чтобы внутренняя структура модели соответствовала строению мозга. В гл. 2 читатель знакомится с проблемой, общей для обоих подходов, — с проблемой кодирования получаемой системой (будь это животное или робот) информации в форме, полезной для управления действиями системы. В частности, мы познакомимся с кодированием информации, происходящим в зрительной системе кошек и лягушек, и одновременно разъясним некоторые необходимые нейрофизиологические и нейроанатомические термины.

Во второй части «Теория систем и искусственный интеллект» уделяется мало внимания строению мозга. В гл. 3, например, в общий контекст поведения активного организма или робота вводятся такие основные понятия теории систем, как состояние (выжимка из прошлого опыта), алгоритм (программа для вычислительной машины), обратная связь (позволяющая системе компенсировать непредвиденные возмущения) и адаптация (позволяющая системе изменяться во времени, обеспечивая лучшее взаимодействие с окружающей средой). Гл. 4 «Искусственный интеллект и конструирование роботов» открывается рассуждениями о различных аспектах разумного поведения и подчеркивает необходимость для каждой разумной системы иметь «внутреннюю модель своего мира», на использовании которой основано восприятие внешней среды и разумное взаимодействие с ней. В остальной части главы рассматриваются программы, позволяющие машине планировать свои действия или анализировать картинку, вычленяя имеющиеся на них объекты; рассматривается также вопрос об объединении этих программ в системе управления интегрального робота.

Центральное место в книге занимает третья часть «Теория мозга». В гл. 5 рассматриваются нейронные механизмы управления движением, начиная с контуров управления движением в спинном мозгу и нейроанатомии моторной системы и кончая беглым обзором множества функций, которыми приходится заниматься мозгу при управлении даже таким простым видом поведения, как ходьба. В последнем разделе этой главы рассматриваются различные схемы распределенного управления движением, напоминающие по своей организации мозг. Эти схемы создают основу для обсуждения общих принципов организации, которому посвящена гл. 6 «Многослойная организация памяти и восприятия». Рассмотрение комплексов выходных признаков завершает тему децентрализованного кодирования, начатую в гл. 2. Затем мы узнаем, как преобразования могут скорректировать восприятие животного в соответствии с изменениями его взаимоотношений с внешней средой, и познакомимся с голографической метафорой, помогающей понять устройство

распределенной памяти. Третья часть завершается гл. 7 «Устранение избыточности потенциальных команд», в которой описываются механизмы мозга, которые могли бы объяснить два типа поведения, упомянутые в начале предисловия: выбор прохожим одного из возможных типов поведения при нападении хулигана и выбор лягушкой одной из двух мух.

К написанию этой книги меня побудили главным образом идеи У. Мак-Каллока. Но кроме того, авторы многих работ, о которых я здесь упоминаю, мои личные друзья, и их идеи, а также споры с ними, не говоря уж о их печатных работах, сыграли большую роль в появлении этой книги.

*Майкл А. Арбиб*

Амхерст, Массачусетс,  
декабрь 1971 г.

## ЧАСТЬ ПЕРВАЯ ВВЕДЕНИЕ

---

### Глава I МОЗГ, ПОВЕДЕНИЕ И МЕТАФОРА

Скалы «успешно борются за существование» на протяжении миллиардов лет, хотя они не относятся к живому миру, а дерево может прожить века, хотя у него и нет мозга. Дерево тянется к солнцу, а ловушка венериной мухоловки захлопывается, если к ней прикоснуться. Но дерево не может спастись от лесного пожара — оно не обладает ни подвижностью, чтобы убежать от огня, ни возможностью заранее узнать о его приближении. Огонь оставляет ожоги на стволе дерева, но дерево не может использовать эту «память», чтобы лучше подготовиться к следующему пожару, если он снова возникнет. В отличие от растений животное ощущает происходящие вокруг него изменения и может соответствующим образом реагировать на них, с тем чтобы использовать их в своих интересах или уменьшить их вредные последствия. Это возможно потому, что у животных есть мозг и они обладают подвижностью, благодаря чему они способны взаимодействовать с непрерывно изменяющейся средой или приспосабливаться к ней. Более того, они, или во всяком случае человек, способны строить свое поведение на основе обширного фонда индивидуального и культурного опыта, действовать с расчетом на будущее, планируемое далеко вперед, а также пользоваться артефактами<sup>1</sup> и языком.

Наша цель состоит в том, чтобы изучать мозг, стараясь лучше понять закономерности человеческого мышления и поведения. И там, где иные психологи стали бы изучать законы мышления и поведения, не вдаваясь в рассмотрение механизмов этих процессов, а иные биохимики стали бы изучать химические изменения в нейронах (которые мы считаем важнейшими клетками мозга), не касаясь роли этих изменений в функционировании системы в целом, мы — назовете ли вы нас кибернетиками, специалистами по моделированию или по теории мозга — будем стараться перекинуть мостик между этими двумя край-

---

<sup>1</sup> Артефакт — всякий (в том числе и абстрактный) продукт деятельности человека, нечто, чего бы не было если бы не было людей. — *Прим. перев.*



ностями и займемся поисками принципов организации, которые помогли бы понять, как взаимодействие нейронов складывается в сложные картины поведения. Многие психологи и биохимики также строят модели, а самые хорошие работы по кибернетике стоят на прочном фундаменте экспериментальных данных. Но большинство психологов и большинство биохимиков не умеют строить модели, и когда такой психолог говорит о функциях мозга, а такой биохимик — об организации памяти, их «объяснения» остаются весьма туманными и неопределенными, что не способствует ни детальному их пониманию, ни точной оценке.

Бесполезно строить теории, если нет опытных данных, которые вводили бы рассуждения в определенное русло и контролировали их. Но в свою очередь опытные данные могут оказаться бессмысленной кучей хлама, если нет концепций и гипотез, которые направляли бы и ограничивали экспериментальные исследования. Необходимо доводить наши теории до достаточной логической глубины, чтобы они были достойны всей истории развития живых организмов, но при этом мы не должны терять возможности проверять действенность наших теорий. В связи с этим мы часто будем пользоваться следующей стратегией. Мы будем строить наши теории в виде некоего автомата (который можно выполнить «в металле», моделировать на вычислительной машине или просто исследовать на бумаге как математическую абстракцию) и будем пытаться показать, что допущения, принятые относительно элементов такого автомата и их взаимосвязи, хорошо согласуются с нашими данными, полученными на биохимическом или нейрофизиологическом уровне, а их поведение достаточно хорошо соответствует данным психологии и этологии. Таким образом, мы будем стараться придерживаться следующего принципа: «Если я понимаю, как происходит тот или иной процесс, я могу «построить» автомат, имитирующий этот процесс». В этой книге мы приведем несколько примеров, для которых удалось получить такое строгое объяснение. Однако, если мы хотим преодолеть тормозящую нас уверенность в том, что одна только психология или одна только биохимия в состоянии привести нас к подлинному пониманию человеческого поведения, число таких примеров нужно сильно увеличить.

В разд. 1.1 мы познакомимся с двумя метафорами, которые организуют ход наших рассуждений. Одна из них — «человек — это машина» — выражает наше кредо. Из него вытекают два подхода, которые мы станем называть *теорией мозга* и *теорией искусственного интеллекта* в зависимости от того, будем ли мы настаивать на том, что элементы наших моделей имеют свои прототипы в элементах или областях мозга. Другая метафора —

«человек — это животное» — напомним нам, какое богатство теоретических построений и эмпирических данных предоставили нам эволюционные и сравнительные исследования. В разд. 1.2 мы постараемся выяснить, что означает понимание функционирования мозга; это позволит нам увидеть перспективы нашей теории и очертить широкий круг вопросов, на которые она должна помочь ответить.

### 1.1. ЭВОЛЮЦИОННАЯ И КИБЕРНЕТИЧЕСКАЯ МЕТАФОРЫ

Пытаясь разобраться в функционировании мозга и поведении, мы постоянно пользуемся двумя метафорами.

Первая метафора — «человек — это животное» — нацеливает нас на эволюционные и сравнительные исследования поведения животных и функционирования мозга. Более ста лет назад Дарвин убедил нас в том, что люди — это биологические организмы, возникшие в результате эволюции от общих с другими организмами предков. И в силу этой общности предков мы полагаем, что в устройстве нашего мозга и мозга других животных есть нечто общее. Из данных, собранных во время операций на мозге людей, мы можем извлечь лишь отрывочные сведения о деятельности человеческого мозга, а в экспериментах на животных мы можем практически не ограничивать себя, позаботившись лишь о том, чтобы не причинять животным излишних страданий. Мы надеемся получить массу сведений о функционировании мозга человека, раздражая мозг животных и регистрируя его активность или удаляя определенные его участки и наблюдая происходящие при этом изменения в поведении, а затем сопоставляя полученные результаты с последствиями удаления определенных участков головного мозга у человека — операций, к которым приходится иногда прибегать при эпилепсии или при опухолях мозга. Таким путем мы надеемся выяснить вклад разных частей мозга (как порознь, так и в различных сочетаниях) в столь разнообразные аспекты его деятельности, как регуляция движений, восприятие и обучение.

Мы не утверждаем при этом, что человек ничем не отличается от других животных. Мы надеемся приобрести знания с позиций метафоры «человек — это животное», изучая как черты *сходства* между человеком и животными, так и *различия* между ними. Например, нам известно, что человек гораздо более ловко использует орудия, чем любое другое животное, и что человеческий язык намного превосходит системы общения всех других видов. Нам известно также, что мозг человека кое в чем отличается от мозга животных. Пытаясь выявить корреляции между уникальностью поведения человека и его биологической

универсальностью, мы можем надеяться узнать нечто новое о функционировании мозга, и это дает нам не меньше, чем перенесение результатов, полученных при изучении механизмов функционирования мозга животных, на человеческий мозг.

Переходя к нашей второй метафоре — «человек — это машина» — и стараясь использовать черты сходства между человеком и машиной, например пытаясь увидеть различные аспекты человеческого поведения у робота, мы по-прежнему должны все время помнить о том, что поведение человека, его память, восприятие и способность к обучению гораздо богаче, чем у автомата, как уже существующего, так и любого из тех, которые мы можем надеяться создать в ближайшем будущем. Поэтому, когда мы говорим, что в некоторых отношениях человеческий мозг можно рассматривать как вычислительную машину с заложенной в нее программой, мы не низводим человека до уровня существующих механизмов, а просто стараемся понять, как вычислительные машины могут помочь нам разобраться в особенностях поведения человека. Исследования такого рода мы будем называть *кибернетическими*, вкладывая в этот термин более широкий смысл, чем это делал Винер [256], определивший кибернетику как «изучение процессов управления и связи в человеке и машине». Здесь мы примем, что человек, работающий в области кибернетики, попытается сконструировать, по крайней мере в принципе, сложную систему переработки информации, способную выполнять некоторые интеллектуальные функции, аналогичные функциям мозга человека.

С нашей второй метафорой нужно обращаться очень осторожно, ибо мы собираемся пользоваться ею в двух совершенно разных смыслах. В первом случае (во второй части книги) мы подходим к ней с позиций теории *искусственного интеллекта* и нас просто интересует, как составить программу для существующей вычислительной машины, с тем, чтобы получить «разумное» поведение; при этом мы не делаем никаких попыток установить корреляцию между структурой программы и строением мозга. Здесь мы покажем, что идея программы, хранящейся в запоминающем устройстве, более плодотворна, чем прежний подход к изучению поведения, основанный на исследовании взаимоотношений «стимул — реакция», и что удивительно сложное поведение можно иногда разложить во взаимосвязанную последовательность относительно простых актов.

Второе толкование метафоры «человек — это машина», которому посвящена третья часть книги и которое мы назовем *подходом с позиций теории мозга*, выдвигает на первый план создание машин, структура которых в известном смысле аналогична структуре мозга. В нашей версии этого последнего подхода основное внимание уделяется вопросам «распределенных дее-

направленных вычислений в многослойных соматотопически организованных машинах» (эта туманная терминология разъясняется в третьей части, а здесь читателю достаточно запомнить, что эта фраза будет ключевой для всей нашей теории мозга), и мы будем широко пользоваться результатами сравнительных исследований (метафора «человек — это животное») в надежде понять, какой должна быть структура создаваемых нами моделей. В то время как большинство работ по искусственному интеллекту предполагает выполнение определенной последовательности простых операций над пассивно накопленными данными, наша теория мозга концентрирует внимание на параллельном выполнении сразу большого числа операций над целыми комплексами взаимодействующих данных, поступающих в те контуры управления, которые вовлечены в действие.

Проводя грань между искусственным интеллектом и теорией мозга, следует остерегаться ошибки, часто встречающейся в литературе по психологии и состоящей в утверждении, что каждому процессу, происходящему в мозге, соответствует своя область головного мозга и наоборот. Для психолога это может быть несущественно, но для исследователя эволюции мозга или для нейрохирурга, приступающего к операции, физическая локализация данной функции в мозге имеет решающее значение. Если анализ системы  $S$  показал, что ее поведение эквивалентно поведению двух взаимосвязанных систем  $S_1$  и  $S_2$ , каждая из которых обладает строго определенными функциями, и нам кажется, что в результате такой декомпозиции в поведении исходной системы многое стало понятным, отсюда вовсе *не следует*, что существует способ *пространственного* разделения  $S$  на две системы, каждая из которых эквивалентна  $S_1$  и  $S_2$  соответственно. Поясним это на простом примере, который мы подробно проанализируем.

Рассмотрим простую схему, приведенную на рис. 1, А. Будем считать, что в каждый момент времени  $t$  по какой-то фиксированной шкале времени каждый из каналов, изображенных жирной стрелкой, может быть либо «возбужден», либо «не возбужден» и что выходной канал каждой ячейки, изображенной кружком с цифрой в середине (называемой «пороговым элементом» или «формальным нейроном»), возбуждается в момент времени  $t+1$  только в том случае, если в момент времени  $t$  число его возбужденных входных каналов не меньше числа, указанного в кружке. В соответствии с этим нейроны 1 и 2 на рис. 1, А, имея пороговые значения, равные 1, выполняют лишь роль элемента задержки — характер сигнала на их выходе в точности повторяет характер сигнала на входе в предшествующий момент времени. Нейрон 3 возбуждает выходной сигнал в момент времени  $t+1$ , если по крайней мере один из кана-

лов  $x_3$ ,  $x_4$  или  $x_5$  был возбужден в момент времени  $t$ . Наконец, нейрон 4 возбуждается, если в момент времени  $t$  были возбуждены по крайней мере два из его входных каналов. Поэтому, если все каналы  $x_3$ ,  $x_4$  и  $x_5$  бездействуют, выход всей схемы

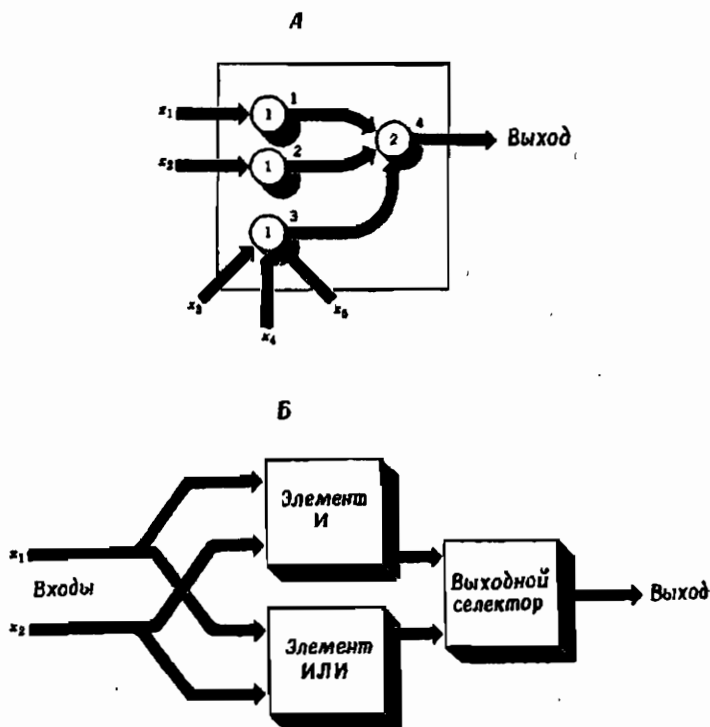


Рис. 1. Иллюстрация утверждения о том, что две системы с одинаковыми функциями могут иметь совершенно различную внутреннюю структуру.

А. Сеть из формальных нейронов. Нейроны 1 и 2 служат для передачи входной информации нейрону 4 после небольшой задержки. Характер комбинации этих входных сигналов, осуществляемой нейроном 4, зависит от характера „управляющих переменных“  $x_3$ ,  $x_4$  и  $x_5$ , поступающих на вход нейрона 3. Если любой из этих управляющих каналов возбужден, то нейрон 4 действует как элемент ИЛИ; в противном случае этот нейрон ведет себя как элемент И. Таким образом, эта „нейронная схема“ функционально эквивалентна схеме Б, в которой функции элементов ИЛИ и И выполняют пространственно разделенные подсистемы.

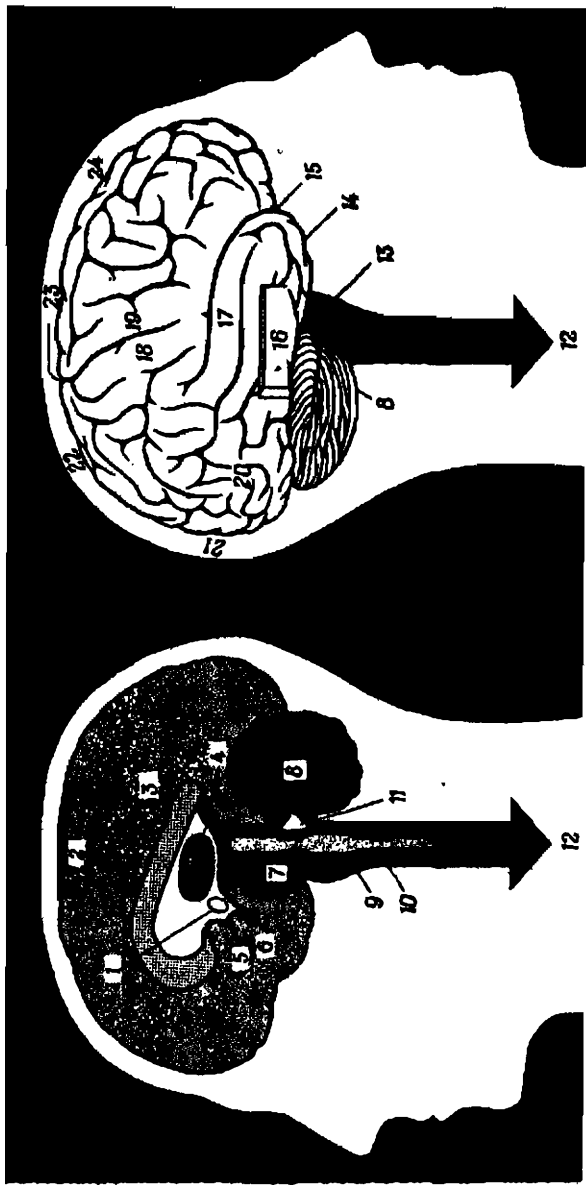
возбуждается в момент времени  $t + 2$  только в том случае, когда в момент  $t$  были возбуждены каналы  $x_1$  и  $x_2$ , а если в момент  $t$  был возбужден хотя бы один из каналов  $x_3$ ,  $x_4$  или  $x_5$ , то возбуждение схемы в момент  $t + 2$  зависит от того, были ли возбуждены в момент  $t$  каналы  $x_1$  или  $x_2$  (или и тот и другой одновременно). Таким образом, сигналы, приходящие по каналам  $x_3$ ,  $x_4$  и  $x_5$ , можно рассматривать как сигналы управления,

определяющие, какую функцию должна выполнять наша схема по отношению к входам  $x_1$  и  $x_2$ : элемента И или элемента ИЛИ.

Представим себе теперь, что  $x_1$  и  $x_2$  — входные каналы системы, но что, поскольку экспериментатор смотрит на эту систему извне, он ничего не знает о каналах  $x_3$ ,  $x_4$  и  $x_5$ , входящих, возможно, от других подсистем, которые его не интересуют. Тогда можно установить, что наша система может выполнять операцию И и операцию ИЛИ, но при этом на ее выходе должен иметься селектор, выбирающий, какой из результатов этих двух операций должен служить выходом системы. Это позволит нам в качестве резюме наших наблюдений за функционированием системы предложить схему ее устройства в виде, показанном на рис. 1, Б. Однако в нашей «реальной» системе (рис. 1, А) операции И и ИЛИ разделить *нельзя!*

Таким образом, даже если мы исчерпывающе изучили функционирование или поведение какой-либо системы, этого недостаточно, чтобы однозначно определить ее структуру. Поэтому наша теория мозга должна учесть данные анатомии и физиологии относительно внутреннего строения мозга, прежде чем она сможет объяснить какие-либо детали внутренних взаимодействий, обеспечивающих наблюдаемое поведение.

Следует добавить, что одно лишь отсутствие какой-то функции в данный момент еще не означает существования соответствующего специализированного участка мозга, который должен быть на это время отключен. Если бы один из управляющих каналов  $x_3$ ,  $x_4$  и  $x_5$  оказался поврежденным, это нарушило бы поведение системы в целом и она не выполняла бы операцию ИЛИ во многих случаях, когда бы это следовало. Или предположим, что в результате «заболевания» канал  $x_3$  будет находиться в состоянии постоянного возбуждения. Тогда нейрон 4 будет все время работать как элемент ИЛИ, а операция И вообще перестанет появляться в наших опытах. Таким образом, невозможность вызвать некоторую функцию еще не означает, что соответствующую сеть нейронов вообще нельзя возбудить, а лишь указывает на то, что мы не можем возбудить ее так, как нам надо. И можно представить себе мозг, в котором все нейроны возбуждены и все основные проводящие пути организованы правильно, но функции которого в результате ошибок в тонкой структуре или отклонения пороговых величин нарушены (ср., например, со случаем «центра торможения свиста», описанного в разд. 1.2). Читатель должен также понимать, что можно придумать такую нейронную сеть, в которой каждый нейрон участвует в реализации нескольких функций, но, кроме того, и сами эти функции распределены между несколькими анатомически обособленными областями сети.



А Б

Рис. 2. Схема строения головного мозга человека.

А. Средний сакитальный разрез мозга. Б. Общий вид мозга после удаления черепя.

1 — гипогламул; 2 — лобная кора; 3 — мозолистое тело; 4 — таламул; 5 — оптическое хиазма; 6 — гипофиз; 7 — варолиев мост; 8 — мозжечок; 9 — ретикулярная формация; 10 — пролонговатый мозг; 11 — вестибулярные ядра; 12 — спинной мозг; 13 — ствол мозга; 14 — височная доля; 15 — Sylvian's борозда; 16 — обонятельная кора; 17 — слуховая кора; 18 — соматосенсорная кора; 19 — двигательная кора; 20 — зрительная кора; 21 — затылочная доля; 22 — теменная доля; 23 — центральная борозда; 24 — лобная доля.

В сущности в этом-то, по-видимому, и состоит хорошая стратегия обеспечения надежного функционирования мозга, построенного из нейронов, которые часто оказываются ненадежными.

Понять некоторые особенности функционирования, не зная ограничений, накладываемых на него реализующей его структурой, просто нельзя. Но в то же время нельзя разобраться в сложной структуре, не имея каких-то гипотез о ее глобальных функциях. Поэтому в теории мозга нельзя выдвигать на первый план ни функцию, ни структуру — исследования той и другой должны идти рука об руку.

## 1.2. ЧТО ОЗНАЧАЕТ «ПОНЯТЬ ПРИНЦИП РАБОТЫ МОЗГА?»

Миллионы *рецепторов* человеческого организма постоянно следят за изменениями внешней и внутренней среды. Сотни тысяч клеток, называемых *мотонейронами*, управляют движениями мышц и секрецией желез. А связывающая их сложная сеть из миллиардов клеток, называемых *нейронами*, непрерывно сопоставляет сигналы от рецепторов с сигналами, в которых закодирован прошлый опыт, и обрушивает на мотонейроны команды, обеспечивающие адаптивное взаимодействие со средой. Эта нейронная сеть получила название *центральной нервной системы* (ЦНС); головной мозг составляет важнейшую часть этой системы, и нередко, говоря о мозге, мы будем иметь в виду ЦНС в целом. На рис. 2 схематически показано расположение головного мозга в черепе человека — что бы мы увидели, сделав сагиттальный разрез головы в срединной плоскости или просто удалив череп. Эти схемы более подробно рассматриваются в разд. 2.3.

Что же означает «разобраться в функционировании мозга»? Значит ли это, что в один прекрасный день мы сможем, заглянуть в мозг определенного человека, абсолютно точно предсказать все будущие поступки этого человека? Вряд ли. Мозг человека состоит из миллиардов нейронов. (Это весьма грубая оценка — ни у кого не нашлось времени пересчитать все нейроны мозга. В лучшем случае можно пересчитать клетки на срезах мозга, а затем оценить, какую часть мозга составляют эти срезы.) Многие нейроны связаны с тысячами других клеток. Поэтому если рассматривать «коэффициенты взаимосвязи» таких мест, где происходит взаимодействие нейронов, как регулируемые параметры нервной системы (а с учетом их тонкой химической структуры число таких параметров окажется во много раз больше), то у нас получится порядка  $10^4$  параметров для каждой из, скажем,  $10^{10}$  клеток, так что для характеристики структурных взаимосвязей одного мозга понадобилось бы



около  $10^{14}$  параметров. (Если учесть, что продолжительность человеческой жизни составляет в среднем  $2 \cdot 10^9$  секунд, то это значит, что нам придется на протяжении всей нашей жизни регистрировать более  $5 \cdot 10^4$  параметров в секунду, хотя на это можно и возразить, что человеческая память не рассчитана на посекудную «магнитофонную запись», на которой построены эти выкладки.) Обычно такие игры в числа приводят к совершенно неверным выводам, однако они могут заставить нас подумать о том, что если физика все еще не справилась с задачей взаимодействия трех тел, то мы не можем ставить себе целью предсказание поведения отдельного мозга во всех подробностях. Более того, если бы мы попытались измерить хотя бы небольшую долю этих параметров, мы разрушили бы соответствующую область мозга настолько основательно, что всякое предсказание потеряло бы смысл.

Скорее можно надеяться, что нам удастся достаточно хорошо понять принципы функционирования мозга на разных уровнях. На психологическом уровне мы могли бы предсказывать значения глобальных параметров эмоциональной реакции данного человека, основываясь на сведениях о его личности, семейных взаимоотношениях и социальной среде, или, если углубиться в детали, мы могли бы попытаться описать стратегии, используемые индивидуумом при решении определенных задач. В обоих случаях мы используем методологию «черного ящика» (т. е. отказываемся от любых попыток проанализировать внутреннюю структуру системы и изучаем лишь внешние проявления ее поведения) и описываем поведение человека с помощью относительно небольшого набора действий и реакций.

На следующем уровне изучения — на уровне физиологической психологии — мы пытаемся связать поведение, исследуемое психологами, с функциями основных отделов головного мозга. Физиологическая психология старается, разделив мозг на относительно небольшое число визуально различимых подсистем, связать с каждой из них различные аспекты поведения; в экспериментах на животных удаляют разные части мозга, а затем наблюдают, как это отражается на поведении, в надежде выяснить таким образом, в чем состояла функция удаленной части. Это довольно грубый подход. Как справедливо отметил Р. Грегори [91], если у радиоприемника отпаять сопротивление и он после этого начнет свистеть, это еще не означает, что это сопротивление можно назвать «центром торможения свиста» (вспомните также наши рассуждения относительно рис. 1). Однако не следует и преуменьшать достоинства такого подхода. Изучать подсистемы такой сложной системы, как мозг, по отдельности невозможно не только потому, что изолирован-

ные части мозга должны оставаться живыми и здоровыми, что само по себе достаточно трудно обеспечить, но и потому, что нейронные сообщения, поступающие от нейронов на каждый такой участок, — это сигналы с весьма сложной системой кодирования, прошедшие весьма сложные преобразования, и, следовательно, стимулировать такой изолированный участок мозга содержательным образом весьма и весьма сложно.

Как бы то ни было, специалистам по физиологической психологии удастся получать все новые и новые сведения о декомпозиции мозга на структурно определенные подсистемы. На аналогичном уровне находятся и специалисты по искусственному интеллекту, которые пытаются создать для вычислительных машин программы, позволяющие успешно играть в шашки или доказывать теоремы. Однако соответствие отделов головного мозга или подпрограмм некоторой программы различным функциям головного мозга еще нельзя принимать за доказательство понимания функционирования мозга или процесса мышления.

Следующий шаг может заключаться в том, чтобы попытаться понять, как из клеток, обладающих известными свойствами, можно строить целые системы, которые вели бы себя подобно подсистемам, обнаруженным нейрофизиологами. Как строить фильтры, или системы для распознавания образов, или системы, комбинирующие визуальную и слуховую информацию? Работая на другом уровне, можно всю свою жизнь посвятить поискам взаимосвязей между геометрией клеточных мембран и субклеточных систем и тем, как эти клетки преобразуют входящие сигналы, или выяснению того, как эти клетки помогают запоминанию, изменяя свои функции при повторных воздействиях. Мы можем также обратиться к физике и биохимии за объяснениями функций мембран, химии межклеточных взаимодействий и подробностей электропроводимости нейрона — это составит еще один уровень изучения.

Существование всех этих «уровней» позволяет каждому исследователю оставаться в разумных пределах, но между этими уровнями нет четких границ, и ученый, работающий на каком-то одном из них, вынужден время от времени совершать набег к «соседям», как вниз с целью выяснения механизма реализации изучаемой функции, так и вверх — для того, чтобы понять роль изучаемой им функции в общей схеме.

Из многих путей к пониманию того, как люди думают и действуют, мы выбрали один, направленный на поиски принципов организации мозга как некоей сложной машины. Но этот путь еще не доведен до конца, и хотя некоторые его участки исхожены вдоль и поперек, нам придется иной раз отправляться в путь без всякой уверенности в том, что это углубит

наше понимание вопроса. Исследование малоизученных областей всегда увлекательно, но после того, как через них проложат шоссейную дорогу, все очарование, естественно, пропадает. Такая увлеченность свойственна и попыткам создать теорию мозга. И, быть может, несколько достаточно непрофессиональных слов из области философии наук позволят увидеть излагаемый здесь подход в более правильной перспективе.

Задача науки не сводится лишь к тому, чтобы накапливать все больше и больше данных о все более широком круге объектов. На каком-то этапе нам нужно пойти на рассчитанный риск и допустить, что понятия, кажущиеся полезными для обсуждения небольшого числа известных примеров, — это именно те понятия, с помощью которых можно придать некую структуру всей той массе явлений, изученной пока лишь на этих немногих примерах. Понятия приходится откуда-то заимствовать, и в поисках метафор биологи часто обращались к технике.

Рассмотрим две версии метафоры «человек — это машина». «Тело человека — это паровая машина» — такова была метафора, которая в конечном счете освободилась от своего ложного подтекста и положила начало точным исследованиям метаболизма человека. Аналогичным образом мы в настоящее время отдаем известную дань современной технической моде, когда пытаемся преобразовать метафору «мозг — это вычислительная машина» в полезную основу для создания теории мозга. Поскольку метафора — это лишь отправная точка для развития теории, а не сама теория, здесь уместно, по-видимому, сказать несколько предостерегающих слов о том, что метафоры, к которым мы прибегаем, не следует понимать слишком буквально. Метафора, сравнивая одну систему с другой, которая нам более знакома, призвана облегчить понимание первой системы. Но у этих двух систем помимо общих свойств может быть множество других, по которым они совершенно различны. Если можно сказать, что «моя любимая прекрасна, как роза», это вовсе не значит, что она будет счастлива, если ее станут поливать из лейки. Это верно даже для аналогий, не говоря уже о метафорах. Хорошая метафора — неисчерпаемый источник гипотез относительно первой системы; но ее не следует рассматривать как теорию первой системы. И если помнить об этих ограничениях, то метафоры «человек — это животное» и «человек — это машина» могут оказаться весьма полезными. Более того, *после того как мы усвоим их и отбросим* многие из связанных с ними ложных интерпретаций, они помогут нам создать термины и понятия, с помощью которых мы сможем анализировать собственное поведение. Другими словами, на стадии формирования понятий нам необходимо твердо помнить

о метафорическом характере этих понятий. Однако, когда наступит такое время, что наши понятия дадут нам возможность отвечать на большинство вопросов в интересующей нас области, мы сможем позволить себе забыть об их метафорическом происхождении и слить наше описание реальности с самой реальностью. Заглавие этой книги напоминает нам, что разработка понятий в теории мозга еще не достигла такой степени, чтобы мы могли забыть об их метафорической природе, хотя мозг, поведение которого мы стараемся объяснить, не становится менее реальным от того, что мы сами признаем предварительность наших теорий.

Нам хотелось бы также подчеркнуть, что в связи с такой сложной системой, как человеческий мозг, возникает так много вопросов, что для ответа на них приходится пользоваться разными подходами, каждый из которых пригоден лишь для изучения какой-то одной группы вопросов; только после того, как будет найден эффективный подход для каждой из таких групп, можно заняться согласованием разных подходов для исследования задач, попадающих сразу в несколько категорий.

Например, мы не претендуем на то, что наша схема изучения «распределенных децентрализованных вычислений в многослойных соматотопически организованных машинах» охватывает все аспекты психологии или науки о мозге. Легче всего это понять, противопоставляя наш подход «молекулярно-биологическому» подходу. Многие биологи под влиянием успехов, последовавших за открытием роли ДНК в «кодировании» генетического материала, стали всерьез полагать, что всю биологию можно свести к изучению сложных молекул. Мы же не считаем этот подход ни бесплодным, ни всеохватывающим, а полагаем, что он призван ответить на круг вопросов, дополняющих те, для которых оказались пригодными наши методы.

И там, где специалист по молекулярной биологии «поднимается вверх», отрываясь от биохимического и физического фундамента, мы «спускаемся вниз» по отношению к проблемам, связанным с глобальными функциями системы. Для того чтобы уточнить это размежевание, мы можем обратиться за примером к вычислительной технике, где наблюдается аналогичное разделение труда. С одной стороны, инженеры — специалисты по радиоэлектронике, используя достижения физики твердого тела, стараются уменьшить размеры и повысить быстродействие и универсальность блоков вычислительных машин. А с другой стороны, инженеры-«системщики», которых вовсе не заботит физика реальных процессов, получив гарантии в том, что определенные элементы могут выполнять определенные функции, занимаются лишь тем, что собирают из этих элементов системы, реализующие некоторые глобальные сложные функции.

Таким образом, на уровне элементов — или на клеточном уровне, чтобы это звучало более биологично, — происходит встреча двух совершенно разных подходов, и мы здесь собираемся выступать именно с позиций инженера-«системщика».

Необходимость определенных принципов организации как направляющего начала при анализе любой сложной системы хорошо видна из следующей истории, рассказанной Джимом Хорнингом в бытность его студентом Стенфордского университета.

«В декабре 1966 г. на факультете вычислительной техники этого университета была установлена вычислительная машина 2116А для обучения студентов. Я был в числе старшекурсников, попытавшихся начать считать на машине до того, как были присланы инструкции по ее эксплуатации. Главная проблема состояла в том, чтобы разобраться в структуре машины и получить возможность составлять содержательные программы.

Конечно, у нас с самого начала имелся ряд благоприятных обстоятельств. На передней панели были обычные надписи; мы знали, что это электронная цифровая машина определенного класса; мы были достаточно знакомы с теорией вычислительных машин и имели опыт составления программ для машин разных типов. Тем не менее, к нашему удивлению, оказалось, что получить нетривиальную дополнительную информацию о машине 2116А нелегко.

Мы быстро нашли переключатель питания, клавиши ввода данных, индикаторы регистров и основные клавиши управления. У нас не возникло особых трудностей с вводом данных на регистры, и вскоре мы научились вводить и выполнять отдельные команды. Но это оказалось пределом.

Провозившись несколько часов, мы окончательно убедились в том, что нам не удастся выяснить даже такие простые вещи, как формат слова команды (и даже расположение кода операции). Мы не могли запрограммировать сложение двух чисел или простейшую процедуру ввода-вывода.

После получения инструкций выяснилось, что наши трудности никак нельзя было отнести за счет каких-то необычных особенностей машины 2116А. Она оказалась достаточно стандартной малой одноадресной вычислительной машиной как раз того класса, как мы предполагали. По всей вероятности, мы не смогли бы добиться большего и с любой другой подобной машиной.

Возможно, все это свидетельствует лишь о том, что старшекурсники совсем не такие умные, как им кажется. Но размышляя над этим случаем, я пришел к выводу, что он типичен для тех проблем, с которыми приходится сталкиваться при изуче-

нии любых сложных систем переработки информации.. Изучение мозга [может оказаться] очень похожим на изучение какой-то неизвестной вычислительной машины».

Другим хорошим примером тех опасностей, которые вытекают из переоценки роли молекулярной биологии и пренебрежения принципами организации, могут служить некоторые результаты исследований химии памяти. Все мы согласны с тем, что клетки — это живые системы и что при обучении в головном мозге происходят определенные изменения. Таким образом, обучение — это своего рода процесс роста, и поэтому не удивительно, что вещества, блокирующие синтез РНК, а следовательно, и рост клеток, препятствуют обучению животного. Но делать на основании всего этого вывод, что «РНК представляет собой молекулу памяти», столь же неправильно, как утверждать, что «электроны — это строительные элементы памяти», на основании того, что если прервать питание, то работа запоминающего устройства вычислительной машины нарушится. У нас есть структурная теория сложных запоминающих устройств для вычислительных машин, основанная на свойствах переключающихся и запоминающих элементов. Для этой теории несущественно, какова физическая природа этих свойств: электрическая, механическая, гидравлическая или химическая. Точно так же теория мозга должна оперировать не столько биохимическими терминами, сколько принципами организации нейронов. Для теории организации как таковой биохимические исследования вообще несущественны, но они жизненно необходимы для того, чтобы мы могли разобраться в устройстве элементов. Биохимия мало может дать для понимания процессов восприятия; главное здесь в принципах организации. И, напротив, если мы изучаем терапевтическое действие лекарственных веществ, то здесь на первый план выступает биохимия.

Таким образом, хотя эта книга практически целиком посвящена поиску принципов организации, мы *не пытаемся* доказать преимущества нашего подхода по сравнению с подходом, принятым в молекулярной биологии, а лишь настаиваем на том, что эти подходы взаимно дополняют друг друга. В самом деле, структурный подход — «если клетка может делать то-то и то-то, то система таких клеток, обладающая определенными свойствами, будет вести себя так-то, что соответствует наблюдаемому поведению», — неизбежно вызывает дополнительный вопрос — «а имеются ли у клетки физические возможности делать то-то и то-то, и если да, то благодаря какому биохимическому механизму?» Если мы не пытаемся ответить на этот вопрос, это отнюдь не означает, что он менее важен. Просто об этом нужно писать в других книгах.

Большая часть этой книги посвящена теме «мозг — это сложная система переработки информации с распределенными деенарправленными вычислениями, производимыми в многослойной соматотопически организованной структуре», но наша уверенность в содержательности такого подхода не означает, что при этом следует отказаться от всех других подходов к исследованию мозга. Лишь в результате коренной перестройки и расширения наша схема сможет вобрать в себя и исследования Фрейда и эксперименты с медикаментозными воздействиями. Можно надеяться, что в конце концов мы придем к единой теории (или к системе взаимно согласованных и взаимно дополняющих теорий), которая не будет столь ограничена. И тогда кибернетик сможет утверждать, что кибернетика оправдала себя, поскольку можно проследить эволюцию кибернетических представлений, впитавших в себя элементы психоанализа и химии. Представители других направлений увидят в создании такой единой теории оправдание позиции молекулярных биологов, которые смогли включить в свои концепции элементы кибернетики и результаты терапии словом. Истинная наука представляет собой удивительную смесь страстной убежденности в правильности своего собственного подхода — именно она создает чувство личной заинтересованности, превращающее тяжкий труд в наслаждение, — и готовности признать достоинства других подходов. И если ученый готов принять участие в синтезе знаний в момент его зарождения, то, наверно, можно простить ему естественную человеческую слабость — несколько преувеличенное представление собственного вклада в этот синтез.

В настоящее время кибернетический подход позволяет объяснить лишь некоторые фрагменты процессов человеческого мышления и поведения, хотя во многих областях этот подход позволяет углубить имеющиеся поверхностные представления. В этой книге мы увидим, что некоторые аспекты разумного решения задач можно рассматривать в свете исследований по искусственному интеллекту, а наша теория мозга позволяет понять определенные черты взаимодействия организма с окружающей средой и структурами, с которыми этот организм сталкивается. Книгу эту ни в коей мере нельзя рассматривать как исчерпывающее изложение достижений в этих двух областях знания. Мы лишь хотели убедить читателя в жизнеспособности исследования, рассчитанного на много лет и ставящего себе целью построить модель «распределенных деенарправленных вычислений в многослойных соматотопически организованных машинах», которая позволила бы проникнуть в механизмы головного мозга, ведающие восприятием, мышлением, языковым общением и движением.

## Глава 2

### ДЕЕНАПРАВЛЕННОЕ КОДИРОВАНИЕ И НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

Отвечая на вопрос: «А как организм извлекает необходимую информацию из окружающей его среды?», нельзя забывать о том, что за этим стоит другой скрытый вопрос: «А как организму удастся избежать перегрузки своего процессора ненужной информацией об окружающей среде?» В этой главе мы изучим некоторые психологические данные по проблеме «отбрасывания ненужного», а также некоторые данные нейрофизиологии о нейронных механизмах отбора тех характеристик внешней среды, которые имеют значение для деятельности организма.

Как уже подчеркивалось во введении, животное отличается от растения своей повышенной подвижностью и наличием мозга, позволяющего подмечать изменения внешней среды и извлекать выгоды из этих изменений или предотвращать их нежелательные последствия. Кроме того, животное способно к обучению, что позволяет ему повышать эффективность своего поведения, учитывая разного рода тонкие особенности прежних взаимодействий. В разд. 2.1 мы попытаемся выяснить, как диапазон вероятных взаимодействий системы со средой позволяет сформировать характеристики первого этапа восприятия — «предварительной обработки» зрительных стимулов в относительно периферических отделах нервной системы.

На самом деле наши общие соображения о «деенаправленном восприятии» (action-oriented perception), содержащиеся в разд. 2.1, в равной степени применимы и к роботам. Для многих приложений вычислительная машина — это просто устройство для манипулирования символами (см. разд. 3.2). Ее загружают данными в виде цепочек символов, и она перерабатывает эти данные в другую последовательность символов — ее выход. Но в других ситуациях машина должна работать в «оперативном режиме», например контролируя работу конвейера, когда она получает данные от датчиков и должна успеть обработать их с такой скоростью, чтобы решение о



выбравке изделия было принято прежде, чем изделие сойдет с конвейера. Такую систему из датчиков, вычислительной машины и исполнительных механизмов можно назвать *роботом*. Возможности большинства роботов 70-х годов вроде описанного робота-контролера ограничены. Однако в гл. 4 мы для контраста опишем роботы, в которых реализованы некоторые алгоритмы теории искусственного интеллекта, дающие возможность направлять их взаимодействие со средой. Применительно к таким роботам изучение предварительной обработки зрительной информации, которое мы собираемся предпринять в этой главе, чрезвычайно важно.

В разд. 2.2 мы познакомимся с основами нейрофизиологии, необходимыми для изучения предварительной обработки зрительной информации у кошек и лягушек, которой мы займемся в разд. 2.4, а в разд. 2.3 кратко описана анатомия нервной системы, что поможет нам представить себе место, которое занимают в ней структуры, описанные в разд. 2.4. В этой главе мы не будем сталкиваться с проблемой обучения в явном виде — мы коснемся ее мимоходом в гл. 3, говоря о состояниях и адаптации, и, наконец, займемся ею непосредственно при изучении внутренних моделей мира в разд. 4.1.

## 2.1. ДЕЕНАПРАВЛЕННОЕ ВОСПРИЯТИЕ

Проделайте со своей подружкой следующий опыт. Положите перед ней лист бумаги и напишите на нем шесть слов, причем некоторые из них рукописными, а другие — печатными буквами. Попросите ее запомнить слова и через некоторое время уберите листок. А затем, не спрашивая о том, что было записано, спросите ее, какие слова были написаны «от руки», а какие — печатными буквами. Примерно девять человек из десяти не ответят на ваш вопрос. Это показывает, что наше восприятие не нейтрально, а направлено на получение информации, которая *может оказаться* полезной для нашего взаимодействия с окружающим миром. А поскольку мы не можем точно предвидеть, какая информация нам потребуется в будущем, не так уж неразумно, что мы воспринимаем и запоминаем гораздо больше, чем нам может на самом деле понадобиться. Если времени у нас достаточно, то мы тщательно «исследуем» внешний мир, подмечая любые новые черты, даже если в это время нет никаких оснований считать их важными. Впоследствии мы можем попасть в ситуацию, когда эта информация, к нашему удивлению, действительно окажется полезной, как это случилось для того одного из десяти опрошенных, кто заметил разницу между способом написания слов. И по-видимому, чем дольше испытуемые будут изучать перечень слов,

тем более вероятно, что они обнаружат и эту характеристику задания.

Тем не менее масса информации, которую можно было бы извлечь из каждого стимула, вообще «отбрасывается». Возвращаясь к предыдущему примеру, следует отметить, что испытуемый, быть может, пользовался разными «программами» для распознавания слова, написанного рукописными буквами, и слова, написанного печатными буквами. Тем не менее выбор этих программ был подсознательным, и, по-видимому, испытуемый сознательно вспоминает *результат* их выполнения, а не само *выполнение*. В памяти остается лишь какое-то абстрактное представление о виденном (некоторые, по-видимому, вспоминают слово как бы написанным каким-то «стандартным» шрифтом), т. е. «выход» процедуры распознавания. Если вы подвергнете вашу подругу этому же тесту повторно, то она, вероятно, задаст себе больше вопросов и тем самым введет в свою память больше информации, но и тогда вы можете обмануть ее, спросив, в каких словах вы писали букву «тэ» как т, а в каких как т.

Таким образом, мы видим, что организм — это не пассивное существо, которому показывают пачку «фотографий» и который должен разложить их одну за одной на небольшое число кучек в соответствии с принятой классификацией. Организм не занимается также и хранением необработанных «фотографий». Вместо этого он постоянно ищет информацию, нужную ему для его действий. И конечно, если он ошибся в оценке того, что ему нужно знать, а что нет, он пропустит много полезной информации, подобно студентке, кающейся в том, что она не конспектировала часть лекций, на которые, как впоследствии выяснилось, приходилась основная масса экзаменационных вопросов. Проблема именно такого подхода к кодированию информации, который позволяет выявлять полезное ядро, окончательно дошла до моего сознания во время ознакомления с одной программой «машинного распознавания рукописных текстов». Составитель программы считал свою задачу решенной, поскольку машина могла, получив текст, напечатать по стандартному образцу последовательность букв, образующих написанное от руки слово. Однако если такой машине вместо вопроса «Что за слово написано в тексте?» задать вопрос: «А чей это почерк?» или «А не подделана ли эта подпись?», то программа окажется совершенно непригодной. Нельзя отрицать, что (так же как и в предыдущем примере со словами, написанными «рукописными» или печатными буквами) некоторые из характеристик вводимого текста, использованные в программе, не окажутся полезными и для решения новых задач. Просто для того, чтобы обнаруживать тонкие

отличия в почерке, машине придется различать некоторые дополнительные особенности в начертании слов, на которые раньше она не обращала внимания.

Таким образом, и мы будем иметь возможность вновь и вновь убеждаться в том, что решение проблемы соответствующего представления информации в решающей степени зависит от того, на какого рода вопросы об этой информации нам придется, как мы считаем, отвечать в настоящем или в будущем; при этом как в случае животных, так и для значительной доли поведения человека эти вопросы задаются не в словесной форме и отвечать на них нужно не словами. Вопросы эти задает окружающий нас мир, и отвечать на них нужно действиями, заботясь при этом о собственном благополучии или о благополучии себе подобных.

Последнее замечание заслуживает более подробного разбора. Говоря о человеческом восприятии, мы часто представляем его себе как процесс пассивной классификации, как возможность правильно назвать показанный объект. Однако во многих случаях правильнее будет сказать, что большинство животных и еще чаще человек воспринимают окружающую среду лишь в той мере, в какой они *подготовлены к взаимодействию* с этой средой достаточно организованным способом. Конечно, мы можем продемонстрировать наше восприятие кошки, сказав, что это кошка, однако нередко наше восприятие кошки не содержит осознанного представления о кошке как таковой. Например, если кошка прыгнет вам на колени, когда вы читаете газету, ваша классификация этой ситуации может свестись лишь к тому, что вы воспримете кошку как «нечто, что нужно погладить» или как «нечто, что нужно прогнать», т. е. к классификации действием. На языке вычислительной техники (первое знакомство с которым читатель сможет получить в разд 3.2) мы можем сказать, что восприятие объекта обычно означает получение доступа к «программам», управляющим взаимодействием с этим объектом, а не просто генерирование «наименования» этого объекта, и именно этим отличается управляющая вычислительная машина работа от вычислительной машины, предназначенной, например, для считывания сумм с банковских счетов.

Читатель может справедливо возразить, что значительная доля человеческого поведения имеет речевой характер и обходится без движений тела и конечностей, и выразить сожаление о том, что, сосредоточив свое внимание на «восприятии как подготовке к действию», мы исключаем, по-видимому, из рассмотрения большую часть наиболее разумных форм человеческого поведения. Но это вовсе не так. В самом деле вспомните наши слова о важности сравнительных исследований (разд. 1.1),

где отмечалось, что мозг человека — это результат эволюции мозга животных, способных к сложному взаимодействию со средой без помощи языка. Мне кажется в связи с этим, что понять речевое поведение легче всего, если рассматривать его как результат усовершенствования уже и без того достаточно сложной системы, т. е. ставя с головы на ноги подход многих психологов, считающих язык первичным.

Мы отметим также, что именно история эволюции мозга придает исследованиям по теории мозга биологический характер, поскольку, в то время как в теории мозга язык должен получить объяснение как результат «недавнего» усовершенствования изначальной способности системы взаимодействовать с окружающей средой, в теории роботов мы отталкиваемся от вычислительных машин, поведение которых имеет в первую очередь лингвистический (или по крайней мере символичный) характер, и стараемся придумать более совершенные программы, которые будут управлять поведением роботов.

Здесь необходимо сделать важную оговорку. Наше внимание к деенаправленному восприятию не следует смешивать с радикальными формами бихевиоризма, путающего мышление с действием. Далес мы отметим, что получение доступа к ряду программ *еще не означает* решения о непременном использовании одной из них. А пока что нам хотелось бы лишь подчеркнуть, что в сложных системах восприятие рассчитано на будущее не в меньшей степени, чем на настоящее, и что нынешняя среда «исследуется» также и для того, чтобы уточнить «внутреннюю модель мира» (разд. 4.1) и сделать поведение данной системы в будущем еще более адаптивным. Таким образом, можно ожидать, что в процессе эволюции, ведущей к возникновению вполне гибкого языка, восприятие будет становиться все менее привязанным к немедленному действию и все больше — к созданию системы отношений, связывающих внешнюю среду и ее модель без *непосредственной* ориентации на действие. Здесь следует также добавить, что в результате эволюции в мозге сформировалось много генетически детерминированных механизмов, автоматически связывающих определенные данные о среде с соответствующей структурой действия.

Отметим теперь некоторые следствия, вытекающие из нашего утверждения о том, что основная цель распознавания объектов заключается не в классификации этих объектов, а в подготовке к взаимодействию с ними. Недостаточно воспринять наличие стола, на который можно положить газеты, если мы выпустим эти газеты из рук, не дойдя до стола добрых двух метров. Иными словами, воспринимается не столько объект из окружающей среды, сколько взаимосвязь между этим

объектом и самим субъектом. А так как для управления действиями особое значение имеют пространственные соотношения, то можно сказать, что для восприятия важно не столько «что», сколько «в какой взаимосвязи» и (особенно) «где».

Наблюдательный читатель, наверное, заметил, что в наши рассуждения мы потихоньку протащили довольно существенное утверждение, а именно утверждение о том, что субъект воспринимает отдельные объекты из окружающей его среды, а не всю эту среду *в целом*, даже если мы и подчеркивали, что такое восприятие может просто создать возможность какого-то простого взаимодействия с объектом и не обязательно дает детальное представление о его форме, окраске или текстуре. Но это действительно так, если определить понятие «объект» достаточно широко и считать объектом «аллею деревьев», проходя по которой я не различаю ни особенностей отдельных деревьев, ни даже расстояний между ними. Таким образом, в круг наших представлений должно входить и утверждение о том, что все достаточно высокоорганизованные животные (и роботы) воспринимают мир в виде «объектов», хотя характер этого восприятия весьма различается у разных животных. И люди и собаки воспринимают телеграфные столбы как элементы системы связи, и в то же время они совсем по-разному представляют себе средства, на которых основана соответствующая система. Однако сначала нам нужно разобраться с непосредственными следствиями принятия этой гипотезы, поскольку если животное или робот может воспринять наличие в окружающей его среде многих «объектов», то весьма вероятно, что все открывающиеся перед ним возможности взаимодействия превысят его способности к одновременным взаимодействиям.

Сходные соображения заставили У. Мак-Каллока подчеркнуть важность для теории мозга его *принципа избыточности потенциальных команд*, согласно которому, по сути дела, управление должно передаваться области мозга, содержащей наиболее важную информацию. Мак-Каллок приводит пример из операций военно-морского флота во время второй мировой войны, когда действия целого флота направлялись (по крайней мере в течение некоторого времени) сигналами с того корабля, который первым обнаружил противника, а вовсе не флагманом, который обычно осуществляет командование. На самом деле (ср. с обсуждением взаимосвязи между структурной и функциональной декомпозициями систем в разд. 1.1) неверно было бы думать, что функции управления мозга в любой конфликтной ситуации *обязательно* передаются какой-то одной области. В гл. 7 мы познакомимся с одним примером, когда такая передача действительно происходит, и с другим

примером, когда этого нет. Однако, удержавшись от этого ложного впечатления, мы все же воспользуемся терминологией Мак-Каллока и скажем, что *важным свойством любой системы, взаимодействующей со сложной средой, является ее способность преодолевать избыточность потенциальных команд.*

Для того чтобы разъяснить смысл этого утверждения, напомним, что, обсуждая деенаправленность нашего восприятия, мы намеренно говорили о нем как о получении доступа к программе, а не к выполнению программы — можно воспринимать некий объект и при этом не реагировать на него. Таким образом, получая доступ к программе, система лишь открывает дорогу *потенциальной* команде, получает возможность действия, а чтобы решить, действовать или нет, необходима дополнительная обработка информации. Более того, как показывает наш пример с кошкой, которую можно погладить, а можно и прогнать, потенциальная команда может быть избыточной, и чтобы решить, какую из возможных программ нужно выбрать и какая из них будет действительно управлять последующими действиями организма, требуются новые вычисления. Так, если вас часто царапала кошка, то предпочтение может получить программа «прогнать». В гл. 7 мы рассмотрим две возможности организовать такое разрешение избыточности потенциальных команд, моделируя, как лягушка приходит к решению попытаться поймать одну из нескольких мух и как позвоночное решает, что ему делать: нападать или спастись бегством. В обоих случаях мы будем широко привлекать данные по анатомии и физиологии нервной системы.

Мы постараемся сделать более понятными некоторые следствия, вытекающие из тех общих соображений, которыми мы будем заниматься в дальнейшем, на примере кодирования зрительных стимулов у кошки и лягушки (разд. 2.4). Но прежде всего нам нужно ознакомиться с некоторыми основными свойствами нейронов (разд. 2.2) и общей «географией» мозга (разд. 2.3).

## 2.2. МОЗГ КАК НЕЙРОННАЯ СЕТЬ<sup>1</sup>

В разд. 1.2 мы уже познакомились с основными «компонентами» рецепторов, нейронов и эффекторов, схематически представленных на рис. 3. В мозге многие миллиарды нейронов связаны между собой, образуя цепи, петли и сложно переплетенные сети, так что сигналы, поступающие в сеть от рецепторов,

<sup>1</sup> В этом разделе разъясняются такие основные понятия нейрофизиологии, как аксон, дендрит, синапс и пороговое значение, и читатель, хоть немного знакомый с нейрофизиологией, может его не читать.

взаимодействуют там с миллиардами других сигналов, полученных системой раньше, и в результате этого взаимодействия изменяется состояние системы и возникают сигналы, возбуждающие эффекторы. Благодаря этому поведение организма

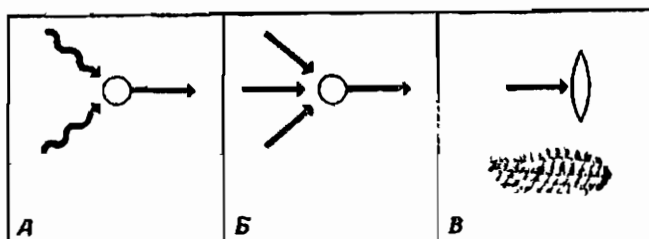


Рис. 3. Основные элементы, которые необходимо знать при изучении нервной системы.

А. Рецепторы—преобразуют энергию в „нейральные сообщения“. Б. Нейроны—преобразуют полученные сообщения в новые сигналы. В. Эффекторы—например, мышечные волокна, сокращающиеся под действием полученных сигналов.

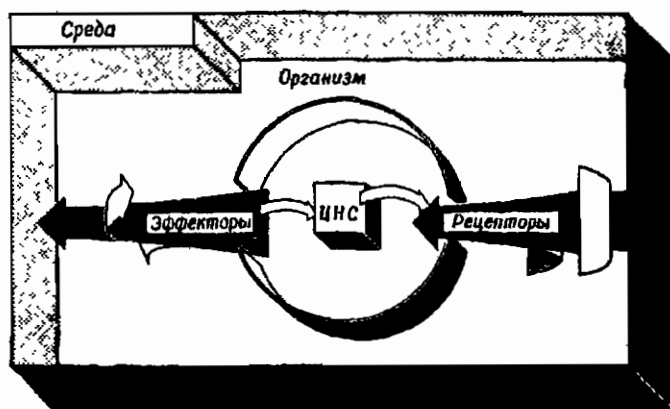


Рис. 4. Взаимодействие между организмом и средой.

Реакция рецепторов на воздействия среды и сигналы обратной связи от эффекторов преобразует поведение ЦНС (центральной нервной системы), которая, в частности, управляет эффекторами, обеспечивающими активность организма.

в данный момент определяется не только поступившими в этот момент стимулами, но и всем прошлым опытом, выражающимся в состоянии (и изменении структуры) его нейронной сети (рис. 4).

Все эти соображения можно суммировать, сказав, что в нашей теории мы рассматриваем мозг как нейронную сеть; тем самым в известном смысле устанавливается некий критерий

для оценки объяснений, из которых складывается наша теория мозга. Другими словами, в нашей теории мозга (но, конечно, не в нашем исследовании искусственного интеллекта) основной упор делается, как уже отмечалось в рассуждениях о различных уровнях описания в разделе 1.2, на изучение свойств систем взаимосвязанных нейронов, а не на чисто психологические вопросы и не на исследование биохимических систем. Мы сосредоточим свое внимание на некоторых свойствах нейронов и даже более крупных структур головного мозга и будем строить теорию мозга на этой основе, а не на основе, например, биохимического изучения воздействия разных лекарственных веществ на функции нервной системы. Мы не будем также уделять внимание другим клеткам мозга, например глиальным клеткам, которые играют важную роль в метаболизме, а, по мнению некоторых исследователей, возможно, принимают участие и в формировании памяти.

Несмотря на такую ограниченность нашего подхода, мы надеемся решить с его помощью много важных задач. И при этом вовсе не исключаем возможности слияния в будущем нашего подхода с другими подходами, например основанными на изучении химической природы процессов мышления.

Всем нам известны пять основных чувств: слух, зрение, осязание, вкус и обоняние. Специализированные рецепторы глаза реагируют на свет; рецепторы, расположенные во внутреннем ухе, через посредство ряда структур воспринимают колебания давления воздуха; некоторые рецепторы кожи реагируют на изменение давления, а другие, расположенные на языке и в полости рта, — на самые малые концентрации химических веществ. Но, несмотря на всеобщее убеждение, что шестое чувство дано далеко не каждому, у всех нас есть и шестое, и седьмое чувство и еще много других. Помимо «классических» осязательных рецепторов в коже имеются и другие, реагирующие на температуру или на болевые воздействия, например на нарушение целостности ткани.

Кроме внешних рецепторов имеются и рецепторы в мышечной ткани, которые регулируют работу мышц, сухожилий и суставов и постоянно обеспечивают сигналы «обратной связи», несущие информацию о напряжении, развиваемом мышцей, ее длине, суставном угле и т. п., поскольку для нормального функционирования эффекторов необходимо знать не только то, к чему должна стремиться система, но и то, где она сейчас находится. Вестибулярный аппарат, расположенный в височной кости, контролирует положение тела в пространстве и ускорение его движения. Кроме того, во внутренних органах имеются рецепторы, контролирующие химический состав крови, кровообращение, пищеварение и другие функции. В мозге имеются



также рецепторы, сигнализирующие о недостаточном содержании в крови воды, сахара и т. п. При раздражении соответствующих клеток мозга животное без конца пьет воду или поглощает огромные количества пищи, хотя у него нет объективных оснований для жажды или голода. Это происходит по-

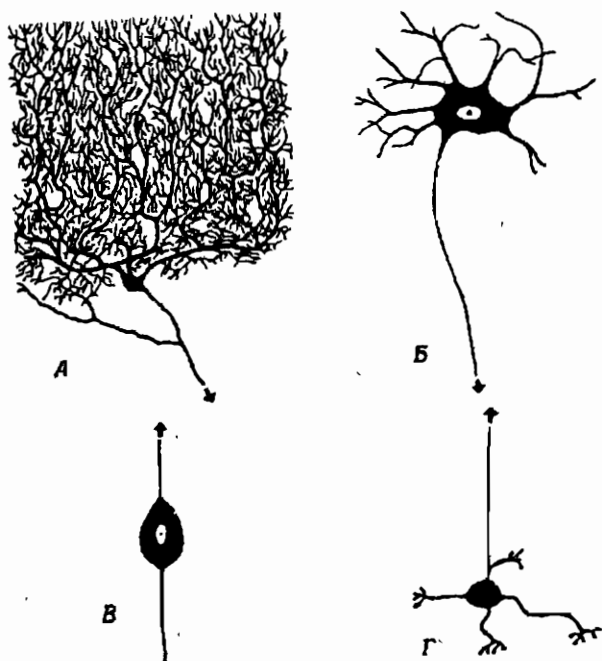


Рис. 5. Этот рисунок напомнит нам, сколь схематично идеализированное представление о нейроне (рис. 6).

Приведены всего 4 из тысяч различных типов нейронов. Во всех случаях стрелы направлены к конечным разветвлениям аксонов, не показанных на рисунках. А. Клетка Пуркинье мозжечка. Б. Двигательный нейрон (наиболее близкий к идеальному нейрону). В. Биполярный нейрон обонятельной системы. Г. Клетка-зерно мозжечка.

тому, что мозг получил сигнал о недостатке воды или пищи и дал животному соответствующие инструкции, несмотря ни на какие противоречащие этому сигналы, которые могут поступать из переполненного желудка.

Для того чтобы лучше понять, что происходит на пути от рецептора к эффектору, нужно ближе познакомиться со свойствами нейрона. Но, оказывается, в природе вообще не существует того, что можно было бы назвать типичным нейроном (рис. 5). Поэтому нам остается только схематически описать свойства, общие для большинства нейронов, отметив, что

в каждом специальном случае эту обобщенную картину придется соответственно модифицировать.

Основные черты нейрона можно видеть на рис. 6, где схематически изображен мотонейрон спинного мозга млекопитающего. От тела нейрона (или сомы) отходит несколько ветвящихся отростков, называемых *дендритами* (от греч. *дендрон*, что означает «дерево»). Эти дендриты образуют основную часть *входной поверхности* нейрона. От тела клетки в точке, называемой *аксонным холмиком* (переходящим в *начальный*

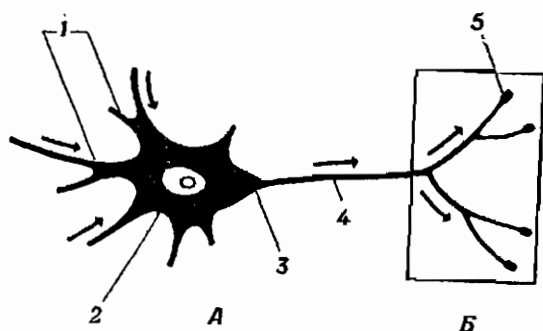


Рис. 6. Схема нейрона.

Возбуждение рецепторов и других нейронов изменяет мембранный потенциал дендритов (1) и тела клетки (2). Эффекты этих изменений сходятся на аксонном холмике (3), в результате чего — при соответствующей пространственно-временной конфигурации пришедших сигналов — импульс мембранного потенциала начинает распространяться по аксону (4), расходясь по концевым разветвлениям и активизирует синаптические концевые луковицы (5), которые в свою очередь изменяют мембранный потенциал других нейронов или мышечных волокон.

*сегмент*), отходит также длинное волокно, называемое *аксоном*, который образует обычно так называемые *концевые разветвления*. *Концевые утолщения* ветвей аксона, или *пуговки*, располагаются на других нейронах или на эффекторах. Места соприкосновения этих веточек с клеткой, на которой они лежат, называются *синапсами*.

Удобнее всего представить, что поток информации от нейрона к нейрону происходит в направлении, указанном на рис. 6 стрелками; хотя аксон и может «проводить» в обоих направлениях, в большинстве случаев возбуждение передается на дендрит или сому той клетки, с которой он образует синапс. При этом возбуждение передается сначала на холмик, а затем распространяется по аксону, пока не достигнет концевого разветвления. Некоторые аксоны очень длинные. Например, нейрон, управляющий движением большого пальца ноги, находится в спинном мозге и, следовательно, длина его аксона не меньше длины ноги человека. Длина аксонов подобных

нейронов просто огромна по сравнению с размерами нейронов головного мозга, которые настолько малы, что в относительно скромном объеме черепа их умещается более десяти миллиардов. Например, в зрительной системе имеются крошечные клетки, называемые амакриновыми, ответвления которых нельзя разделить на дендриты и аксоны, так как они очень короткие и могут проводить возбуждение в обе стороны, выполняя роль локальных модуляторов для соседних нейронов.

Для того чтобы лучше разобраться в этой системе «связи», удобно рассматривать клетку как живое существо, заключен-

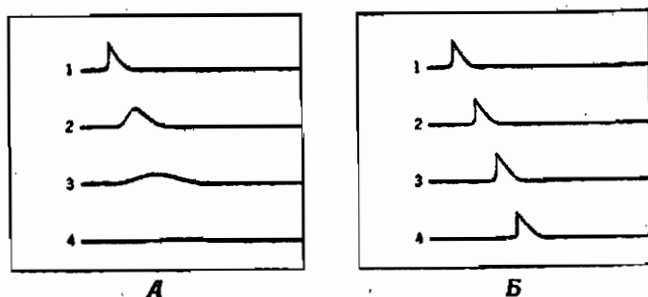


Рис. 7. Два основных типа распространения возбуждения по нейрону.

**А.** Пассивное распространение изменений мембранного потенциала (аналогично распространению тепла по металлическому стержню)—лик сигнала постепенно затухает; такая проводимость характерна для дендритов, тела клетки и очень коротких аксонов. **Б.** Активное распространение—возбуждение в одном участке вызывает возбуждение в следующем; характерно для передачи сигналов по длинным аксонам; было обнаружено также и в дендритах некоторых клеток, например клеток Пуркиньи. Цифрами обозначены последовательные моменты времени.

ное в мембрану, между наружной и внутренней поверхностями которой существует разность потенциалов. Если изменить эту разность потенциалов между внешней и внутренней поверхностями мембраны, то это изменение распространяется пассивным образом, примерно так же, как происходит распространение тепла по металлическому стержню. Изменение температуры на одном конце стержня может передаваться и другим его участкам, но с увеличением расстояния от точки нагрева изменение температуры становится все менее выраженным (рис. 7). Точно так же обычное изменение мембранного потенциала пассивно распространяется по волокну, и чем больше мы удаляемся от точки исходного возбуждения, тем позже оно наступает и тем слабее выражено.

Для клеток с короткими отростками (типа палочек, колбочек и вставочных нейронов сетчатки) этого пассивного распространения достаточно для того, чтобы передавать сигналы об изменении потенциала из одного конца системы в другой.

Но если аксон достаточно длинный, то этого механизма совершенно недостаточно, поскольку возбуждение на одном конце затухнет полностью, так и не добравшись до другого.

К счастью, у клеточных мембран есть дополнительное свойство, состоящее в том, что если изменение разности потенциалов оказывается достаточно большим (или, как говорят, превышает *порог*), то в цилиндрических образованиях типа аксона возникает импульс, который активно распространяется, сохраняя постоянную амплитуду, т. е. не затухает по мере распространения. Для того чтобы понять, как это происходит, представьте себе металлическую трубку, начиненную порохом. Если такую трубку слегка нагреть, то порох не воспламеняется, и разность температур распространяется пассивно, постепенно затухая. Если, однако, превысить температуру возгорания пороха, то в нагреваемом участке трубки порох вспыхнет и выделяемого в результате этого тепла оказывается достаточно, чтобы поджечь порох на соседнем участке и так далее по всей длине трубки. В этом случае мы имеем дело уже не с пассивным распространением тепла, полученного при нагревании. Сообщенное тепло послужило лишь толчком к возникновению «регенеративного» процесса — цепной реакции, которая сама обеспечивает себя энергией, и стоит нам вызвать эту реакцию в одном месте, как она высвобождает энергию, запасенную в соседнем участке, которая в свою очередь вызывает реакцию на следующем участке, и так далее. Аналогичным образом обстоит дело и с мембраной нервного волокна. Так, если разности потенциалов на дендритах и теле нейрона создают (обычно в результате пассивного распространения возбуждения на мембране аксонного бугорка) разность потенциалов, превышающую определенный *порог*, то запускается регенеративный процесс, т. е. возбуждение в одном участке оказывается достаточным, чтобы запустить аналогичный процесс в соседнем участке, так что возникает незатухающий импульс, распространяющийся вдоль аксона.

В нашем примере с запальным устройством мы можем добиться активного распространения лишь однажды: после того как весь порох выгорит, останется лишь металлическая трубка, способная проводить тепло только пассивно. Поэтому аксон лучше сравнивать с перезаряжаемым запалом: представим себе, что после распространения каждого такого импульса по аксону происходят химические процессы, эквивалентные перезарядке запала. (Эта функциональная эквивалентность не означает, что изменения, происходящие в мембране, действительно аналогичны перезарядке!) Поэтому имеется короткий *рефрактерный период*, во время которого аксон не может передавать новый импульс; именно в этот период и происходит указанное химическое восстановление.

Если бы мы нанесли раздражение в каком-либо участке по ходу аксона, то возбуждение распространялось бы в обоих направлениях. Однако если импульс возникает на одном конце аксона (обычно на аксонном холмике), то он может распространяться лишь в одном направлении, потому что возбужденный участок аксона становится рефрактерным и остается в этом состоянии еще достаточно долго. Перемещаясь по аксону, импульс вызывает возникновение новых импульсов в каждом из ветвлений (или коллатералей) аксона, а те в свою очередь вызывают новые импульсы в каждой из еще более тонких веточек (рис. 8). Когда же импульс доходит до концевой пуговки, то после небольшой задержки на мембране клетки, с которой аксон образует

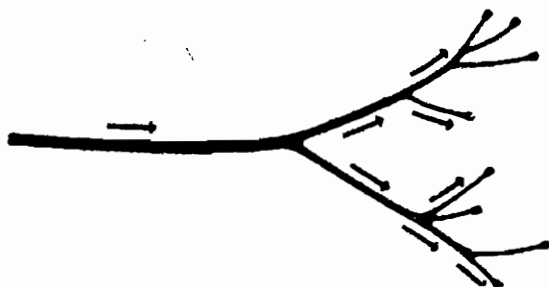


Рис. 8. Обычно возбуждение распространяется от аксонного холмика по направлению к разветвлению: дойдя до точки ветвления, спайк возбуждает спайк во всех отходящих от этой точки ветвях.

синапс, возникает разность потенциалов. Мембрана концевой пуговки называется *пресинаптической мембраной*, а мембрана той клетки, на которую передается импульс, — *постсинаптической мембраной*.

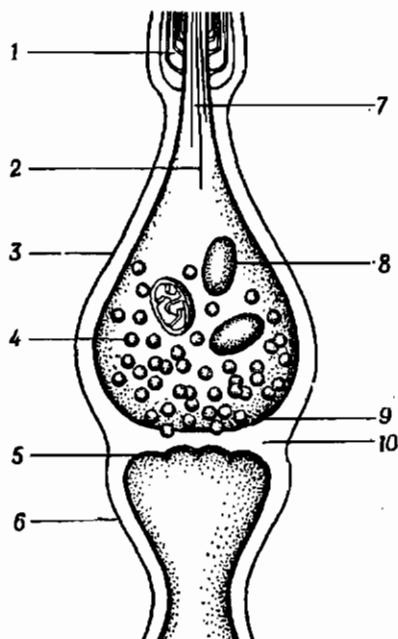
Как это ни удивительно, в большинстве случаев непосредственная причина изменения потенциала постсинаптической мембраны имеет не электрическую, а химическую природу. В некоторых *особых* синапсах, которые отличаются большими размерами, или в таких синапсах, для которых характерно тесное соприкосновение мембран, изменение поляризации постсинаптической мембраны происходит без участия химических медиаторов. Однако, как правило, электрический импульс, достигнув концевой пуговки вызывает выделение из так называемых синаптических *пузырьков* вещества, называемого медиатором, которое диффундирует затем через небольшую *синаптическую щель* (рис. 9) к постсинаптической мембране. Попав на эту мембрану, медиатор вызывает изменение ее поляризации. Медиатор по своему действию может быть двух основных типов:

возбуждающим — если он изменяет разность потенциалов на постсинаптической мембране в направлении к пороговому значению, или тормозным, т. е. изменяющим разность потенциалов в обратную сторону.

Едиственное обобщающее высказывание, которое можно сделать относительно нервной системы, звучит примерно так: «О нервной системе нельзя делать общих утверждений, за исключением того, что о нервной системе нельзя делать общих

Рис. 9. Схема „типичного“ синапса.

Пришедший по аксону (7) импульс не оказывает прямого электрического воздействия на нейрон, с которым этот аксон контактирует, а вызывает освобождение некоторого числа синаптических пузырьков (4), в которых заключен медиатор; эти пузырьки диффундируют через пресинаптическую мембрану (9) и синаптическую щель (10) и деполаризуют (или гиперполяризуют) постсинаптическую мембрану (5). В данном случае постсинаптическая мембрана образует поверхность крошечного шипика дендрита, обеспечивающего синаптический контакт. Нейрофиламенты (2) и митохондрии (8) принимают участие в метаболизме нервной системы. Миелиновая оболочка (1), которой одето большинство аксонов, служит, помимо всего прочего, для увеличения скорости распространения сляков.



утверждений, за исключением того, что... и т. д.». Однако многие нейрофизиологи принимают закон Дейла, согласно которому если проследить за всеми ветвлениями аксона какого-либо одного нейрона *млекопитающего*, то все синапсы, образуемые этим аксоном с другими клетками, окажутся либо только возбуждающими, либо только тормозными. К беспозвоночным это утверждение неприменимо. Например, Кандель и др. [133] установили, что у моллюска *Aplysia* можно выделить вставочный нейрон, различные ветвления которого осуществляют противоположные синаптические воздействия. «Закон» Дейла может оказаться неверным даже для млекопитающих, поскольку имеются косвенные данные [224], что в спинном мозге кошки примерно 30% волокон образуют и возбуждательные и тормозные синапсы (см. также [225]). Естественно, что на любой данной клетке могут

быть синапсы как того, так и другого типа, поскольку они образованы многими разными нейронами.

Многочисленные незначительные изменения мембранного потенциала отдельной клетки, вызванные активностью всех ее синапсов, пассивно (в большинстве случаев, но далеко не всегда) распространяются по мембране дендритов и тела клетки, постепенно затухая. Но в аксонном холмике эти потенциалы сходятся, и хотя каждый из них может быть очень слабым, суммарное возбуждение может во много раз превышать порог (рис. 10).

Другими словами, импульс, достигающий концевой пуговки аксона, обычно вызывает лишь подпороговое возбуждение постсинаптической мембраны. Тем не менее согласованный эффект

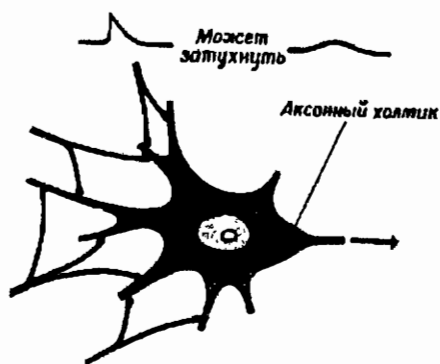


Рис. 10. Эффект каждого отдельного синаптического возбуждения может быть слабым, однако совокупный эффект, получающийся в результате пространственной и временной суммации сотен таких отдельных эффектов, может оказаться выше порогового и возбудит импульс в аксонном холмике.

многих таких подпороговых изменений в аксонном холмике может превысить порог, и если это происходит в момент, когда рефрактерный период после предыдущего возбуждения уже закончился, то вдоль аксона начнет распространяться следующий импульс.

Для простоты представим себе схематически эффект синаптического возбуждения как изменение во времени потенциала в направлении порогового значения по типу первого импульса, показанного на рис. 11. (Мы не будем здесь изображать тормозный эффект, считая, что он просто препятствует изменению потенциала в направлении к порогу, либо внося в суммарный эффект «отрицательный вклад», либо «шунтируя» возбуждение.) Изменения разности потенциалов, вызванные одним спайком, пришедшим к синапсу, почти всегда будут гораздо ниже порогового. Но здесь возможен кумулятивный эффект, эти изменения могут суммироваться с изменениями, вызванными предшествующим спайком, которые еще не успели затухнуть. Поэтому, если подпороговые изменения поступают одно за другим с достаточно короткими интервалами, они могут накапливаться и в конечном счете превысить порог (рис. 11).

Можно считать, что в норме порог возбуждения нейрона является постоянным. Однако сразу после того, как в аксоне возникнет импульс, этот порог резко повышается, и проходит немало времени, прежде чем он вернется к обычному значению. Заметим, что если, как это произошло в момент времени  $t_6$ , кумулятивный эффект окажется значительно выше *нормального*

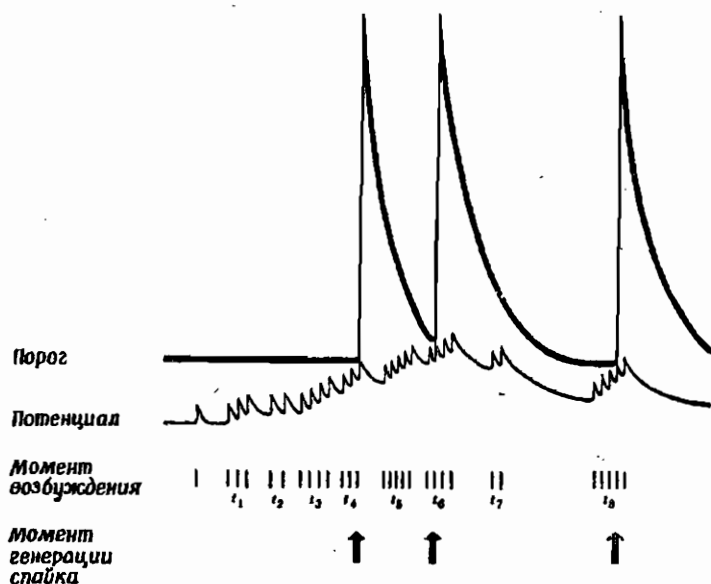


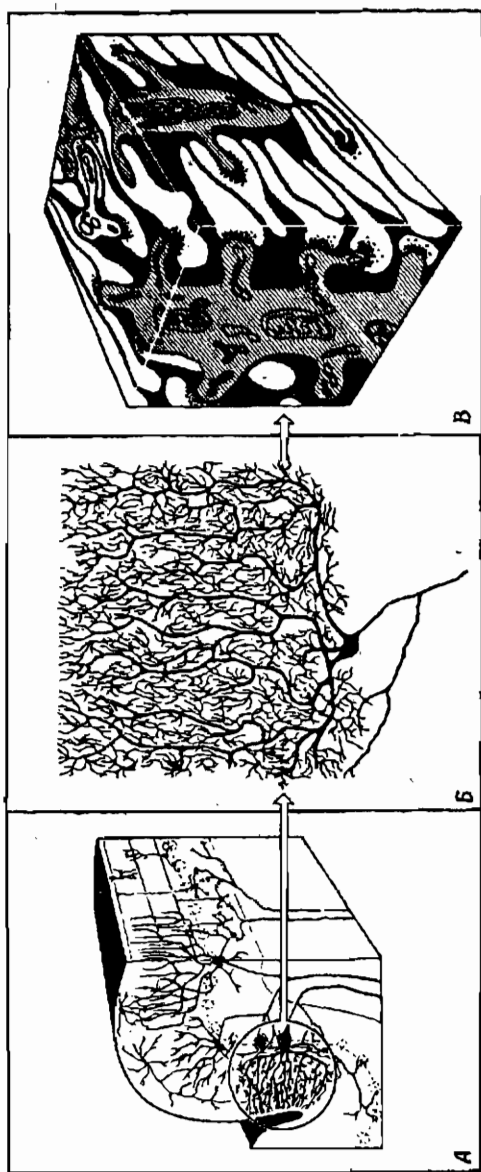
Рис. 11. Схема временной суммации.

Каждое возбуждение вносит небольшой вклад в мембранный потенциал, который, затухая, быстро возвращается к своему уровню покоя. Однако, если интервалы между возбуждениями достаточно малы, их суммы может оказаться достаточно для того, чтобы перекрыть порог. Резкое повышение порога, следующее за генерацией каждого спайка, позволяет понять, почему аксон не способен проводить два импульса, если интервал между ними меньше рефрактерного периода.

порогового значения, то он может превысить и текущее значение порога, прежде чем тот вернется к своему нормальному уровню. Такой период, в течение которого никакое повторное раздражение независимо от его силы не может вызвать второй импульс, называется *абсолютным рефрактерным периодом*; когда же очень сильное входное возбуждение может привести к возникновению в аксоне второго импульса, то говорят об *относительном рефрактерном периоде*. Естественно, что провести строгую границу между этими периодами нельзя.

Отметим, что синаптические возбуждения, влияющие на состояние аксона, могут сколько угодно быстро следовать одно





**Рис. 12.** Три схемы, дающие некоторое представление о сложности организации нервной системы. Можечок состоит из нескольких долей, каждая из которых делится на несколько листков. А. Участок одного листка; изображена лишь небольшая часть составляющих его клеток. Б. Более подробная схема одной из таких клеток — клетки Пуркинью; ее площадь в плоскости среза составляет примерно  $0,3 \text{ мм}^2$ , а толщина — не более  $0,03 \text{ мм}$ . Она образуется свисая с одним лезвием волокон. с 200 000 параллельных волокон и с аксонами многих других клеток мозжечка. В. Показана часть одной из самых мелких дендритных веточек клетки Пуркинью. Можно видеть, что от этой веточки отходят семь синаптических шипиков (два из них припадают на переднюю грань), вступающих в контакт с проходящими вблизи параллельными волокнами.

за другим. Если на клетке имеется порядка 10 000 синапсов, то можно ожидать, что на протяжении одного рефрактерного периода возбудится по крайней мере тысяча из них. В связи с этим возникают сложные взаимодействия различных событий, происходящих на протяжении как одного, так и разных рефрактерных периодов. Например, из рис. 11 видно, что вспышки активности нейрона в моменты времени  $t_3$  и  $t_6$  одинаковы, однако спайк генерируется лишь в момент  $t_6$ , хотя для этого потенциал должен был значительно превысить нормальный порог, так как он пришелся на относительный рефрактерный период, последовавший за спайком, генерированным в момент  $t_4$ .

Масштабы синаптического взаимодействия клеток лучше всего иллюстрировать на примере клеток Пуркинье мозжечка (рис. 12) с весьма многочисленными и сильно ветвящимися дендритами. Клетки многих типов образуют синапсы с клеткой Пуркинье, и эти синапсы весьма разнообразны. Например, от других клеток мозжечка, так называемых клеток-зерен, отходит примерно 200 000 волокон, идущих практически параллельно друг другу. Прорезая массу дендритов клетки Пуркинье, они образуют с ними синапсы, по одному на аксон каждой клетки-зерна. Другие волокна, которые называют лазящими, в самом деле как бы лазают по наиболее густым участкам дендритного ветвления клетки Пуркинье, образуя с ней многочисленные синапсы. Поэтому, если лазящее волокно командует клетке Пуркинье возбудиться, та послушно возбуждается. Согласованное действие многих параллельных волокон вкупе с другими волокнами может регулировать уровень этого возбуждения или возбуждать клетку Пуркинье непосредственно. Все это еще раз напоминает нам о разнообразии синапсов по типу, размеру и форме.

Геометрия различных синапсов, образуемых данной клеткой, определяет, сложатся ли временные соотношения разных синаптических активностей таким образом, чтобы суммарный эффект затухающих изменений потенциала, поступающих на аксонный холмик, превысил пороговое значение; поэтому в зависимости от геометрии синапсов, взаимодействие между клетками может быть самым различным. В разд. 2.4, рассмотрев роль нейронов в предварительной обработке зрительной информации, мы начнем лучше разбираться во всех тонкостях их функционирования. Здесь же мы попытаемся связать то, что мы рассказали о нейронах, со свойствами рецепторов и эффекторов.

Что касается организации «входа» нервной системы, то рецепторы, так же как и нейроны, обладают свойством генерировать потенциалы, передающиеся различным синапсам на поверхности нейронов. Однако «входная» поверхность рецепторов

не образует синапсов с другими нейронами; она может лишь преобразовывать энергию, поступающую из внешней среды, в изменение мембранного потенциала, которое в свою очередь может распространяться пассивно или активно (многие рецепторы, например зрительные, не генерируют спайков). Палочки и колбочки глаза содержат различные пигменты, способные химически реагировать на свет, а эта химическая реакция в свою очередь вызывает локальные изменения мембранного потенциала, который называют генераторным. При достаточной интенсивности света, падающего на колбочку или палочку, эти изменения потенциала вызовут изменения потенциала вставочных нейронов, которые могут оказаться достаточно сильными для того, чтобы возбудить ганглиозные клетки сетчатки (см. разд. 2.4): таким образом сообщение о свойствах света будет передано в нервную систему в виде серии импульсов. Другие рецепторы могут преобразовывать в генераторные потенциалы давление и т. п.

Для того чтобы перейти к обсуждению организации «выхода» нервной системы, мы должны прежде всего вспомнить о том, что мышца представляет собой совокупность многих тысяч мышечных волокон. Нейроны, управляющие мышечными волокнами, называют *двигательными нейронами*, или *мотонейронами*; они лежат в спинном мозге, и их аксонам иногда приходится проходить огромные (по нейронным стандартам) расстояния, прежде чем они могут образовать синапс с мышечным волокном. Таким образом, наименьшая функциональная единица на выходе нервного тракта (по крайней мере для млекопитающих) — это *двигательная единица*, состоящая из тела мотонейрона, его аксона и группы мышечных волокон, управляемых этим аксоном.

Мышечное волокно сходно с нейроном в том отношении, что и оно получает входные сигналы от других клеток, с которыми оно образует синапсы. Однако в ответ на такую активизацию оно не генерирует импульсы, которые бы распространялись по аксону, а просто сокращается; поэтому мотонейроны, образующие синапсы на мышечном волокне, по структуре своей импульсации определяют степень сокращения мышцы, образованной из этих волокон, и в конечном счете управляют движением. (Аналогичные замечания можно сделать и о клетках, которые выделяют различные химические вещества в кровь или пищеварительный тракт или же секретируют пот или слезную жидкость.)

Так как нейрон не может послать мышце команду «расслабиться» (максимум, что нейрон может сделать, — это перестать посылать мышце команду сокращаться), мышцы животных, как правило, сгруппированы в антагонистические пары (рис. 13).

Сокращение одной из мышц такой пары вызывает расслабление другой. Так, одна группа мышц заставляет нас разогнуть руку в локте, а другая — согнуть ее. И если нам нужно разогнуть руку, мы не командуем *мышцам-сгибателям* расслабиться, а просто перестаем заставлять их сокращаться, после чего они автоматически расслабляются при сокращении *мышц-разгибателей*.

Раздражение двигательной *концевой пластинки* (т. е. синапса мотонейрона на мышечном волокне) вызывает кратковременное одиночное сокращение мышечного волокна. Если импульсы при-

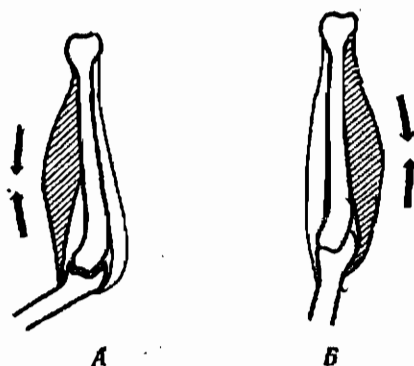


Рис. 13. Схематическое изображение локтевого сустава, показывающее антагонистическое действие мышц-сгибателей и мышц-разгибателей.

А. Сокращение мышцы-сгибателя уменьшает суставной угол. Б. Сокращение мышцы-разгибателя увеличивает суставной угол.

ходят на концевую пластинку с низкой частотой, то это вызывает серию таких сокращений, при каждом из которых механическая реакция продолжается дольше, чем стимул, т. е. потенциал действия. С повышением частоты раздражения наступает момент, когда второй импульс поступает раньше, чем закончится механическая реакция на первый. А это вызывает механическую суммацию одиночных сокращений. До известного предела эффект суммации возрастает по мере уменьшения интервала между импульсами. Однако, как только эти интервалы приблизятся по продолжительности к рефрактерному периоду, эффект суммации начинает уменьшаться; на этом этапе увеличение частоты возбуждения уже не усиливает напряжения мышцы, а лишь удерживает ее в сокращенном состоянии. Такая предельная реакция мышечного волокна называется *тетанусом*, и напряжение (не путать со степенью сокращения) мышечного волокна в это время примерно в четыре раза выше, чем во время одиночного сокращения (рис. 14). Поэтому для увеличения напряжения мышцы

в процесс сокращения должно вовлекаться все больше и больше волокон.

При раздражении рецепторов увеличение частоты стимулов повышает генераторный потенциал. Если перейти к нейронам первого уровня, генерирующим спайки, то аксоны «разряжаются» каждый раз, когда возбуждают импульс, а затем должны вернуться в состояние, при котором порог сравним с потенциалом на входе. Стало быть, чем выше генераторный потенциал, тем короче будет этот период и, следовательно, тем выше будет

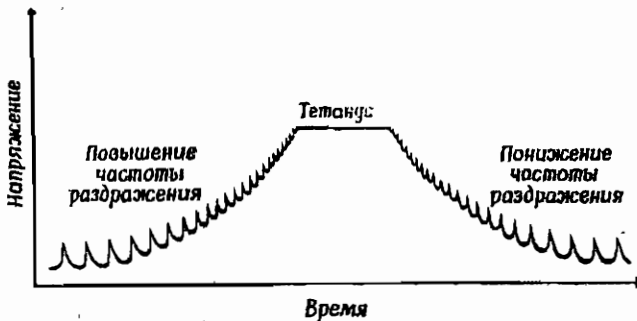


Рис. 14. Напряжение в одиночном мышечном волокне постоянной длины в ответ на увеличение и понижение частоты стимуляции.

Одиночные сокращения, характерные для низкочастотного возбуждения, при достаточно высокой частоте приходящих импульсов уступают место длительному устойчивому (тетаническому) сокращению.

частота импульсов. Поэтому на «входе» системы удобно приблизительно описывать ситуацию так, как если бы интенсивность стимуляции можно было перекодировать в частоту импульсов. Но если уйти с периферии и обратиться к клеткам, ответственным за «вычисления», то нам придется проститься с такими простыми зависимостями и обратиться к взаимодействиям возбуждающих и тормозных клеток, где каждый тормозный импульс увеличивает разность между «текущим» потенциалом и его пороговым значением, а каждый возбуждающий уменьшает ее. Таким образом, по мере повышения частоты возбуждающих импульсов или уменьшения частоты тормозных частота импульсации будет возрастать.

Изложенные здесь данные создают основу, необходимую для изучения роли, которую играют нейроны в предварительной обработке зрительной информации у кошки и лягушки (разд. 2, 4). Однако некоторые читатели, возможно, захотят сначала представить себе место зрительной системы в общей анатомии мозга.

### 23. ОТСТУПЛЕНИЕ. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ МОЗГА<sup>1</sup>

Мозг состоит из многих миллиардов нейронов. Для того чтобы выявить соотношение между функциями мозга в целом и функциями отдельных клеток, необходимо иметь некоторое представление о строении мозга. Рассматривая препараты мозга невооруженным глазом, можно увидеть, что мозг делится на ряд областей. Анализ с помощью различных микроскопических, биохимических и электрофизиологических методов позволяет выявить различия в свойствах, взаимосвязях и функциях разных областей и перейти к более тонкой «топографии» мозга.

Строению мозга, которое различается у разных видов, посвящена огромная литература. Анатомия нервной системы все еще находится в процессе изучения, а анатомия многих частей головного мозга столь же спорна, как и теории относительно функций мозга, излагаемые в этой книге! Однако, как я уже неоднократно подчеркивал, мы не можем надеяться понять, как работает мозг, не связывая его функции с его структурой. Поэтому здесь, а также в разд. 5.2 излагаются основные сведения по анатомии нервной системы. А поскольку многим читателям обилие незнакомых терминов, характерное для этих двух разделов, может показаться чрезмерным, книга написана так, что эти два раздела можно опустить без ущерба для понимания остальных. Я хотел бы также добавить, что мои познания в анатомии нервной системы весьма скромны, и поэтому мое изложение вряд ли имеет какие-либо особые достоинства, если не считать его краткости. Если в этом кратком очерке и есть что-то хорошее, то все это следует отнести за счет превосходных лекций У. Наута по анатомии нервной системы, которые он читал в 1966 г., в рамках программы подготовки к реализации исследовательского проекта по нейрофизиологии Массачусетского технологического института. Эти лекции впоследствии легли в основу одной из глав книги Наута и Картена «Общий очерк мозга позвоночных» [179].

Прежде всего следует сделать три замечания. Во-первых, в то время как некоторые области мозга имеют четкие границы (ни у кого не вызывает сомнений, какую часть мозга следует считать мозжечком), другие области постепенно переходят одна в другую. И относиться к границам между этими областями нужно так же, как к условным границам, разделяющим полоску бумаги, цвет которой постепенно переходит от белого к черному, на четыре области: «белую», «светло-серую», «темно-серую» и «черную», ясно сознавая, что нелепо спорить о том, где именно

<sup>1</sup> При первом чтении этот раздел можно пропустить.

пройдет линия, отделяющая «белое» от «светло-серого». Во-вторых, точно так же как у некоторых людей бывает большая голова и короткое туловище, а у других — наоборот, так и относительное расположение и форма разных областей мозга сильно варьирует у разных индивидуумов. В-третьих, у разных групп животных строение мозга, несмотря на многие общие черты, сильно различается. Например, различия в предварительной обработке зрительной информации в сетчатке кошки и лягушки (вопрос, которым мы займемся в следующем разделе) ясно показывают, что одно лишь общее сходство некоторой части мозга лягушки с соответствующей частью мозга кошки еще не означает, что они выполняют одинаковые функции.

Человек вместе со всеми другими млекопитающими (а также птицами, рыбами, лягушками и крокодилами) относится к *позвоночным*. У него есть *позвоночник* — ряд полых костей (позвонков), расположенных вдоль спины и заполненных огромным количеством нейронов, образующих *спинной мозг*. Вся сенсорная информация от кожи, суставов и мышц туловища и конечностей поступает в спинной мозг, и клеточные тела всех *мотонейронов*, синапсы которых контролируют работу мышц туловища и конечностей, лежат в спинном мозгу. В отличие от этого информация, поступающая по *черепно-мозговым нервам* от рецепторов головы, приходит в центральную нервную систему главным образом через ствол мозга. Необходимо отметить, хотя здесь это нас интересовать не будет, что спинной мозг содержит также элементы *автономной нервной системы*, иннервирующей железы, гладкую мускулатуру стенок сосудов и внутренних органов, а также мышцы, поднимающие волосы.

У беспозвоночных строение нервной системы столь разнообразно и настолько сильно отличается от ее строения у позвоночных, что мы его касаться не будем. Мы займемся изучением нервной системы позвоночных и в данном разделе уделим основное внимание млекопитающим, и в частности человеку.

Прежде всего читателю придется вернуться к рис. 2, где показано расположение в голове человека основных отделов мозга, которые мы собираемся рассмотреть. На рис. 2, А хорошо видны структуры так называемого среднего мозга. Основное отличие головного мозга млекопитающих, и особенно человека, от мозга других видов состоит в резком увеличении *новой коры*, или *неокортекса*, которая у человека значительно превосходит по объему остальной мозг, что ясно видно на рис. 2, Б, где складки новой коры полностью закрывают средний мозг. Кора головного мозга человека представляет собой слой толщиной всего лишь в 60—100 нейронов, и для того чтобы в ограниченном пространстве черепа могли уместиться составляющие его несколько миллиардов нейронов, ему приходится образовывать

множество складок. Как мы узнаем в разд. 5.2, такое резкое увеличение переднего мозга ведет к значительным изменениям структуры связей в стволе головного мозга и в спинном мозгу.

В каждом полушарии головного мозга принято различать четыре доли: *лобную, височную, теменную и затылочную*.

Складки коры головного мозга называют *бороздами*, а выступающую между двумя бороздами ткань — *извилинами*. Нервные пути, соединяющие различные области двух полушарий, называются *комиссурами*. Самая крупная из них — это мозолистое тело, осуществляющее связь между двумя полушариями.

Строение коры головного мозга неоднородно и различается в разных участках. Некоторые области коры называют *сенсорными*; в каждой из них в основном перерабатывается информация одной модальности; к ним относится не только соматосенсорная область (рис. 2, 8), но также зрительная, слуховая и обонятельная (видная лишь на разрезе, поскольку она не выходит наружу) области, получающие информацию от дистантных рецепторов головы. Некоторые из нервных волокон, отходящих от моторной области коры головного мозга, идут через спинной мозг к мышцам и управляют движениями. Филогенетически соматосенсорная и моторная области неразрывно связаны друг с другом, и (по крайней мере) у человека не только в моторной области имеется сенсорное представительство (это и не удивительно, поскольку клетки, регулирующие движение, должны реагировать на соответствующие внешние стимулы), но более того, в соматосенсорной области имеются клетки, аксоны которых проецируются<sup>1</sup> (так же как и нейроны моторной области) на мотонейроны и вставочные нейроны спинного мозга, влияя таким образом на движение через посредство максимум двух промежуточных синапсов. В связи с этим область больших полушарий, примыкающих к центральной, или роландовой, борозде, принято называть просто *сенсомоторной областью*. Остальные области коры называют *ассоциативными*, но это неудачное наименование, отражающее ошибочное представление прошлого века, согласно которому функции этих областей заключались лишь в том, чтобы согласовывать, «ассоциировать» разнородные сенсорные данные и генерировать соответствующие команды, передаваемые в моторную область. Абсолютно неверное представление о том, что 90% мозга «не используется», распространенное среди дилетантов, возникло, вероятно, на той почве, что точные функции большей части этих «ассоциативных областей» до сих пор неизвестны.

<sup>1</sup> Когда говорят, что данная область коры *проецируется* на другую, то это означает, что существуют нервные связи, ведущие из первой области во вторую.



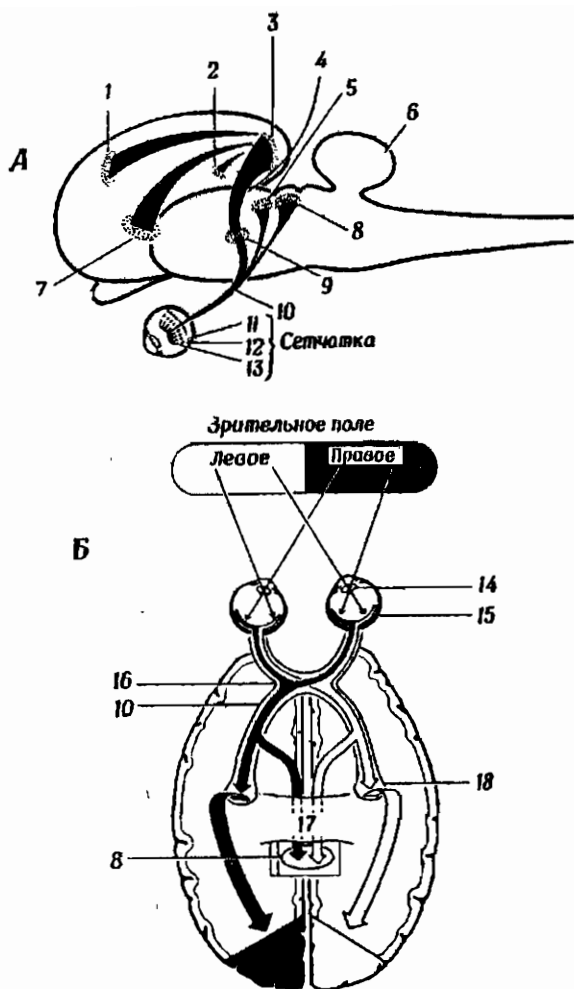


Рис. 15. Схема зрительной системы млекопитающих.

А. Вид сбоку. Б. Горизонтальный разрез. Обратите внимание на наличие путей, ведущих как в новую кору (через латеральное коленчатое тело), так и в средний мозг (в претектальную область и верхний бугорок четверохолмия).

1—фронтальная зрительная область; 2—престрнарная область; 3—зрительная кора; 4—зрительная радиация; 5—претектальная область; 6—мозжечок; 7—нижневисочная кора; 8—верхнее двухолмие (тектум); 9—ядро латерального коленчатого тела; 10—зрительный тракт; 11—палочки и колбочки; 12—биполярные клетки; 13—ганглиозные клетки; 14—хрусталик; 15—сетчатка; 16—хиазма; 17—мозолистое тело; 18—латеральное коленчатое тело.

Мотонейроны, образующие синапсы на мышечных волокнах и управляющие их сокращениями, лежат в спинном, а не в головном мозгу. Особую группу эффекторных нейронов, не связанных с движением, составляют нейроны гипофиза. Гипофиз представляет собой важнейшую эндокринную железу. Он выделяет несколько гормонов, которые разносятся кровью по организму и управляют функцией других эндокринных желез. При этом важно помнить, что эндокринные железы образуют еще одну систему регуляции — гуморальную, дополняющую нервную систему. Это напоминание о разнообразии эффекторных механизмов нужно дополнить, заметив, что сенсорная поверхность организма *не ограничивается* его наружной поверхностью. Кроме внешних (экстерорецепторных) входов от наружной поверхности тела и таких органов чувств, как глаза, уши и нос, имеются сенсорные входы еще двух типов: во-первых, проприоцепторы, доставляющие сигналы обратной связи о движениях и ориентации туловища от мышц, суставов, сухожилий, отолитов и полукружных каналов, а во-вторых, интерорецепторы, передающие информацию от желез и внутренних органов.

Прежде чем перейти к объяснению других терминов, попытаемся снабдить анатомические структуры соответствующими функциональными коррелятами, рассмотрев два наиболее важных типа входов для рецепторов головы. В этой книге мы не будем касаться вкуса и обоняния. Отметим лишь, что обоняние, подобно зрению и слуху, обладает важной способностью регистрировать информацию об удаленных областях окружающей среды. Рис. 15 и 16 дают нам некоторое представление об общем строении зрительной и слуховой систем, занимающихся периферической обработкой реакции палочек и колбочек на распределение светового потока, отраженного от объектов внешнего мира, и волосковых клеток внутреннего уха, которые реагируют на колебания, вызванные звуковыми волнами, попадающими в ухо.

На рис. 15, А можно видеть, что потенциалы действия колбочек и палочек после предварительной обработки в двух слоях клеток сетчатки попадают в зрительный тракт (образуемый аксонами ганглиозных клеток), который делится на несколько путей. Два из них идут в средний мозг, к так называемому *верхнему двуххолмию*, и к *претектальной области* (pretectum). Мы еще многократно будем возвращаться к верхнему двуххолмию и к *крыше мозга*—его гомологу (т. е. структуре со сходным анатомическим расположением и сходным развитием в филогенезе) у лягушки (разд. 5.5 и 7.2), подчеркивая их роль в управлении взглядом животного. Третий пункт назначения зрительного тракта — и, надо сказать, самый важный у человека — расположен в таламусе и называется *латеральным колемчатый телом*. Здесь сигналы, идущие по зрительному тракту, проходят

дополнительную предварительную обработку на пути к зрительной коре, расположенной в задней части головы. Зрительную кору называют также полем № 17 (по Бродману). Зрительная радиация, т. е. аксоны клеток латерального коленчатого тела, проецируется также на соседние поля № 18 и 19. Кроме двусторонней связи (не показанной на рис. 15) между зрительной корой и верхним двуххолмием имеются также волокна, связывающие зрительную кору с другими областями коры, из которых на рисунке показаны лишь фронтальная зрительная область (контролирующая движение глаз) и нижневисочная кора (расположенная на внутренней поверхности височной доли).

В дополнение к виду сбоку на рис. 15, Б показана схема зрительной системы человека «сверху», на которой видны пути — от сетчатки к верхнему двуххолмию и латеральному коленчатому телу. Здесь важно отметить, что зрительные тракты, идущие от двух глаз, перекрещиваются в области, которая называется *зрительной хиазмой* или *перекрестом*, таким образом, что аксоны, рецепторное поле которых находится в правом зрительном поле, поступают в левое полушарие мозга, а аксоны от левого зрительного поля — в правое.

Мы не воспринимаем правое и левое поля зрения по отдельности частично благодаря структурам среднего мозга, но в еще большей степени благодаря *мозолистому телу* — скоплению очень большого числа аксонов, по которым осуществляется связь между двумя полушариями. Захватывающие опыты Сперри и его сотрудников показывают, что если мозг «расщепить» на две части, перерезав мозолистое тело и другие комиссуры, то животное начинает вести себя так, как будто у него два самостоятельных представления о внешнем мире, соответствующих каждому полушарию. Человек с расщепленным мозгом может левым полушарием решить почитать газету, но в это же время правое полушарие может скомандовать положить газету на стол!

Переходя к рис. 16, мы получим наконец возможность ответить на животрепещущий вопрос: «А относительно чего латеральное коленчатое тело является латеральным?» Оказывается, оно латерально относительно медиального коленчатого тела, играющего для слуха такую же роль, какую латеральное коленчатое тело играет для зрения в том смысле, что это последняя «промежуточная станция» на пути к слуховой коре. Верхнее двуххолмие называется так просто потому, что оно расположено над нижним двуххолмием. Перекрестные входы в клетки верхней оливы позволяют им объединять информацию от обеих ушей, определяя пространственное расположение источника звука. Оказалось, что проекция нервных волокон на слуховую кору частично тонотипична, т. е. что место назначения этих волокон определяется тоном, или высотой звука, но обнаружение «детек-

торов мяуканья» и «детекторов щелчков» в слуховой коре головного мозга кошки усложнило картину. Слуховые рецепторы соединены также и с верхним двухолмием, в результате чего не-

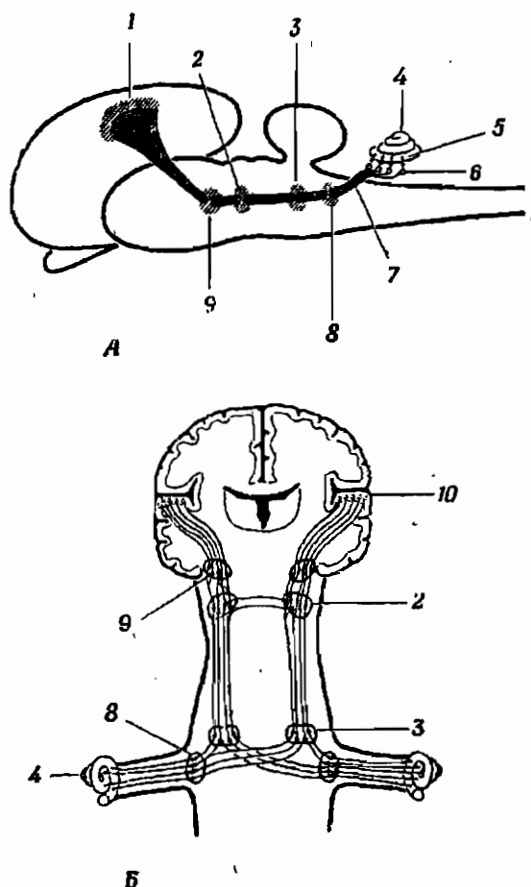


Рис. 16. Схема строения слуховой системы.

А. Вид сбоку. Б. Фронтальный разрез. 1 — слуховая кора; 2 — нижнее двухолмие; 3 — верхняя олива; 4 — улитка; 5 — волосковые клетки; 6 — спиральный ганглий; 7 — слуховой нерв; 8 — кохлеарное ядро; 9 — медиальное коленчатое тело; 10 — слуховая кора в верхней височной извилине.

ожиданный шум может заставить зрительную систему заинтересоваться его источником. (На самом деле верхнее двухолмие связано с рецепторами всех органов чувств.) Подробным разбором слуховой системы мы в этой книге заниматься не будем и рекомендуем заинтересовавшемуся читателю обратиться к книге Уайтфилда [255] «Слуховые пути».

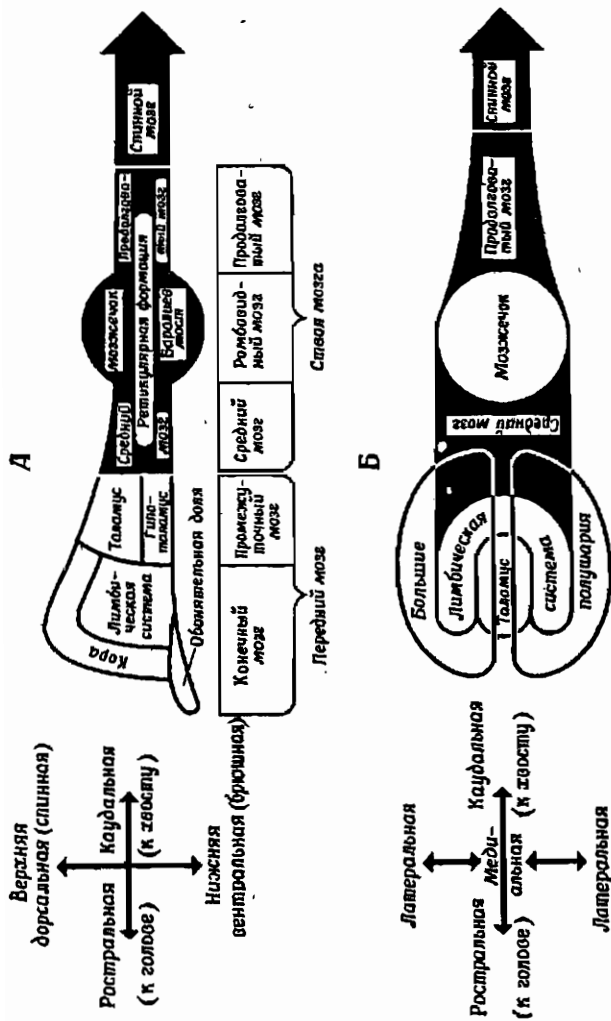


Рис. 17. Схема строения центральной нервной системы животного, не относящегося к млекопитающим.  
 А. Вид сбоку. Б. Вид сверху.

В завершение этого раздела повторим еще раз то, что нам известно о разных отделах мозга, центральной нервной системы, используя для этого схему, приведенную на рис. 17 (рис. 18 позволит убедиться, сколь различно соотношение отдельных частей мозга у разных животных). В направлении от «головы» к «хвосту» нервная система делится на три основных раздела:

1) *передний мозг*, к которому относится конечный мозг и промежуточный мозг;

2) *ствол мозга*, к которому относится *средний мозг*, *варолиев мост* (но не мозжечок) и *продолговатый мозг*;

3) *спинной мозг*, где замыкаются рефлексорные дуги, а также проходят пути, по которым осуществляется связь сегментов спинного мозга между собой и с другими областями мозга.

Спинным мозгом мы займемся в разд. 5.1, а затем в разд. 5.2 рассмотрим устройство его основных двигательных механизмов. Остаток же этого раздела мы посвятим беглому обзору основных подразделов переднего мозга и ствола.

*Конечный мозг*, или *телэнцефалон* (от греч. *телос* — конец и *энкефалос* — мозг), образует у позвоночных самый передний отдел мозга. К нему относятся *большие полушария*, которые у млекопитающих резко увеличены в результате образования *новой коры*, или *неокортекса* (от лат. *кортекс* — кора). Полушария и доли мозга тесно связаны волокнами между собой и со средним мозгом многочисленными волокнами.

*Лимбическая система* лежит на границе между большими полушариями и стволом мозга. Эта система мультимодальна в том смысле, что в ней происходит объединение информации, поступающей от разных чувств; она играет особенно важную роль в поведении, направленном на выживание отдельной особи и вида в целом (т. е. в питании, чувстве опасности, агрессивности и размножении); причем ее реакции опосредуются через низшие центры промежуточного мозга. К лимбической системе относятся *аммонов рог* и *миндалевидные ядра*. Ее деятельность тесно связана с работой внутренних органов, физиологией эмоций и восприятием обонятельных стимулов (эту последнюю ее функцию иногда незаслуженно переоценивают, называя этот отдел обонятельным мозгом).

Обонятельные нейроны очень сходны с эпителиальными клетками, но образуют синапсы на *обонятельных луковицах*; отсюда сигналы направляются в обонятельную долю по *обонятельному тракту*.

На поперечном разрезе полушария головного мозга видно, что кора (т. е. поверхностный слой) состоит из *серого вещества* (т. е. в основном из тел клеток), а внутренние области мозга содержат как *белое вещество* (т. е. в основном аксоны), так и четко ограниченные участки серого вещества, расположенные

у основания полушарий. Те из них, которые содержатся в переднем мозге, называются *базальными ядрами* и играют важную роль в управлении движением (разд. 5.2). Другие участки серого вещества — *таламус* и *гипоталамус* — расположены в промежуточном мозге, к рассмотрению которого мы сейчас и перейдем.

*Промежуточный мозг*, или *диэнцефалон*, состоит из *таламуса* и *гипоталамуса*. В некоторых областях таламуса происходит обработка сенсорной информации на пути к коре головного мозга; сюда же приходят аксоны из некоторых областей коры. Одна область дорсального таламуса преобразует моторные стимулы, посылаемые к мышцам, в результате чего сигналы, попадающие в нижележащие нервные клетки, вызывают организованную реакцию. *Медиальное* и *латеральное коленчатые тела*, о роли которых в обработке зрительной и слуховой информации мы уже говорили, также относятся к таламусу.

*Гипоталамус* контролирует биохимические процессы, происходящие в организме; он регулирует солевой обмен, кровяное давление, дыхательные процессы, температуру тела, водный баланс, чувство голода и насыщения, эндокринную систему и вкупе с лимбической системой играет решающую роль в эмоциональном и мотивационном поведении человека.

Перейдем теперь к стволу мозга и мозжечку.

*Средний мозг*, или *мезэнцефалон*, регулирует зрительные и слуховые рефлексы, а также общедвигательные рефлексы. Он содержит многочисленные восходящие и нисходящие пути, имеющие отношение к соматосенсорной и примитивной моторной системам. Здесь находится также так называемая *ретикулярная формация* с комплексами нейронов, обеспечивающими компенсацию силы тяжести, гомеостаз и чередование сна и бодрствования.

К *заднему мозгу* относятся *варолиев мост* и *мозжечок*, а также многие восходящие и нисходящие пути. Отсюда отходят волокна к коре мозжечка, идущие *контралатерально*<sup>1</sup> и передающие информацию о характере импульсов, посылаемых к нижележащим мотонейронам спинного мозга. *Варолиев мост* содержит также ядра черепно-мозговых нервов, ретикулярные ядра и восходящие (сенсорные) и нисходящие (примитивные двигательные) системы волокон. *Мозжечок* посылает сигналы как в высшие, так и в низшие центры, поддерживает тонус определенных групп мышц и осуществляет регуляцию мышц-синерги-

<sup>1</sup> Волокна, начинающиеся по одну сторону срединной плоскости и распространяющиеся на другую (противоположную) сторону тела. Аналогично *ипсилатеральными* называют волокна, остающиеся на всем своем протяжении по одну сторону срединной плоскости.

стов и антагонистов, что обеспечивает координацию движений. Это, возможно, достигается благодаря связям с ретикулярной формацией среднего мозга и проекциям на сенсомоторную кору,

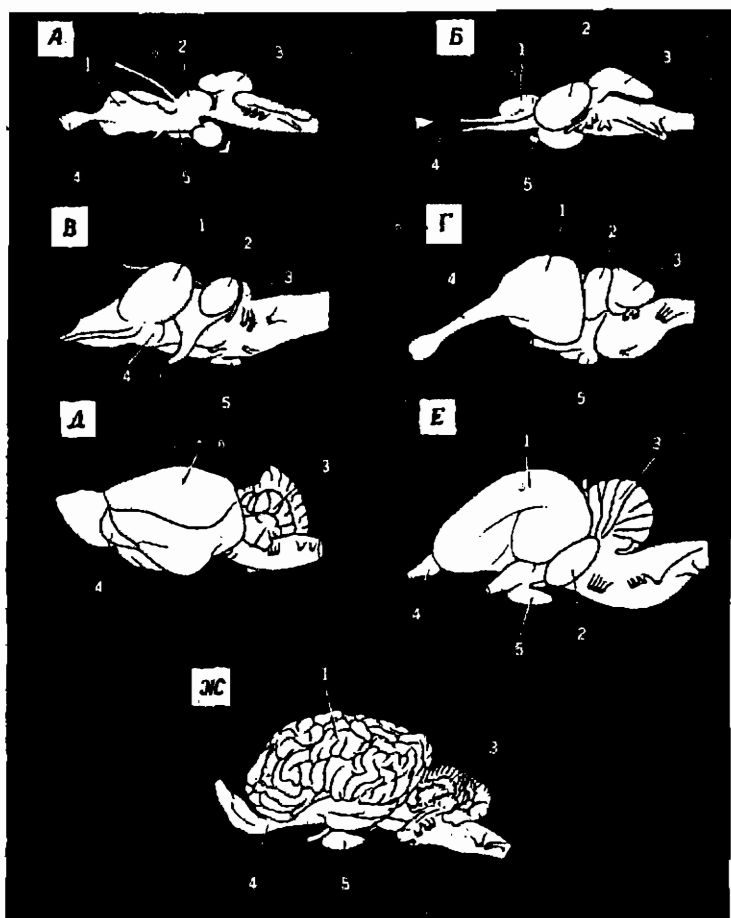


Рис. 18. Схемы строения мозга у разных животных (вид сбоку).

А. Акула. Б. Треска. В. Лигустка. Г. Крокодил. Д. Прimitивное млекопитающее. Е. Гусь.  
Ж. Лошадь.

1—головной мозг; 2—зрительная доля; 3—мозжечок; 4—обонятельная доля; 5—гипофиз.

идущим через таламус; через эти проекции мозжечок оказывает влияние на регуляцию последовательности двигательных актов, осуществляемую корой.

Продолговатый является как бы продолжением спинного мозга в черепе. Он играет важную роль в регуляции



сердечно-сосудистой системы, дыхания, пищеварения и в поддержании равновесия. Системы длинных нисходящих и восходящих путей проходят и через продолговатый мозг. Пучки восходящих сенсорных волокон, берущие частично свое начало в спинном мозге, передают информацию о взаиморасположении различных частей тела и мышечном тоне в мозжечок.

Заканчивая этот беглый обзор, напомним еще раз, что разные животные могут отличаться по строению мозга не в меньшей степени, чем они отличаются по внешнему виду. Некоторое представление о разнообразии строения мозга дает рис. 18, в еще большей степени в этом можно убедиться при сравнении зрительных систем лягушки и кошки, которому посвящен следующий раздел.

#### 2.4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ЗРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ У КОШКИ И ЛЯГУШКИ

Эттив [18] отмечает, что, располагая некоторой априорной информацией о какой-либо совокупности «сообщений», можно использовать эту информацию для экономного описания этого множества, недоступного в противном случае. Например, если бы любые сочетания черных и белых точек образовывали одинаково информативные для зрительного восприятия картинки в повседневной жизни, то не существовало бы более экономичного способа представления увиденного, чем описание интенсивности освещения каждой точки мозаичного зрительного поля. Однако, как свидетельствует успех карикатур, большой объем зрительной информации можно передать с помощью нескольких контурных линий. Более того, эти контуры обычно можно очертить с помощью относительно небольшого числа штрихов. Торчащие в разные стороны волоски на спине кошки, нарушающие ее плавный изгиб, несущественны для нашего узнавания очертаний кошки, хотя само распознавание «текстуры» шкурки и может дополнить наше восприятие. Основываясь на этих соображениях, Эттив высказал предположение, что в распознавании формы наиболее важную роль играют те точки, в которых контурные линии меняют свое направление или обрываются. Например, он построил рис. 19, найдя на контуре изображения спины кошки 38 точек максимальной кривизны и соединив соответствующие точки прямыми.

Однако он не рассматривал вопрос о том, как выяснить, какие пары точек нужно соединить между собой. Простое решение этой проблемы показано на рис. 20: надо, по-видимому, не просто отмечать точки максимальной кривизны (А), ибо это может привести к неправильным соединениям (В), но дополнить

их данными об углах (В), что позволит получить правильное решение (Г).

Все это позволяет считать, что полезная схема предварительной обработки зрительных стимулов может слагаться из двух

Рис. 19. Спящая кошка Эттивя.

Этот рисунок, на котором легко узнать кошку, получен в результате замычки естественных контуров прямыми, соединяющими точки максимальной кривизны.



этапов: 1) сведение картины распределения света и тени к выделению основных контуров; 2) переход от контурных линий к измерению углов в точках изменения направления контура.

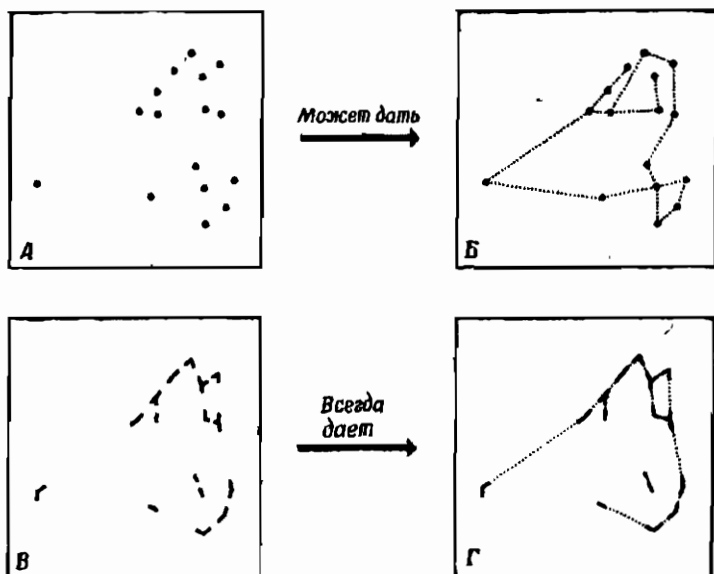


Рис. 20. О пользе информации об углах.

Барлоу [20] подошел к проблеме предварительной обработки зрительной информации на основе более строгих нейрофизиологических соображений. Считая, что рецепторы играют роль датчиков, преобразующих энергию внешней среды, скажем,

в частоту возбуждения аксонов, он задал себе вопрос: а как последующие уровни обработки (рис. 21) могли бы, используя закономерности, характерные для обычной среды, регистрировать входные сигналы таким образом, чтобы «минимизировать транспорт импульсов по нервным путям», т. е. обеспечить ситуацию, при которой активность нейрона отклоняется от уровня покоя только в том случае, когда необходимо сообщить животному о некотором потенциально важном для него свойстве внешней среды? Как отметил Барлоу [21], работы Эттнива наводят на мысль, что подходящий набор устройств предварительной обработки выделяет точки максимальной кривизны, а наше рассмотрение проблемы соединения таких точек подсказывает, что для соответствующих областей потребуются и детекторы угла.



Рис. 21. Схема организации предварительной обработки зрительного образа. Рецепторы преобразуют распределение интенсивности света в градуальные изменения мембранного потенциала. Следующие за ними слои нейронов обеспечивают предварительную обработку этих потенциалов и кодируют то, что видит глаз, в форме пространственно-временной структуры спайков, поступающей в мозг.

Для того чтобы конкретизировать эти общие соображения, полезно сопоставить зрительные системы кошки и лягушки. У всех позвоночных, будь то лягушка, кошка или человек, свет попадает в глаз через хрусталик и направляется к задней стенке глаза; пройдя через несколько слоев прозрачных клеток сетчатки, он наконец попадает на колбочки и палочки (рис. 22). При достаточной интенсивности света в палочках и колбочках возникает генераторный потенциал, вызывающий импульсы в аксонах ганглиозных клеток через посредство вставочных нейронов, аксоны которых образуют синапсы с дендритами этих клеток. Зрительные волокна — это аксоны ганглиозных клеток, которые, пересекая сетчатку, собираются в области, называемой слепым пятном; здесь они образуют зрительный нерв, который направляется в мозг.

Поскольку, как мы более подробно покажем ниже, выходные сигналы ганглиозных клеток резко отличаются от кодированных сигналов об интенсивности светового потока, генерируемых рецепторами, можно утверждать, что в сетчатке происходит *предварительная обработка* зрительных стимулов. Напомним главные моменты анатомии зрительной системы млекопитающих

(разд. 2.3), например человека и кошки. Прошедшие предварительную обработку сообщения посылаются в латеральное колленчатое тело (рис. 23, А) — «промежуточную станцию» зрительного тракта в таламусе, — а после дальнейшей обработки в раз-

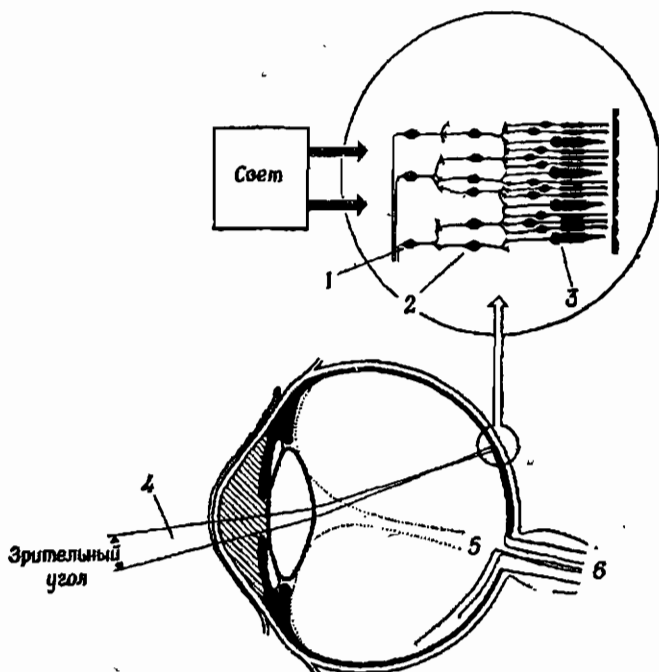


Рис. 22. Схема, показывающая, как хрусталик осуществляет фокусировку света на сетчатку.

Увеличенное изображение фрагмента сетчатки (вверху) показывает, как пучок света проходит к задней стенке сетчатки, возбуждая палочки и колбочки (3), а те в свою очередь возбуждают вставочные нейроны (2), управляющие одной из ганглиозных клеток (1). Проследив ход световых лучей в обратном направлении от рецепторов, воздействующих на определенную ганглиозную клетку, и через хрусталик, можно найти участок внешней среды — рецептивное поле данной клетки (4), освещенность которого влияет на характер импульсации этой клетки. Аксоны ганглиозных клеток проходят через сетчатку и, собираясь вместе в слепом пятне (5), образуют зрительный нерв (6), идущий в мозг.

личные клетки коры, где происходит распознавание образов, тогда как сигналы, идущие по дополнительным (но более древним с эволюционной точки зрения) каналам используются механизмами ориентации (например, поворота головы и туловища), расположенными в верхнем двухолмии (разд. 5.4).

У лягушки (рис. 23, Б) зрительные нервы идут от сетчатки назад, в основном к зрительному бугру. Стрелки показывают, как зрительные стимулы проецируются на зрительный бугор,

который у лягушек в отличие от млекопитающих играет главную роль в распознавании образов («Как связать единое целое?») и в ориентации («Где находится?»). Анатомическое сходство верхнего двуххолмия *млекопитающих* со зрительным бугром лягушки, возможно, свидетельствует о некотором сходстве функций этих структур, но, как станет ясно ниже, это не указывает на их полную функциональную идентичность.

*Рецептивное поле* ганглиозной клетки (у кошки или у лягушки) — это область зрительного поля, раздражение которой может влиять на активность данной ганглиозной клетки. Как показано на рис. 22, рецептивное поле представляет собой пространственный конус, в пределах которого свет попадает на те колбочки и палочки, которые возбуждают вставочный нейрон, управляющий данной ганглиозной клеткой. Тем самым зрительный угол рецептивного поля определяется величиной угла при вершине этого конуса.

Каков характер световой картины, на которую реагирует ганглиозная клетка? Другими словами, какая картина вызывает максимальное возбуждение этой клетки? Как это ни удивительно, но, хотя строение сетчатки у всех позвоночных в основном одинаково и соответствует схеме на рис. 22, функции ганглиозных клеток сильно различаются у разных видов. Например, Леттвин, Матурана, Мак-Каллок и Питтс [150] выяснили, что большая часть ганглиозных клеток лягушек принадлежит к одному из четырех типов, например к «детекторам движения» или к «детекторам закругленного края», а у кошек ганглиозных клеток ни одного из этих типов нет вовсе, а есть «устройства для усиления контраста». Надо сказать, что это вполне согласуется с нашим принципом деенаправленного восприятия. У лягушки, в поведении которой зрительная информация играет незначительную роль, если не считать схватывания «вихляющихся» объектов и бегства от «врагов», сетчатка «отбрасывает» большинство аспектов зрительных образов, не связанных с этими чертами, тогда как кошка с ее гораздо более сложным поведением (например, пристальное наблюдение за мышиной норой и выбор момента для прыжка только после того, как мышь достаточно далеко высунется из норы) не могла бы существовать, если бы ее сетчатка была так сильно специализирована. Проанализируем эксперименты по предварительной обработке зрительной информации более тщательно.

Обычно лягушка не двигает глазами, за исключением тех случаев, когда ей необходимо компенсировать движения головы и туловища (например, если она сидит на качающемся листе кувшинки) для стабилизации изображения на сетчатке. Поэтому, хотя лягушки обнаруживают свою добычу исключительно благодаря зрению, они не следят за добычей и не сканируют

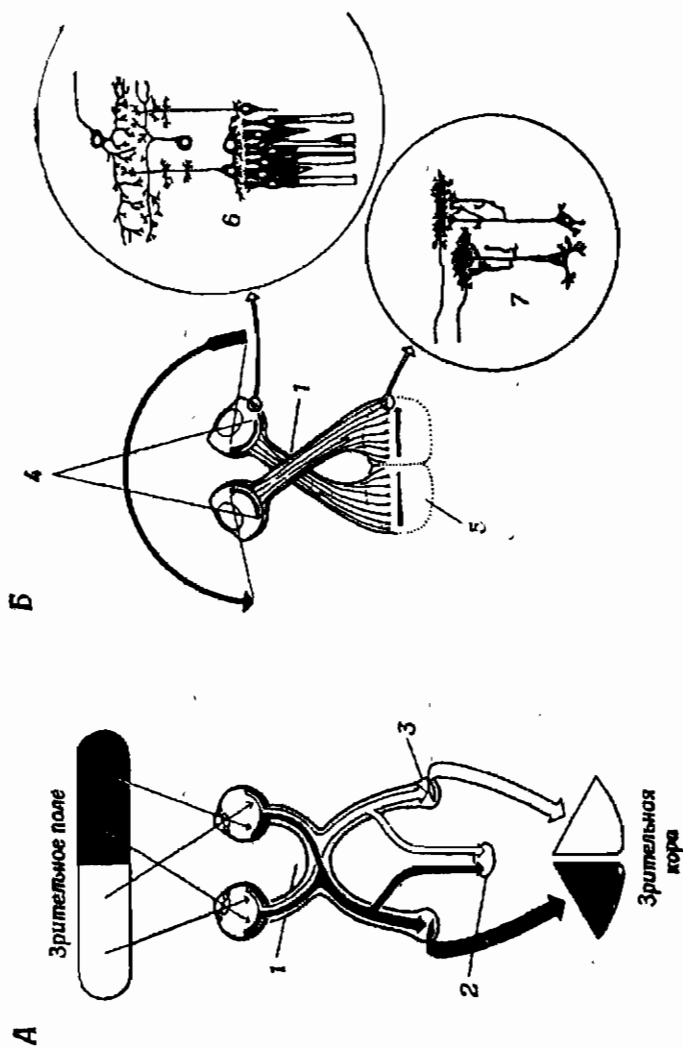


Рис. 23. Сравнительный анализ зрительной системы человека (А) и лягушки (Б). У человека большинство сообщений проходит через ядро латерального колленчатого тела таламуса в кору головного мозга, и лишь немногие из них попадают в верхнее дугообразное тело. У лягушки же преобладают связи со зрительным бугром (ниже верхнего дугообразного тела млекопитающих). Отметим также отчетливое разделение зрительного поля человека на две части, совершенно отсутствующее у лягушки. 1 — глаз; 2 — верхнее дугообразное тело; 3 — латеральное колленчатое тело; 4 — глазные яблоки; 5 — зрительный бугор; 6 — зрительный перекрест; 7 — нейроны зрительного бугра лягушки.

зрительное поле в поисках объектов, представляющих для них интерес. Они охотятся лишь за движущимися насекомыми, а неподвижные объекты не привлекают их внимания. Появление большого движущегося объекта вызывает у них реакцию бегства в наиболее затемненную часть окружающего пространства, а так как лягушка одинаково хорошо чувствует себя и в воде, и на суше, то выбор пункта конечного назначения побега не представляется существенным. Для лягушек неподвижный предмет с поведенческой точки зрения лишен смысла. По-видимому, они узнают добычу и схватывают ее, выбирая среди других объектов окружающей среды на основании ряда признаков, таких, как движение, определенные размеры, контрастность, а может быть, также и окраска. Поэтому на дергающуюся лапку другой лягушки, которая решила почесать себе спинку, они реагируют как на летящую муху, но они никогда не схватывают мертвую муху, даже погибая от голода. Способность лягушки распознавать свою добычу и схватывать ее не изменяется при изменении внешней обстановки, например освещенности. В их поведении главную роль играют слух, осязание и обоняние.

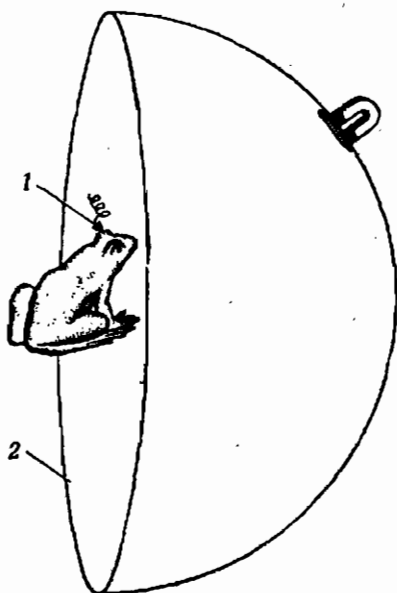
Леттвин, Матурана, Мак-Каллок и Питтс [150] исследовали зрительную систему лягушки с целью выявить те ее свойства, которые помогают лягушке узнавать свою добычу и врагов. В отличие от Хартлайна [106], разбившего все ганглиозные клетки на три класса в зависимости от их реакции на маленькое световое пятно в соответствующем рецептивном поле, Леттвин и др. обратили внимание на то, что световое пятно не служит таким естественным стимулом для лягушки, как муха или червяк (если только она не питается светлячками), и постарались установить более «натуральные» функции ганглиозных клеток, изучая их реакцию на естественные объекты. Они исходили из того, что поведение лягушки требует, по-видимому, существования каких-то функциональных инвариантов в активности компонентов ее зрительной системы, с тем чтобы сетчатка в результате обработки зрительного образа могла выделять его важные черты, например присутствие добычи или опасности.

Здесь мы расскажем о тех зрительных коррелятах активности, передаваемой ганглиозными клетками в зрительный бугор, которые им удалось обнаружить. Позже в разд. 7.2 мы вернемся к этим данным для того, чтобы построить модель преобразования активности в зрительном бугре лягушки в действие, т. е. на основе теории «что глаз лягушки говорит ее мозгу» мы построим гипотезу о том, «что глаз лягушки говорит самой лягушке». Леттвин и др. работали на обычной американской лягушке *Rana pipiens*. Лягушку помещали в экспериментальную установку так, чтобы один ее глаз оказался в центре полушария (рис. 24)

диаметром 35,5 см (при этом  $1^\circ$  зрительного угла соответствовала дуга длиной 3 мм), составлявшего зрительное поле. В голову лягушке вживляли электрод, который регистрировал активность либо единичной ганглиозной клетки (для этого кончик электрода помещали на аксон этой клетки в зрительном нерве), либо одной из клеток зрительного бугра. Алюминиевое полушарие охватывало примерно две трети зрительного поля одного глаза лягушки. Расположив животное соответствующим образом, можно

Рис. 24. Магнит на внешней поверхности алюминиевого полушария (2) позволяет экспериментатору перемещать зрительные стимулы по внутренней поверхности полусферы.

Реакцию лягушки на эти стимулы можно снимать с помощью микроэлектродов (1), вживленных в зрительный нерв или зрительный бугор.



получить возможность перекрыть любую часть зрительного поля и полностью контролировать рецептивное поле изучаемых клеток. Стимулирующие объекты перемещали по внутренней поверхности полушария с помощью магнита, двигавшегося по внешней поверхности. В опытах использовались самые разнообразные объекты, например, темные диски, темные полоски и темные квадраты.

Оказалось, что по своей реакции ганглиозные клетки распадаются на четыре типа (возможно, имеется и пятый тип, но о нем мы здесь говорить не будем). Каждая ганглиозная клетка принадлежит только к одному из этих типов, а клетки каждого типа равномерно распределены по сетчатке. На любом небольшом участке сетчатки можно найти клетки всех четырех типов в соотношении, соответствующем их общему соотношению в сетчатке в целом. Так, клетки типов I и II встречаются в 30 раз чаще клеток типов III и IV.



**Тип I** — детекторы границы (угловые размеры рецептивного поля 2—4°). Реагируют на границу между светлыми и темными участками, попадающую в рецептивное поле, независимо от ориентации границы, но при условии, что она достаточно резкая. При этом скорее всего измеряется резкость границы, а не степень контраста между соседними участками. Реакция усиливается, если границу сдвинуть, и практически не изменяется, если менять освещенность в очень широких пределах. Если в рецептивное поле такая граница не попала, то изменение освещения поля, каким бы резким оно ни было, не вызовет никакой реакции. Еще одно свойство клеток типа I заключается в том, что если границу внести в рецепторное поле в полной темноте, а затем включить свет, то продолжительная реакция возникает лишь с некоторым запозданием.

**Тип II** — детекторы движущегося закругленного края, или детекторы насекомых (угловые размеры рецептивного поля 3—5°). Реагируют также лишь на резкую границу между светлым и темным, но только при дополнительных условиях: граница должна быть изогнута и притом так, чтобы более темная область была выпуклой и чтобы граница двигалась. Как и в первом случае, реакция клетки не меняется от изменения освещенности поля в широких пределах, соответствующих, грубо говоря, изменениям освещения от сумеречного до полуденного. В одном интересном опыте в рецептивное поле помещали большую цветную фотографию естественного места обитания лягушек с цветами и травой. Покачивание этой фотографии в рецептивном поле волокна клетки типа II не вызвало никакой реакции. Когда на фоне этой картинки перемещали предмет, похожий на муху, то лягушка бурно реагировала, если же этот предмет покачивали вместе с фотографией, то это ни к чему не приводило.

**Тип III** — детекторы движущейся границы (угловые размеры рецептивного поля 7—11°). Эти клетки в широком диапазоне изменения освещенности одинаково реагируют на один и тот же силуэт, движущийся с одной и той же скоростью на одинаковом фоне. Их реакция непродолжительна, и они возбуждаются лишь в том случае, если граница изменяется или перемещается. Реакция выражена тем сильнее (частота ее тем выше), чем резче граница и чем быстрее она движется.

**Тип IV** — детекторы затемнения (угловые размеры рецептивного поля 15°). Реагируют на любое снижение освещенности поля в целом с учетом расстояния до центра этого поля. Границы не оказывают на реакцию этих клеток никакого влияния. Одинаковое относительное снижение вызывает одинаковую реакцию, более или менее не зависящую от исходного уровня освещенности. Продолжительность реакции увеличивается, если ка-

кой-либо большой темный предмет останавливается в пределах поля.

Аксоны детекторов каждой группы оканчиваются в разных слоях зрительного бугра. Каждый из этих четырех слоев окончаний в зрительном бугре образует «непрерывную» карту сет-

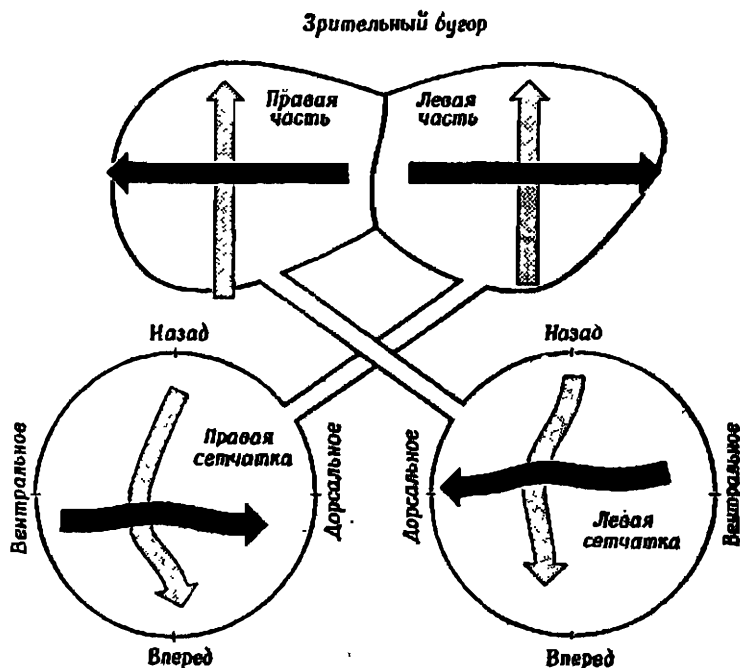


Рис. 25. Ретино-тектальная проекция у взрослой жабы, показывающая, как некое направление движения, регистрируемое сетчаткой, отображается в соответствующее направление в зрительном бугре.

чатки применительно к операциям, выполняемым соответствующими ганглиозными клетками. Эти четыре слоя регистрируют приходящую информацию, причем точки, относящиеся к различным слоям и лежащие в зрительном бугре друг над другом, соответствуют одному и тому же небольшому участку сетчатки (рис. 25).

Таким образом, функция сетчатки лягушки состоит не в том, чтобы передавать информацию о поточечном распределении света и тени в рассматриваемом образе; ее главная функция — анализ этого образа в каждой точке в поисках четырех различных качественных признаков (границ, движущегося закругленного края, движущейся границы и локального затемнения) и

передача этой информации в зрительный бугор, где она распределяется между четырьмя слоями нервных окончаний.

Это означает ([150], стр. 1950), что «глаз общается с мозгом на языке, который уже подвергся некоторой организации и переработке, а не просто передает более или менее точную копию распределения света на рецепторах». Более того, используемое при этом кодирование помогает лягушке находить пищу и избегать врагов, т. е. распознавать универсали «добыча» и «враг». Эту мысль можно найти в заключительном абзаце (там же, стр. 1951) статьи Леттвина и др., который я позволю себе процитировать:

«Таким образом, эти операции гораздо больше напоминают восприятие, чем ощущение, если в настоящее время имеет смысл проводить между ними различие. Иными словами, эти операции удобнее всего описывать на языке сложных абстракций зрительных образов. Нам казалось, например, весьма соблазнительным назвать детектор закругленного края «детектором насекомых». Соответствующее волокно (типа II) реагирует на более интенсивно, когда в его рецептивное поле входит темный объект, меньший, чем это поле, останавливается, а затем начинает метаться из стороны в сторону. На реакцию волокна не влияет изменение освещения, не перемещение фона (например, картинки с изображением травы и цветов). Если же в рецептивное поле попадает только фон, движущийся или неподвижный, то никакой реакции не наблюдается. Так можно ли лучше описать систему, предназначенную для обнаружения насекомых, находящихся в пределах досягаемости?»

Перейдя от ганглиозных клеток к клеткам зрительного бугра, Леттвин и его сотрудники обнаружили и там клетки нескольких разных типов. Им не удалось сколько-нибудь удовлетворительно установить функции клеток разных типов, однако они выделили нейроны двух крайних типов, названные «нейронами новизны» и «нейронами постоянства». Функция первых состоит, по-видимому, в том, чтобы обнаруживать новое и подмечать зрительные события, а вторые обеспечивают непрерывное слежение за интересным объектом, попавшим в поле зрения. Нейроны по крайней мере одного из этих двух типов посылают аксоны обратно в сетчатку и оказывают существенное влияние на активность ганглиозных клеток.

Сравним теперь систему предварительной обработки зрительной информации у лягушки с аналогичной системой у кошки. При этом мы воспользуемся работой Хьюбела и Визеля, посвященной зрительной системе кошки. У кошки возбуждение от рецепторов передается различным вставочным нейронам. В свою очередь биполярные вставочные нейроны возбуждают ганглиозные клетки сетчатки, а тормозное воздействие, по-види-

тому, осуществляют вставочные нейроны другого типа, называемые *горизонтальными клетками*. Таким образом, на каждую ганглиозную клетку воздействует целая система рецепторных клеток. Как установил Каффлер, у кошки рецептивные поля

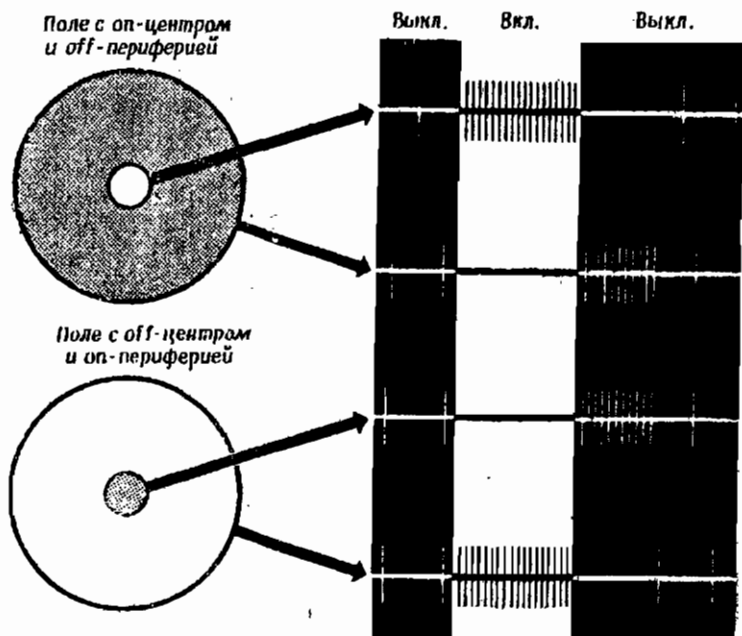


Рис. 26. Реакции двух типов ганглиозных клеток кошки.

Верхняя схема изображает клетку с возбудительной центральной областью (оп-центром) и тормозной периферией (off-периферией), а нижняя — с тормозной центральной областью и возбудительной периферией. Справа показаны типичные записи импульсов, которые можно получить при экспериментах на таких клетках. Первый участок соответствует низкочастотному спонтанному возбуждению такой клетки в результате продолжительного пребывания в темноте, следующий — записи, полученной при появлении в указанной области рецептивного поля небольшого источника света. Например, для клетки с оп-центром появление источника света в центральной области поля резко повышает частоту импульсов, а появление этого же источника на периферии столь же резко снижает эту частоту. Наконец, правый участок дает представление о преходящих изменениях частоты импульсов, возникающих сразу после выключения света и предшествующих возвращению к норме.

ганглиозных клеток сетчатки в первом приближении имеют форму диска с двумя различными областями (рис. 26). Колбочки и палочки, воздействующие через посредство вставочных нейронов на центральную область, обычно оказывают возбудительное влияние, т. е. повышение интенсивности света, падающего на колбочки или палочки, связанные с этой центральной зоной, повышает частоту импульсов этой клетки; напротив, связь между рецепторами и периферической областью поля организованы так, что усиление интенсивности падающего на эти

рецепторы света вызывает снижение активности ганглиозной клетки. При этом эффективность синапсов по всему рецептивному полю такова, что если равномерно осветить все это поле, то возбуждение, создаваемое центральной областью, незначительно превысит торможение, создаваемое периферической областью, и в результате в клетке возникнет слабая спонтанная импульсация, несущая информацию об интенсивности такого равномерного освещения<sup>1</sup>. Имеются также и клетки, у которых центральная область рецептивного поля является тормозной, а периферическая — возбуждательной.

Весьма упрощенный пример ясно покажет, как свойства нервной ткани, описанные в разд. 2.2, дают возможность простому нейрону за счет одной геометрии дендритного ветвления вычислять некоторые полезные функции. Прежде всего мы построим модель нейрона, который может обнаруживать последовательность входных сигналов с заданными временными соотношениями (рис. 27), а затем изучим клетку типа ганглиозной клетки кошки, выполняющей роль «детектора контраста». Сначала рассмотрим нейрон с четырьмя дендритами (ср. [209], стр. 90); каждый дендрит образует по одному синапсу со зрительным рецептором, причем синапсы I—IV расположены на все возрастающем расстоянии от аксонного холмика этой клетки (рис. 27).

Предположим, что каждый рецептор реагирует на проходящее над его поверхностью световое пятно возбуждением генераторного потенциала, создающего в постсинаптической мембране деполяризацию, динамика которой показана на рис. 27, А и которая накладывается на потенциал покоя. Эта деполяризация распространяется пассивно, и чем на большее расстояние она передается, тем позже возникает пик и тем он меньше (рис. 27, Б). Эффект возбуждения синапса IV проявляется в аксонном холмике позже и в меньшей степени, чем возбуждение синапсов I, II или III. Рассмотрим теперь, к чему это приводит. Если все входные возбуждения приходят в синапсы I—IV одновременно, то их воздействие на аксонный холмик можно приближенно представить суммой индивидуальных эффектов (рис. 27, В). Пусть этот суммарный эффект меньше порога, необходимого для того, чтобы вызвать появление спайка. Создается впечатление, что такая клетка вообще бесполезна,

<sup>1</sup> Между прочим, Хьюбел и Визель обнаружили, что у обезьян наряду с колбочками и палочками, чувствительными к разным цветам и максимально реагирующими одни на красный, другие на зеленый, а третьи на синий цвет, имеются еще и ганглиозные клетки, способные обнаруживать границы между участками разного цвета (например, зеленый кружок на красном поле). Однако здесь мы будем рассматривать лишь монохроматический свет.

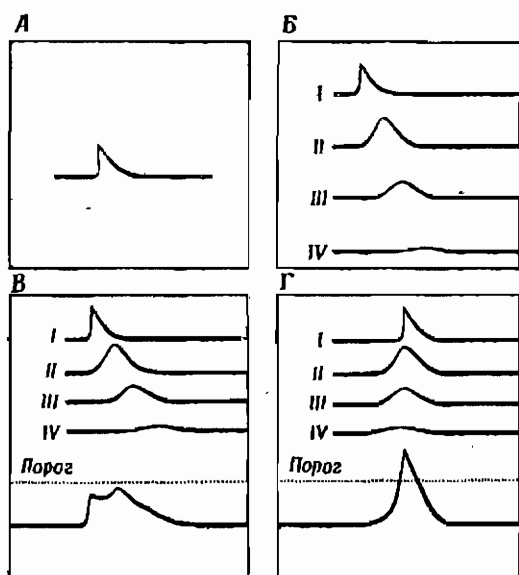
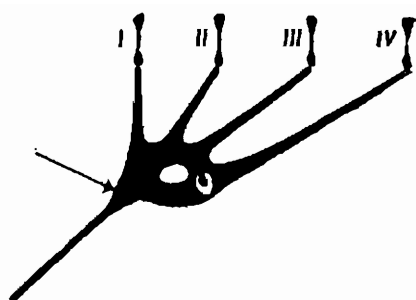


Рис. 27. Модель нейрона, способного выполнять функции детектора движения.

Изменение потенциала (А), происходящее в синапсе, постепенно затухает, а его пик запаздывает тем больше, чем больше расстояние ему нужно пройти (Б). Поэтому если все четыре стимула приходят на синапсы I—IV одновременно, то их суммарный эффект в аксонном холмике (стрелка) не достигает порогового (В). Но если эти синапсы возбуждаются в последовательности IV—III—II—I, так что их пики достигают аксонного холмике одновременно, то суммарный эффект оказывается выше порога (Г).

поскольку она не реагирует на то, что на первый взгляд кажется максимальным стимулированием, а именно — на одновременное раздражение всех ее четырех входов. Однако, если входной сигнал попадает на вход IV раньше, чем на вход III, а на вход III раньше, чем на вход II, и т. д. и при этом интервалы между входными сигналами будут такими, что пики всех четырех входных воздействий придут в аксонный холмик одновременно, их суммарный эффект может оказаться существенно больше порога (рис. 27, Г). А это значит, что наша клетка, несмотря на ее крайнюю простоту, может распознавать направленные движения относительно ее входов.

Если представить себе теперь, что к синапсам подходят аксоны фоторецепторов, которые реагируют на пересечение их рецептивного поля светящейся точкой возбуждением генераторного потенциала, то наша ганглиозная клетка будет реагировать лишь в том случае, если эта точка движется справа налево и если скорость этого движения не выходит за известные пределы. Эта клетка не будет реагировать на неподвижный объект или на объект, движущийся слева направо. Таким образом, геометрия клетки может иметь огромное значение для ее функционирования. В рассмотренном примере предпочтение, отдаваемое определенному направлению движения, достигается за счет асимметрии расположения дендритов на теле клетки. Здесь открывается целая область исследований: изучение взаимосвязи между функциями и формой нейронов (обзор работ по этому вопросу см. [209]). И если вспомнить, что на многих нейронах в мозгу человека образуется до 10 000 синапсов, то потенциальное разнообразие функций таких нейронов может показаться нам в зависимости от настроения либо весьма вдохновляющим, либо обескураживающим. Как сказал об этом Баллок, «нейроны — как люди». Социология иногда может быть источником удачных метафор для теории мозга и наоборот.

Рассматривая зрительный мир животного, можно заметить, что наиболее важная зрительная информация связана с изменениями, как пространственными, так и временными. (Вспомните в связи с этим успех дружеских шаржей<sup>1</sup> или о том, как привлекают наше внимание движущиеся предметы.) Соответственно, многие процессы «предварительной обработки» на первых уровнях сенсорной системы направлены как раз на усиление пространственных и временных контрастов, реагируя наиболее сильно на изменения, происходящие в рецептивном поле во времени, или на пространственные изменения в зрительном поле. Познакомившись выше с детектором движущегося свето-

<sup>1</sup> Однако не следует забывать, что мы всегда отличаем шарж от реальности.

вого пятна, рассмотрим теперь детектор пространственных изменений, аналогичный по своим свойствам одной из ганглиозных клеток сетчатки кошки, о которой мы уже упоминали.

Вообще говоря, нам не важно, чтобы освещенность точек *A*, *B*, *B* и *Г* была в точности такая, как показано на рис. 28; важно лишь, что при переходе от точки *B* к точке *Г* освещение резко меняется. Приведем теперь еще один пример «нейрональной конструкции», используя на этот раз не только возбуждательные, но и тормозные синапсы (чтобы приблизиться к ганглиозным клеткам кошки с оп-центром и off-периферией), ибо одна из возможностей получить информацию о границе связана с клеткой, соединенной с клетками, расположенными по всей

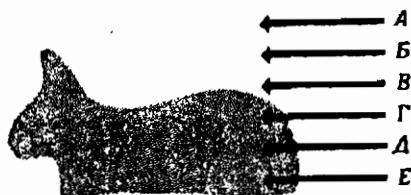


Рис. 28. Важна не абсолютная интенсивность света в точках *A*, *B*, *B*, *Г*, *Д* и *E*, а то, что она меняется при переходе от *B* к *Г*.

площади круга, причем клетки, расположенные в центре, являются возбуждательными, а те, что находятся на периферии, — тормозными (рис. 29). Если обозначить через  $r_0$  уровень спонтанной активности клетки, получающей сигнал фоторецепторов в случае равномерно освещенного поля, то при движении рецептивного поля по поверхности с границей так, как это показано на рис. 30, *A*, изменение реакции клетки во времени дает кривую, представленную на рис. 30, *B*. Таким образом, активность клетки отклоняется от  $r_0$  в областях, близких к границе.

Переходя теперь от сетчатки кошки к ее зрительной коре, следует сказать, что Хьюбел и Визель обнаружили там как «простые» клетки коры (которые реагируют на линии, имеющие специфическую ориентацию и расположенные в специфическом месте), так и сложные клетки, реагирующие на линии заданной ориентации, но расположенные в любых участках зрительного поля. Схемы соединений, которые, как они полагают, дают возможность получить поведение, характерное для простых клеток коры, показаны на рис. 31. По-видимому, реакция сложных клеток коры в свою очередь может получить объяснение с помощью относительно простой схемы соединений с соответствующим набором простых клеток коры. Хьюбел и Визель [120] обнаружили еще и «сверхсложные» клетки в полях 18 и 19



(примыкающих к первичной зрительной области), которые реагируют на углы определенных размеров и определенной ориентации в различных точках зрительного поля.

Как видите, детекторы углов, существование которых мы предсказали из теоретических соображений (рис. 20), были дей-

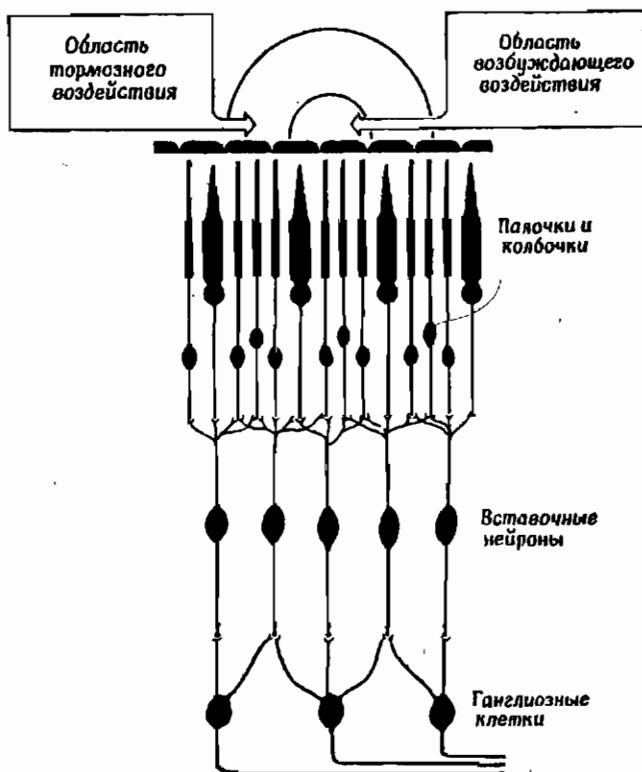


Рис. 29. Схема участка сетчатки (амакриновые и горизонтальные вставочные нейроны не изображены), на которой показано различное влияние палочек и колбочек на ганглиозные клетки: рецепторы, лежащие в центральной области, оказывают возбуждающее действие, а лежащие на периферии — тормозное.

ствительно обнаружены в зрительной области коры головного мозга кошки [119] вместе с клетками усиления контраста [144], а латеральное коленчатое тело, по-видимому, обеспечивает предварительную обработку зрительной информации для выделения контуров. В зрительной системе лягушки детекторы угла обнаружены не были. Почему же для лягушек наше «предсказание» не оправдалось? Правдоподобным представляется следующее объяснение. У лягушки очень простое зрительно обус-

ловленное моторное поведение: она не реагирует на зрительные стимулы, если не считать тех, которые вызывают у нее желание схватить или приготовиться к нападению (например, движущийся объект, напоминающий муху) или стремление спастись бегством (например, большой движущийся предмет). Короче говоря, она реагирует на локальные черты внешнего мира и не нуждается в информации, собранной с большого участка зрительного поля, для того чтобы направлять свое поведение. Таким

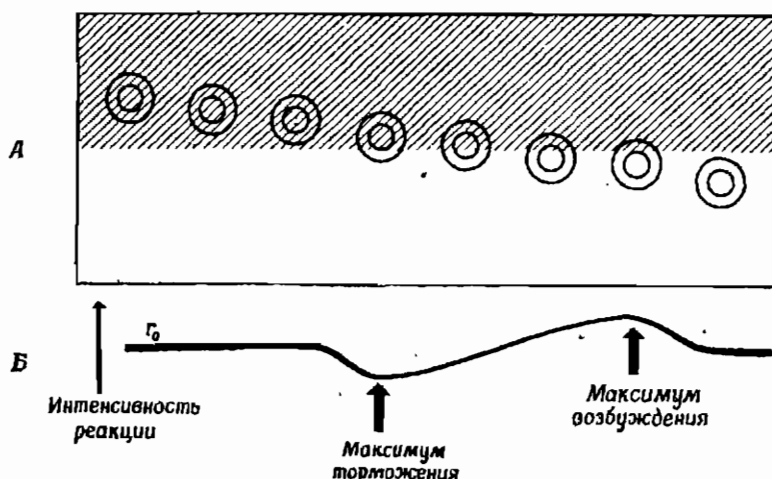


Рис. 30. Каждый из детекторов контраста с оп-центром активизируется пропорционально разности стимуляции центральной области и периферии.

Такие детекторы подчеркивают границу «дублетом» отклонений от уровня покоя (сначала в одну, а потом в другую сторону). Клетки максимально возбуждены, когда они только что вошли в освещенную зону, и максимально заторможены перед самым выходом из нее.

образом, в ситуациях, в которых другие животные, например кошка, могут воспользоваться информацией об углах для того, чтобы свести информацию о контурах до необходимого минимума, так что лишь на высших уровнях интеграции возникает деенаправленное представление, основанное на «глобальных» свойствах зрительных стимулов, лягушке для того, чтобы действовать, достаточно «локальных» свойств (хотя для того, чтобы решить, на каком локальном свойстве основывать свое действие, лягушке понадобятся глобальные вычисления; см. разд. 7.2); таким образом, уместно допустить, что выход системы предварительной обработки зрительных образов у лягушки закодирован в терминах возможных действий и что одну группу клеток в сетчатке лягушки правомерно называть «детектором насекомых». Мы предполагаем, что управление движе-

нием глаз у млекопитающих весьма сходно с управлением движением всего тела у лягушки.

Обратите внимание, что тем самым мы утверждаем, что если предварительная обработка зрительных стимулов в ганглиозных клетках лягушки уже «ориентирована на действие»,

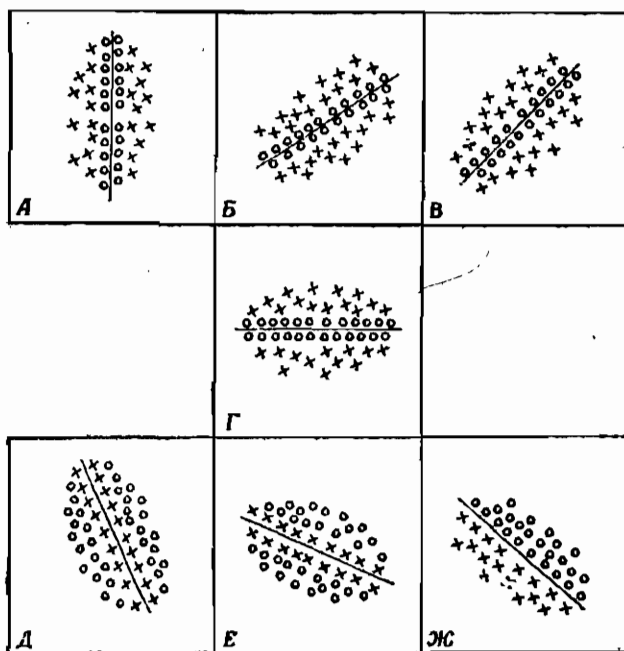


Рис. 31. Хьюбел и Визель обнаружили в коре головного мозга кошки популяцию клеток, которые они назвали простыми; в рецептивных полях этих клеток имеются оп- и off-области (разделены прямой линией).

Эта граница располагается по-разному в разных клетках, а диаметр всего рецептивного поля таких клеток кошки соответствует зрительному углу примерно  $4^\circ$ . Кружками показаны возбуждающие (оп) участки, а крестиками — тормозные (off).

то у кошки даже такие «поздние» стадии предварительной обработки, как выделение углов в полях 18 и 19 коры головного мозга, «нейтральны по отношению к действию» и основаны лишь на том, что закономерности окружающей среды дают возможность хорошо описывать объекты с помощью точек максимальной кривизны на их контурах. Отложим обсуждение «распознавания образов» более высокого уровня до разд. 4.3, а здесь лишь упомянем работу Арбинба [8], посвященную проблемам сложности и эволюции, в которой высказываются предположения о том, каким образом различные функции сети могут благо-

приятствовать различным способам кодирования информации. Это может служить еще одним аргументом в пользу нашего предположения о том, что «деенаправленное кодирование» играет важную роль в системах восприятия.

Заложив некоторые основы для нашей гипотезы о деенаправленности восприятия и получив некоторые начальные сведения о нейронах и о строении нервной системы, мы отложим пока проблемы строения и функции мозга и займемся в двух следующих главах тем вкладом, который могут сделать теория систем и исследования по искусственному интеллекту в изучение мышления и поведения.

## Глава 3

## ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ СИСТЕМ

Специалисты, занимающиеся проблемами управления техническими объектами, например космическими кораблями, или химическими процессами, разработали и сформулировали определения таких важнейших повседневно используемых понятий, как состояние, алгоритм, обратная связь или адаптация. Поскольку эти понятия оказались чрезвычайно полезными для анализа поведения сложных технических систем, можно надеяться, что они помогут нам разобраться и в поведении сложных биологических систем. Вот почему эту главу мы посвящаем изложению этих идей, рассматриваемых в рамках общего кибернетического подхода.

В разд. 3.1 мы убедимся, что подобно тому, как ответ человека на заданный вопрос зависит от информации, которой этот конкретный человек располагает, реакция любой системы на некоторое входное воздействие зависит от внутреннего состояния этой системы. В разд. 3.2 мы покажем, как исследование алгоритмов дает возможность объяснить сложное поведение системы существованием нескольких относительно простых операций, выполняемых системой последовательно в зависимости от ее текущего состояния, а в разд. 3.3 мы уделим особое внимание одной специальной форме зависимости реакции от состояния системы, известной как «обратная связь». Наконец, в разд. 3.4 мы проследим, как структура системы может адаптивно приспособливаться к изменениям внешней среды, и в качестве яркого примера возможностей машинного обучения упомянем об успехах одной ЭВМ, принимавшей участие в шашечном турнире. И хотя в этой книге нас интересует в первую очередь применимость этих понятий в исследованиях по искусственному интеллекту и теории мозга, читатель не должен упускать из виду их общность и широту. Идеи теории систем, развиваемые в этой главе, могут оказаться полезными в таких различных областях, как история, биология, социология, философия, психология и экономика.

## 3.1. СОСТОЯНИЯ

Рассмотрим некоторый *организм*, взаимодействующий со *средой*. Поведение среды оказывает определенные влияния на организм — мы будем говорить об этих влияниях как о *входах* организма; в то же время некоторые аспекты деятельности организма — мы будем называть их *выходами* — оказывают влияние на поведение среды (рис. 32). Строя наши обобщаю-

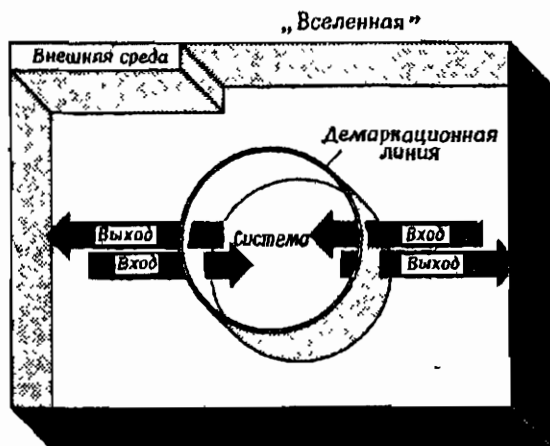


Рис. 32. Здесь показано, как любой «мир» можно разбить на две части: на «систему», которая является основным объектом исследования, и «внешнюю среду», содержащую все те аспекты остальной части мира, которые оказывают влияние на поведение системы.

щие теории, мы обязаны постоянно подчеркивать (хотя в приводимых моделях этот факт может быть недостаточно акцентирован), что мы имеем дело не с какими-то изолированными пассивными организмами, подвергаемыми воздействиям откуда-то извне, но с организмами, находящимися в постоянной взаимосвязи со средой. Выходы организма можно рассматривать как входы среды и наоборот.

В теории систем входами и выходами считается лишь небольшая доля взаимодействий рассматриваемой системы с остальной Вселенной, т. е. только те взаимодействия, которые, по предположению ученого, играют важную роль в определении наблюдаемого поведения системы. Если взять, например, автомат по продаже конфет, то его входными воздействиями разумно считать лишь акт «опустили деньги в щель и потянули за рычаг», не рассматривая при этом ни напряжения, необходимого для питания электрического механизма автомата,

ни те проклятия и удары, которыми мы осыпаем его в случае сбоя. Аналогичным образом среди его выходов мы не станем упоминать возможный удар током, но выдаст ли он конфету или конфету и сдачу — это нам важно.

По существу число переменных, которое можно включать в анализ систем, ничем не ограничено — искусство хорошего теоретического анализа в том и состоит, чтобы отобрать из всей массы имеющихся взаимодействий действительно содержательные. Теория человеческого познания могла бы, конечно, принимать в расчет даже силу ветра или температуру в левой мышке, однако нет никаких оснований рассчитывать на то, что включение в анализ подобных эксцентричных переменных приведет к лучшим результатам. Правильно выбранные переменные — решающий момент в любом теоретическом построении.

Независимо от того, насколько удачен наш выбор входов и выходов, мы не можем тем не менее надеяться, что они позволят нам полностью описать поведение системы. Нельзя предугадать ответ человека, если неизвестны сведения, которыми он располагает по данному вопросу; точно так же, не зная заложенную в ЭВМ программу, мы не сможем сказать, что она сделает с введенными в нее данными (см. разд. 3.2). Короче говоря, нельзя надеяться до конца понять процессы мышления, если следовать тем психологам, которые считают, что любой организм пассивно реагирует на последовательность стимулов и что им можно управлять с помощью определенной программы подкреплений. Чтобы достигнуть успеха, необходимо иметь также описание внутреннего состояния системы, которое определяет, какие именно из имеющихся в данный момент стимулов будет использовать организм, принимая решение о своих текущих действиях и изменении своего внутреннего состояния. Точно так же теории, обобщающие описанные здесь концепции, должны учитывать аналогичные моменты для внешней среды.

Чтобы сформулировать роль, которую играет внутреннее состояние, разберем более подробно работу торгового автомата (рис. 33). Когда мы опускаем в щель достаточное количество денег и тянем за рычаг под картинкой, изображающей нужный нам предмет, мы рассчитываем на однозначную реакцию автомата: он должен выдать нам соответствующий предмет и правильную сдачу. На самом деле автомат выдает нам самый нижний предмет из стопки над рычагом. Но это произойдет лишь в том случае, если в автомате имеется достаточное количество пондобившегося нам товара, а для того чтобы автомат правильно сдал нам сдачу, в нем должен быть запас соответствующих монет. Таким образом, выход автомата не всегда зависит только от поступившего стимула. В начале дня, когда

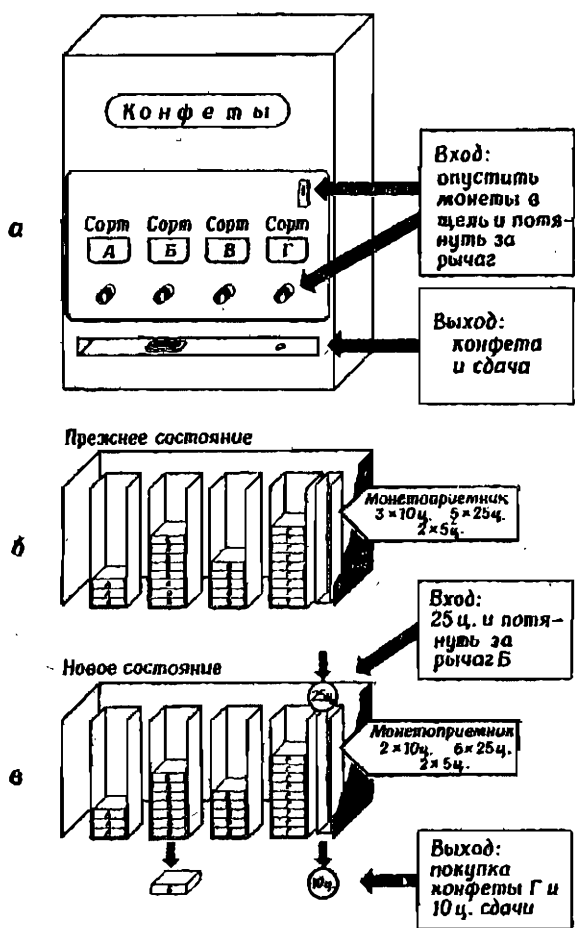


Рис. 33. Работа торгового автомата.

а — вид автомата снаружи. Если опустить в щель монеты и потянуть за соответствующий рычаг, то на лоток выпадет покупка и сдача; б — внутренний вид автомата; в — внутреннее состояние: расположены конфеты в каждом из четырех буνηеров и набор сдачи. Как полагают рис. б и в, взаимосвязь между входом и выходом зависит от внутреннего состояния системы, и входные воздействия не только вызывают определенный выход, но и изменяют внутреннее состояние системы. (Вопрос: если для нового состояния автомата повторить вход «25 центов и потянуть за рычаг в», то каков будет следующий выход?)



весь товар только что уложен и есть любая сдача, автомат некоторое время действует по нормальной схеме «стимул — реакция», но в какой-то момент запас конфет или мелких монет иссякает, и такое описание работы автомата становится ошибочным. Чтобы описать реакцию автомата на входное воздействие, нам необходимо знать, что лежит внизу каждой стопки и какая мелочь имеется в бункере. Однако для того, чтобы описать поведение машины на протяжении более длительных промежутков времени, этого недостаточно, ибо, извлекая один предмет, мы создаем новую ситуацию, в которой следующий выход машины определяется тем предметом, который лежал над купленным нами. Таким образом, этот крайне простой пример показывает, что полное описание внутреннего состояния системы должно содержать полный упорядоченный перечень предметов в каждой стопке и полное перечисление всей мелочи на сдачу.

Итак, описание любой реально существующей системы должно содержать следующие пять элементов, выбор которых в каждом конкретном случае будет зависеть от тех аспектов деятельности системы, которые нас интересуют.

1. Множество *входов* (входных воздействий): те изменяющиеся параметры окружающей среды, которые, как мы полагаем, оказывают влияние на интересующие нас аспекты поведения системы
2. Множество *выходов* (выходных величин): те параметры системы, которые мы наблюдаем либо просто потому, что они нас интересуют сами по себе, либо потому, что они, по нашему мнению, вносят существенные изменения во взаимоотношения системы и окружающей среды
3. Множество *состояний*: *внутренние* параметры системы (которые могут быть, а могут и не быть одновременно и выходными величинами), определяющие связь между входами и выходами. Состояние системы — это ее сконцентрированное прошлое; зная состояние системы, мы не нуждаемся ни в какой дальнейшей информации о том, что с ней было: это никак не уточнит наши предсказания о ее будущих реакциях на входные воздействия
4. *Функция перехода состояния*: определяет, как изменяется состояние системы при различных входах
5. *Выходная функция*: определяет выход системы при заданных входе и внутреннем состоянии

Мы еще раз подчеркиваем, что, хотя этой модели достаточно для объяснения поведения системы при известных входах в течение короткого промежутка времени, более тонкие теории, позволяющие объяснить более продолжительные взаимодействия, должны включать аналогичную модель и для окружающей

среды. В качестве иллюстрации к этому положению рассмотрим систему  $A$  на рис. 34, а. Входами, выходами и состояниями для нее служат целые числа. Получив на входе число  $n$ , она независимо от своего состояния выдает на выходе  $n + 1$  и переходит в состояние  $(n + 1)$ . Таким образом, рассматривая эту систему изолированно, мы пришли бы к выводу, что она просто прибавляет единицу к любому числу, поданному на ее вход. Рассмотрим теперь систему  $A_1$ , которая является точной копией системы  $A$ , но работает теперь вместе с другой такой же копией  $A_2$ , с которой она связана так, как показано на рис. 34, б;

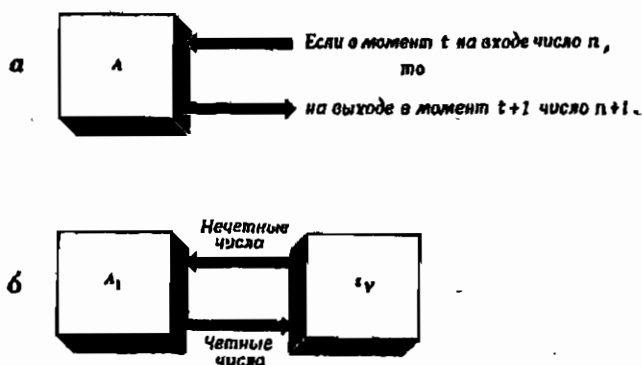


Рис. 34. «Целое больше, чем сумма его частей».  
Объяснения в тексте.

Теперь их функции представляются совершенно иными: система  $A_1$  занимается тем, что выдает нечетные числа, а система  $A_2$  — четные. Именно в этом смысле «целое есть больше, чем простая сумма его частей». Даже когда у нас есть полное представление о составных частях (рис. 34, а), мы не можем постигнуть самое существенное в их поведении, пока не объединим их (рис. 34, б).

Система, в которой функция перехода состояний и выходная функция однозначно по заданному начальному состоянию и заданной последовательности входных сигналов определяют новые состояния и выходы, называется *детерминированной системой*. И хотя именно такими системами мы и занимаемся в этой книге, необходимо заметить, что бывают случаи, когда, с какой бы точностью мы ни определяли последовательность входов, мы все равно не сможем с абсолютной уверенностью определить соответствующие состояния и выходы. Если нам повезет, то можно будет указать точные вероятности их появления — в этом случае у нас будет система, называемая *стохастической*.

Отметим коротко, что стохастический подход оправдывает себя, либо если мы проводим анализ системы на квантовом уровне, либо когда рассматривается макросистема, допускающая стохастическое описание в силу того, что мы решили пренебречь «тонкими деталями» взаимодействий на микроуровне.

Например, гораздо разумнее считать, что вероятность выпадения «решки» равна 0,5, чем учитывать начальное положение пальцев, силу толчка большим пальцем и т. п., пытаясь определить, как упадет монета в каждом конкретном случае. Аналогичным образом при анализе системы во многих случаях не имеет смысла подробно описывать ее входы или состояния, а гораздо полезнее описывать систему на достаточно грубом уровне, предполагающем измерения относительно небольшого числа переменных, с тем чтобы на их основе предсказывать лишь вероятности различных исходов.

Общепринятая интерпретация квантовой механики идет еще дальше и утверждает, что имеются вероятности, от которых нельзя освободиться, какими бы точными измерениями мы ни пользовались, и что в некотором смысле стохастичность — неотъемлемое свойство Вселенной. В ньютоновой физике состояние системы описывалось расположением ее элементов, которое можно наблюдать непосредственно, и их скоростями, которые можно вычислить, зная пройденные ими пути за известный промежуток времени. Понятие же состояния в квантовой механике становится гораздо более абстрактным. Здесь состояние — это так называемая волновая функция, которая задает лишь распределение вероятностей исходов на множестве наблюдаемых координат и скоростей. Интересно отметить, что, хотя в квантовой механике сам процесс изменения состояний во времени подчиняется детерминистическим закономерностям, знание состояния еще не позволяет делать точный прогноз, а лишь дает возможность определять *вероятности* различных исходов.

Многие психологи подходили к задачам обучения с позиций «стохастической теории обучения», предполагая при этом, что для мозга существуют лишь два возможных состояния: «обучен выполнению задания» и «не обучен выполнению задания», и что переход из одного такого состояния в другое осуществляется чисто стохастически. Конечно, реальные процессы обучения, происходящие в реальном мозге, складываются из громадного числа более тонких изменений, и лишь их результат допускает такую двоичную оценку, маскирующую непрерывность процессов в нервной системе. Это очень напоминает наш предыдущий пример с квантовой механикой, где состояние системы описывалось функцией, содержащей лишь информацию о распределении вероятностей результатов измерений. Никакой конечный набор измерений переменных квантовомеханической системы не

может заменить эту бесконечную функцию, поскольку только она одна удовлетворяет требованиям, предъявляемым теорией систем к состояниям: «состояние содержит всю информацию о предыстории системы, обладающую тем свойством, что добавление какой-то новой информации никак не поможет уточнить предсказание о будущем поведении системы». Пытаясь описать работу мозга, мы должны будем ввести параметры состояния, столь же чуждые языку нынешней психологии, сколь чуждым было квантовомеханическое состояние для классических координат и скоростей ньютоновой механики. Конечно, ньютонова механика прекрасно подходит для исследования весьма широкого круга явлений. То же самое можно сказать и об обычной психологии. Но по мере того как расширяются возможности наблюдения, неизбежно выявляются и недостатки классических подходов.

Это положение хорошо иллюстрируют исследования ретикулярной формации (РФ) ствола головного мозга (рис. 2), которую мы рассмотрим подробнее в разд. 7.1; у млекопитающих РФ обеспечивает в основном сложные взаимодействия с высшими центрами мозга. Однако можно предположить, что у низших животных РФ частично служит механизмом «устранения избыточности потенциальных команд», направляющим весь организм на выполнение одной глобальной задачи; у высших животных РФ тоже несет среди прочего сходную функцию — регулирует чередование сна и бодрствования. Некоторые морфологические соображения заставляют предполагать, что локальные расчеты осуществляются в тонких дисках, расположенных по нормали к направлению спинного мозга, а каналы двусторонней связи между этими дисками, или «модулями», сосредоточены как раз в РФ. При этом каждый модуль получает разную сенсорную информацию. Возникает вопрос: как должно быть организовано взаимодействие этих модулей для того, чтобы могло выработываться общее решение, заставляющее животное перейти к выполнению того или иного действия? Килмер и МакКаллок предложили схему таких взаимодействий, которая в экспериментах на машинных моделях продемонстрировала удовлетворительные переключательные характеристики. В основу этой схемы был положен принцип, согласно которому каждая подсистема, используя свою частичную информацию, вырабатывает собственное пробное решение, которое в результате взаимодействия с другими подсистемами постепенно меняется до тех пор, пока не будет достигнута необходимая степень согласованности, на основании которой организм и станет действовать. И хотя внешне будет казаться, будто в каждый момент времени система осуществляет одну определенную программу действий, ни в какой момент времени такого описания

не будет достаточно для того, чтобы понять *динамику* системы в целом.

Основываясь на этих положениях, обратимся к рис. 35, где схема нейронной сети рассматривается в терминах системного подхода. Одна из наших центральных проблем состоит в том, чтобы понять, насколько нейронные механизмы позволяют объяснить явления на психологическом уровне, ибо рассчитывать на простую редукцию в этом случае не приходится. Двум различным с психологической точки зрения стимулам — свету,

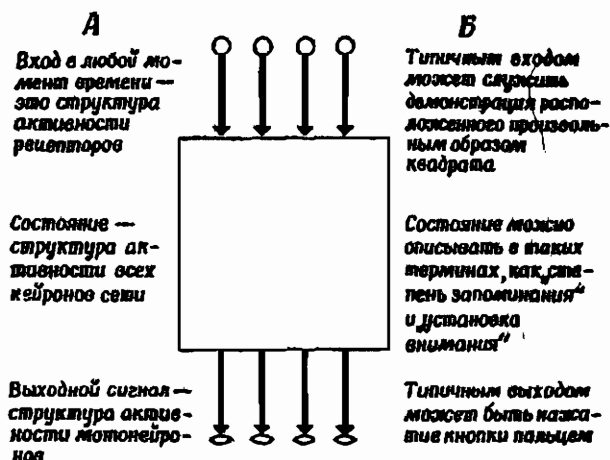


Рис. 35. Два вида описания сети в терминах параметров состояния: на уровне активности индивидуальных нейронов (А) и на уровне психологического описания (Б).

движущемуся к субъекту, или неподвижному свету, к которому с той же относительной скоростью приближается субъект, — соответствуют идентичные нейронные входные воздействия, и отличаются они лишь по разнице внутренних состояний в этих двух случаях. Таким образом, на психологическом уровне входное воздействие зависит не только от нейронного входного воздействия, но и от внутреннего состояния на нейронном уровне. И наоборот, одну и ту же кнопку можно нажать многими разными способами, так что простого взаимно однозначного соответствия между нейронным и психологическим описаниями установить нельзя. Тем не менее мы покажем, что, несмотря на неприменимость наивной редукции, многие психологические явления можно объяснить на нейронном уровне.

Рассмотрим теперь простую сеть из формальных «нейронов», которая поможет нам лучше почувствовать динамику системы, описываемой на нейронном уровне. Этот пример окажется по-

лезным и для обсуждения нерархического устройства систем управления, которыми мы займемся в гл. 5. Он показывает, как просто осуществить на высшем уровне управление сетью, получая в результате необходимую последовательность действий. Рассмотрим в этой связи весьма упрощенную модель ноги, заимствованную у Вейса [252]; единственным шаровым суставом этой ноги управляют четыре мышцы.

Представим себе жесткую негнущуюся ногу, прикрепленную к суставу, как показано на рис. 36. Ногу можно выбросить вле-

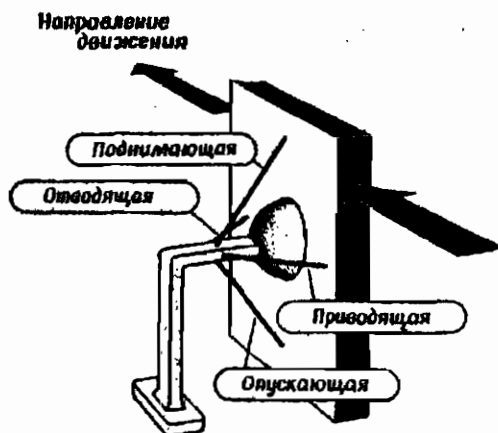


Рис. 36. Упрощенная модель ноги с шаровым суставом и негнущимся «коленом».

Объяснения в тексте.

ред, сокращая отводящую мышцу ( $Ab$ ), и назад — с помощью приводящей мышцы ( $Ad$ ), ступня поднимается при сокращении поднимающей мышцы ( $El$ ), а опускается при сокращении депрессора ( $De$ ). Приведенная ниже последовательность мышечных сокращений несколько упрощенно показывает участие одной ноги в процессе движения четвероногого существа вперед. В начале цикла эта нога прочно стоит на земле и выдвинута далеко вперед относительно всего тела.

1.  $De$ ,  $Ad$ . Твердо опираясь ногой на землю, пытаться отвести ее назад. Сила трения, возникающая между ступней и землей, вызовет перенос тела вперед
2.  $El$ . После того как нога отведена до предела назад, оторвать ее от земли
3.  $El$ ,  $Ab$ . Перенести поднятую ногу вперед
4.  $De$ . Опустить ногу на землю и приготовиться возобновить цикл

Читателей, которых интересует более подробное описание процесса движения животных, мы отсылаем к работам Вейса, [252], Робертса [215] и Грея [65]. Здесь же лишь отметим, что даже простая последовательность мышечных сокращений может привести к биологически полезному поведению.

Нетрудно, конечно, сконструировать нейронную сеть, которая может генерировать такую последовательность мышечных

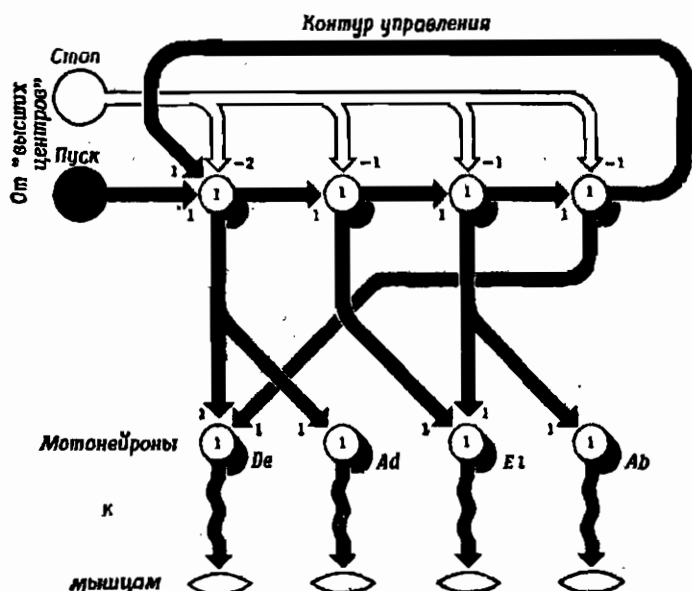


Рис. 37. Простая схема ритмического управления «ногой», изображенной на рис. 36.

Сигнал «пуск» от «высших центров» запускает импульс в замкнутом контуре, а сигнал «стоп» прерывает активность контура.

сокращений. Для упрощения схемы заменим мотонейронный пул, управляющий мышцей, одним формальным нейроном и изобразим дело так, как будто один-единственный импульс, поступающий в данный мотонейрон, заставляет соответствующую мышцу произвести сокращение необходимой продолжительности (рис. 37). Здесь (ср. с клетками на рис. 1) в момент времени  $t+1$  в клетке возникает возбуждение, если в момент времени  $t$  на нее поступило воздействие через вход, у которого стоит 1, и не поступило воздействий через «отрицательные» входы.

По сигналу «пуск», поступившему из «высших центров», в управляющем контуре начинает циркулировать импульс, а сигнал «стоп» прекращает в нем всякую активность. По мере

того как четыре управляющих нейрона активируются циркулирующим импульсом, они вызывают необходимую последовательность мышечных сокращений. Таким образом, входом для этой схемы служит последовательность импульсов в двух входных каналах, идущих «от высших двигательных центров», а выходом — суммарная активность четырех выходных каналов, ведущих к мышцам. Однако очевидно, что вход сам по себе не определяет выход, если не уточнено состояние, т. е. последовательность импульсов, циркулирующих в контуре.

**Упражнение.** Преобразуйте эту схему так, чтобы сигнал «пуск» не мог вызвать новый импульс в управляющем контуре, если там уже циркулирует хотя бы один импульс, и чтобы задерживать действие сигнала «стоп» до тех пор, пока нога не будет стоять на земле.

Самое существенное в наших рассуждениях о состоянии нейронной сети заключается в том, что *текущий выход системы ни в каком смысле не должен быть ответом на текущее входное*



Рис. 38. «Запоминающий» формальный нейрон.

Он остается возбужденным «навсегда». Получив хотя бы одно входное воздействие благодаря тому, что в замкнутом контуре «реверберирует» импульс обратной связи.

*воздействие, рассматриваемое в качестве стимула.* Скорее наоборот, на возбуждение тех нейронов, которые определяют выход, может влиять активность нейронов системы, отражающая ее весьма далекую предысторию.

Последнее утверждение можно пояснить на очень простом примере (рис. 38). Рассмотрим формальный «нейрон» с двумя входами: одним внешним и другим, замкнутым на собственный выход. Значения параметров этой схемы подобраны так, что выход возбуждается в момент  $t + 1$ , если в момент  $t$  возбужден тот или другой из этих входов. Предположим, что в начальный момент времени нейрон находится в состоянии покоя  $y(0) = 0$ . Тогда до тех пор, пока не возбужден входной канал  $x$ , нейрон будет оставаться в состоянии покоя. Но как только  $x$  станет равным 1, возбудится канал  $y$  и в замкнутом контуре будет ревербировать импульс, обеспечивая спонтанное возбуждение нейрона. В результате такой нейрон навсегда «запоминает», что на него когда-то поступило входное воздействие.



**У п р а ж н е н и е.** Заметим, что ничего сверх этого он не может «запомнить». Подумайте, как добавить сюда еще один вход, который позволил бы возвращать этот нейрон в исходное состояние.

Продолжая обсуждать наш пример с рис. 38, можно представить себе, что вместо памяти, механизм которой основан на реверберации входного сигнала по замкнутому контуру, каждое возбуждение приводит к некоторому снижению порога; в результате при многократном возбуждении нейрона его порог в конце концов опустится до нуля, а сам он начнет возбуждаться спонтанно, независимо от входов. «Память» в этом случае заключена в пороговом значении и нечувствительна к сбоям, вызванным тем, что единственный импульс не смог по каким-то причинам пройти весь замкнутый контур.

Заметным ограничением предложенной выше модели системы является предположение, что функция перехода состояний определена раз и навсегда. На самом деле мы должны учитывать и то, что функция, задающая следующее состояние, может меняться во времени. Здесь уместен иерархический подход: на одном уровне и в одной временной шкале мы рассматриваем мгновенную деятельность системы, тогда как на другом уровне иерархии и в другой временной шкале, рассчитанной на более продолжительное время, мы видим, как меняются сами процессы, управляющие этой деятельностью. Стратегии такой адаптации мы рассмотрим в разд. 3.4.

Для описания того, как система, подобная мозгу, адаптируется во времени, можно было бы ввести пространство состояний огромной размерности и учесть не только состояние, управляющее текущей деятельностью, но также и состояние, определяющее процессы адаптации и обучения. Однако такое многообразие состояний лишь затемняет существо вычислительного процесса, который можно было бы обнаружить, рассматривая пространство состояний меньшей размерности и соответствующее ему поведение и предполагая, что динамика поведения в этом пространстве сама меняется во времени. Когда мы исследуем систему как *адаптивную*, то обычно предполагаем, что имеется детерминированная система, состояние которой не сложно разбить (рис. 39) на две составляющие: одну, меняющуюся сразу, ту, которую мы не вполне точно называем «состоянием», и другую, меняющуюся медленно, о которой мы говорим как о *параметрах адаптации* системы. На языке психологии это называется *кратковременной (оперативной)* и *долговременной памятью*.

Такая декомпозиция может значительно способствовать пониманию функции системы. Впрочем, одновременно с этим она

может привести и к совершенно ошибочному представлению о ее структуре. Например, «собственно состояние» нейронной сети может задаваться структурой импульсного ответа нейронов, а параметры адаптации — распределением синаптических весов и порогов тех же самых нейронов. Поэтому (ср. с рис. 1) отношение этих двух параметров к двум разным системам может не иметь никакого физического смысла, но зато может оказать нам помощь в понимании связанных с ними психологических

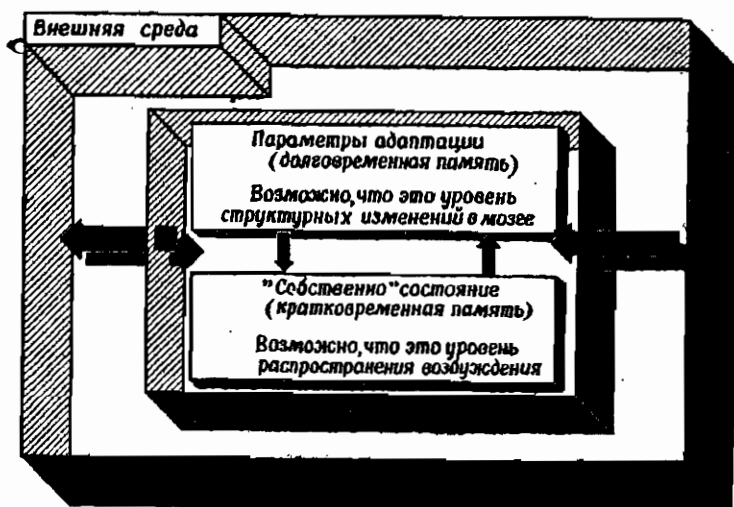


Рис. 39. Функциональная декомпозиция адаптивной системы на подсистемы двух уровней: «долговременную» и «оперативную» память (ср. с рис. 48).

процессов и привести к полезной математической модели для изучения функционирования системы. При этом ничто не заставляет нас ограничиваться только двумя уровнями.

Некоторые психологи различают кратковременную и долговременную память потому, что последняя не исчезает и после того, как возбуждение в нейронной сети прекратится. Сейчас мы коротко остановимся на экспериментах, подтверждающих правомерность такого деления. Затем в разд. 3.4 мы на основе нашего простенького примера регулирования параметров (рис. 38) коснемся задачи идентификации в теории управления, где от регулятора требуется скорректировать значения параметров, используемых им для управления некоторой другой системой.

В нейронных сетях, приведенных на рис. 37 и 38, состояние системы было закодировано в виде активности формальных

«нейронов». Если бы эта активность оказалась прерванной, то соответствующие системы потеряли бы память при условии, что в них не предусмотрен какой-то другой механизм запоминания вроде снижения порога, гипотетически предложенного для схемы на рис. 38. Известны экспериментальные подтверждения того, что «хранение информации» в оперативной памяти связано с электрической активностью мозга, тогда как долговременную память обеспечивают совсем другие механизмы. Здесь мы ограничимся кратким описанием трех старых опытов. Множество подобных экспериментов описано Джоном [128] и Гуровицем [96]. Здесь достаточно сказать, что слишком многие из них свидетельствуют о необходимости настоящего кибернетического подхода, который должен сменить наивное представление о памяти как о регистрации некоторого числа пар стимул — реакция с помощью уже готовых синапсов на представление о ней как об одном из средств обеспечения адаптации организма к характеристикам сложной внешней среды.

Воспользовавшись тем фактом, что у хомяков можно искусственно вызвать зимнюю спячку, Рансмейер и Джерард [211] обучили животных эффективному поведению в лабиринте, а затем охладили их до температуры  $5^{\circ}\text{C}$ , практически подавив электрическую активность нейронов. Затем хомяков отогрели до нормальной температуры и снова предложили им лабиринт. Не было замечено никакой потери памяти. На этой основе Рансмейер и Джерард сделали вывод, что запоминание информации связано с какими-то химическими изменениями, а не с электрической активностью.

Другие эксперименты наводят на мысль, что электрическая активность может играть роль как в формировании оперативной памяти, так и для «перезаписи» информации в долговременную память, и были попытки измерить время, необходимое для такого закрепления информации.

Дункан изучал влияние электросудорожного шока (ЭШ)<sup>1</sup>, который применяют для нарушения у крыс текущей электрической активности при обучении. В эксперименте использовали ящик с двумя одинаковыми отсеками. В одном из отсеков пол был решетчатым и по нему можно было пропускать ток. Другой отсек был выкрашен в белый цвет и в нем горела 100-ваттная лампа, так что внешне первый отсек казался крысам более безопасным. После того как крыса осматривала оба отсека и возвращалась в отсек с решетчатым полом, через решетку пропу-

<sup>1</sup> Электрошоковую терапию, применяемую в психиатрии, можно сравнить с ударом по забарахлившему механизму; и то и другое предполагает полное незнание глубинных механизмов, но иногда дает результаты.

скали разряд, достаточно сильный, чтобы заставить крысу перебежать в другой отсек. Животное оставляли там в течение 10 секунд, а затем вынимали и после определенного времени применяли ЭШ. Эксперимент проделали с несколькими крысами, варьируя интервал между ударом тока на решетке и ЭШ.

Процедуру повторяли, давая крысам 10 секунд, чтобы перейти с решетки в безопасный отсек до того как будет пропущен ток, и наблюдали, насколько хорошо крысы научились избегать удара током. У крыс, которые получали ЭШ с интервалом не больше 4 минут, наблюдалась значительная потеря памяти: они не умели избежать удара током, ударив в освещенный отсек. Если же интервал составлял час и более, то никакой разницы в поведении крыс получивших ЭШ, и контрольных животных, не получавших ЭШ, не отмечалось.

Это наводит на мысль, что время консолидации при переходе информации из оперативной в долговременную память составляет от 4 минут до одного часа. Однако на это можно возразить, что ЭШ вовсе не разрушает оперативную память, а просто показывает зперьку, что удар током в первом отсеке в конце концов не так уж и страшен! Парируя эти возражения, Куортермейн [206] провел следующий эксперимент. Крысу помещали в тесный лифт, который затем опускали к земле; в этот момент крыса обычно выпрыгивала и получала в наказание удар током. Если в течение не более чем 15 секунд после этого крысу подвергали ЭШ, то при повторном испытании она чаще всего снова выпрыгивала. Куортермейн провел серию таких опытов, помещая крыс в черные мешки, чтобы у них не выработалась реакции избегания к тому месту, где они получают ЭШ. Поведение этих крыс по существу не отличалось от поведения остальных. Это подтверждает теорию, что разрушение информации после ЭШ обусловлено настоящей амнезией, вызванной физиологическими изменениями, а не помехами обучения. Как согласовать 15-секундное время консолидации в опытах Куортермейна с 15-минутным интервалом, наблюдавшимся Дунканом, остается неясным. Другие опыты (описанные в книгах, на которые мы ссылались выше) показывают, что еще более длительные помехи возникают при применении химических веществ, нарушающих биохимические процессы, происходящие в клетках. Это просто говорит о том, что между кратковременной и долговременной памятью нет четкой границы, а одна форма постепенно переходит в другую. Остается надеяться, что создание достаточно изощренных моделей структуры памяти, возможно даже в направлениях, намечаемых нашей кассетной метафорой (разд. 4.1), приведет к новым концепциям, которые можно будет положить в основу критического эксперимента.

## 3.2. АЛГОРИТМЫ

*Алгоритм* — это что-то вроде кулинарного рецепта, в котором описано, как сложную на первый взгляд операцию можно разбить на последовательный ряд простых операций. Вычислительная машина — это система, которая может по заданному алгоритму получить из имеющихся данных нужный результат. До второй мировой войны роль вычислительной машины выполнял человек, вооруженный счетами или арифмометром. Он складывал разные числа, перемножал их между собой и тому подобное, составляя этим способом ведомость на заработную плату или определяя наилучшую аэродинамическую форму крыла самолета. Современная вычислительная машина — это устройство, сделанное человеком и способное по заданной *программе* (т. е. по соответствующим образом закодированному алгоритму) осуществлять ввод данных по своим входным каналам и проделывать с ними миллионы операций в секунду, получая не только такие результаты, которые мог бы получить и вычислитель-человек, но и результаты, требующие проведения огромного числа операций, выполнить которые практически не могла бы даже целая армия вычислителей.

Успех вычислительной техники частично обусловлен быстродействием используемых схем. Если человек может складывать максимум несколько цифр в секунду, то современная электронная машина за это время сложит миллионы чисел. Интересно, что «время цикла» нейрона лежит где-то посредине между человеком и электронной схемой (рефрактерный период нейрона — порядка миллисекунд), и стоит поразмыслить над тем фактом, что, пока человек складывает несколько цифр, десять миллиардов нейронов в его мозгу производят тысячи операций уж никак не меньшей сложности. Все это заставляет предполагать, что развитие мозга шло не по пути совершенствования его счетных возможностей. И с моей точки зрения, лишь способность мозга пользоваться внутренними моделями внешнего мира для планирования поведения и выбора одной из нескольких возможных программ взаимодействия со сложной средой может «оправдать» аналогии между возможностями мозга и вычислительной машины.

Более глубокая причина успеха вычислительных машин никак не связана с их схемами, а обусловлена основными логическими свойствами алгоритмов, и именно тем, что алгоритм может *задаваться* гораздо меньшим числом шагов, чем нужно для его *осуществления* (т. е. для проведения всех операций с конкретными данными). На первый взгляд это кажется парадоксальным, поскольку легко понять, что можно упустить какие-то команды при выполнении, но трудно представить себе,

откуда появятся дополнительные! На самом деле все очень просто: в алгоритмы часто входят последовательности команд, суть которых может быть выражена словами: «Повторяйте следующий шаг до тех пор, пока этого не окажется достаточным». Чтобы внести полную ясность в этот вопрос, рассмотрим следующий алгоритм отыскания двери в абсолютно темной комнате. (Для простоты предположим, что всю мебель с нашего пути любезно убрали и что дверь закрыта.) Устные наставления, которые мы могли бы дать человеку, звучали бы так: «Идите к стене, потом идите вдоль стены, пока не дойдете до двери». Это можно представить в виде следующей последовательности элементарных операций:

1. Вытяните левую руку вперед.
2. Дотронулись ли вы до стены или до двери?  
Если ДА — переходите к команде 5.  
Если НЕТ — переходите к команде 3.
3. Сделайте небольшой шаг вперед и затем приставьте другую ногу.
4. Переходите к команде 2.
5. Касаясь стены или двери левой рукой впереди себя, поворачивайтесь до тех пор, пока она окажется слева от вас.
6. Касаетесь ли вы рукой двери?  
Если ДА — переходите к команде 9.  
Если НЕТ — переходите к команде 7.
7. Сделайте небольшой шаг вперед и затем приставьте другую ногу.
8. Переходите к команде 6.
9. СТОП (или переход к следующей программе действия после того, как вы отыскали дверь).

Из этой программы ясно видно, что задание такого алгоритма обычно короче его исполнения. Если человек, когда он начинает идти, находится в 12 шагах от стены и ему нужно сделать 8 шагов вдоль нее, чтобы отыскать дверь, то он должен в целом выполнить 63 команды, т. е. в 7 раз больше, чем потребовалось для описания программы. (Внимательный читатель может заметить, что программа «работает» только в том случае, если дверь расположена на первой стене. А что делать, если дверь может быть на *любой* стене прямоугольной комнаты? Какие нужны дополнительные команды, если комната имеет необычную форму?) Следует добавить, что этот пример, демонстрирующий сравнительную краткость задания алгоритма относительно его исполнения, не может служить примером того, как можно обеспечить максимальную скорость решения поставленной задачи. Робот, как и человек, не может сделать миллион шагов в секунду. Так что в полной мере воспользоваться преимуществами быстродействия вычислительной машины можно лишь тогда, когда элементарные операции, из которых складывается поведение, могут выполняться внутри машины, в ее схемах, а не требуют «натурного» взаимодействия со средой.

Было бы мало толку от того, что машина умеет складывать миллионы чисел в секунду, если бы человеку приходилось давать ей команду на каждую из этих операций. Но если достаточно дать машине тысячу команд, чтобы она выполнила миллион, тогда использовать ее быстрдействие вполне реально при условии, что:

1) в нее можно ввести программу и данные и этому не препятствует быстрдействие ее устройств ввода и вывода;

2) у нее есть блоки, способные выполнить любую базовую операцию;

3) у нее есть схемы для выполнения необходимых тестов и для автоматической передачи управления командам, определяющимся результатами этих тестов;

4) она умеет считывать данные со своих рецепторов и посылать команды своим эффекторам.

В вычислительную машину «с рождения» записана способность реагировать на некоторые последовательности чисел, с помощью которых закодированы — не вполне естественным с точки зрения человека образом — весьма простые команды типа: «сложить числа, содержащиеся в двух указанных ячейках памяти», или «проверить, является ли данное число положительным или нет», или «считать следующий массив данных и адресовать его в такие-то ячейки». Люди обычно формулируют задачи на смеси математического и естественного родного языка, и требуется большое искусство, чтобы перевести это в необходимую последовательность команд для вычислительной машины, записанных на *машинном языке*. Для облегчения программирования люди изобрели языки, все еще сохраняющие необходимый уровень формализации и в то же время дающие возможность гораздо проще описать шаги, выполнение которых позволит машине решить поставленную задачу. В этом случае необходимо сообщить машине специальную программу, называемую *транслятором*, позволяющую ей принимать программы, написанные на этом новом языке, и переводить каждую команду более «высокого уровня» в последовательность команд на машинном языке. (Часто такие «маленькие программы», заменяющие команды более «высокого уровня», называют *подпрограммами*.) Транслятор называется *интерпретирующей системой*, если он переводит программу покомандно и, выполняя подпрограммы, соответствующие символам языка более высокого уровня, оставляет на это время задачу трансляции; если же транслятор переводит на машинный язык всю программу сразу, а затем только с помощью полученного перевода приступает к обработке данных, то такой транслятор называют *компилирующей системой*.

Например, если мы запрограммируем движения робота, у которого два ведущих колеса, то в его машинном языке могут быть следующие три команды:

- Л. Зафиксировав положение Правого колеса, повернуть Левое на один оборот.  
 П. Зафиксировав положение Левого колеса, повернуть Правое на один оборот.  
 О. Повернуть одновременно Оба колеса на один оборот.

В машинном языке могут быть также логические команды и команды управления, которые рассматриваются ниже.

Однако нам хотелось бы иметь возможность пользоваться командами типа «вперед на пять футов» или «поворот на  $30^\circ$  вправо». Предположим, что, зафиксировав одно колесо, робот делает полный оборот на  $360^\circ$  за 72 оборота другого колеса, а одновременный оборот обоих колес продвинет робота на 5 см вперед.

**У п р а ж н е н и е.** Какова ширина базы робота?

Мы можем снабдить робота интерпретирующей системой, которая сделает следующий перевод:

Вперед на  $N$  футов.

1. Положить  $x = 6N$ .
2. Выполнено ли равенство  $x = 0$ ?  
 ДА — переходите к команде б.  
 НЕТ — переходите к команде з.
3. О.
4. Замените  $x$  на  $x - 1$ .
5. Переходите к команде 2.
6. Стоп.

Поворот на  $\theta^\circ$  вправо.

1. Положить  $x = \theta/5$  (округленный до ближайшего целого).
2. Выполнено ли равенство  $x = 0$ ?  
 ДА — переходите к команде б.  
 НЕТ — переходите к команде з.
3. Л.
4. Замените  $x$  на  $x - 1$ .
5. Переходите к команде 2.
6. Стоп.

Прежде чем закончить этот раздел, заметим, что все эти алгоритмы *последовательные*, т. е. все они способны выполнять одновременно лишь одну операцию. Мозг, напротив, работает в параллельном режиме: каждый нейрон непрерывно производит тесты над нейронами, с которыми он образует синапсы, в результате чего одновременно происходят миллиарды операций. Тем не менее описание связей в схеме, выполняющей задание, определяет алгоритм не хуже, чем последовательность команд. Большая часть работ по искусственному интеллекту направлена на поиски какого-либо алгоритма, который бы позволял реализовать некоторую функцию «разумного» поведения, но при этом



обычно останавливаются на алгоритмах последовательного типа, поскольку именно для таких алгоритмов предназначено большинство современных вычислительных машин. Однако, когда мы обратимся в третьей части к теории мозга, нас будут интересовать параллельные алгоритмы, структура которых больше напоминает структуру мозга. Но как это ни смешно, свои теории мы будем обычно проверять, воспроизводя наши модели на вычислительной машине, другими словами, переводя параллельный алгоритм в последовательный. Эта стратегия поясняется на тривиальном примере на рис. 40. Для того чтобы описать собы-

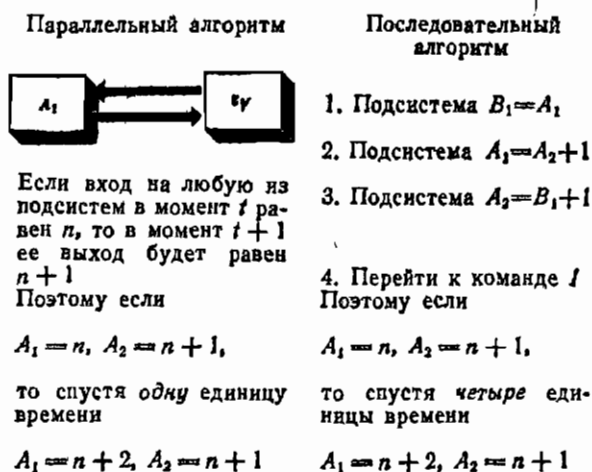


Рис. 40. Пример параллельного алгоритма, который можно моделировать с помощью последовательного алгоритма, введя дополнительный параметр состояния и замедлив процедуру в четыре раза (ср. с рис. 34).

тия, происходящие на одном-единственном шаге параллельного алгоритма, нам приходится записать целую последовательность команд, и если смотреть лишь на те результаты наших последовательных расчетов, которые относятся к концам каждого такого цикла, то мы получим как бы «замедленную съемку» параллельных расчетов.

Все сказанное выше дает нам общее представление о том, каким образом сложные функции можно сводить к некоторой структуре простейших операций.

### 3.3. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Скомандовав роботу повернуться на  $30^\circ$ , для чего он должен зафиксировать положение одного колеса и повернуть другое на 6 оборотов, мы можем рассчитывать на успех лишь при

условии, что ни одно из колес, например, не пробуксует. В противном случае управляющему устройству, или регулятору, придется передать роботу команды о дополнительных маневрах, необходимых для того, чтобы перевести его в требуемую позицию. Аналогичным образом, управляя взаимодействием системы с внешней средой, при котором всегда возможны непредвиденные возмущения, совершенно необходимо непрерывно передавать информацию от периферических рецепторов обратно регулятору, и эта информация сообщает ему, насколько эффективно он управляет осуществляемым взаимодействием.



Рис. 41. Общая схема системы, использующей для вычисления управляющего воздействия обратную связь, по которой поступает информация о текущем состоянии управляемого объекта.

Например, человеку гораздо проще схватить движущийся предмет, если он видит, насколько нужно вытянуть руку, т. е. если мозг обладает *зрительной обратной связью* от рецепторов (в данном случае от глаз) к эффектору (в данном случае к руке). Мозг сможет подобрать необходимые команды мышцам, чтобы сократить разницу между истинным и желаемым положением руки. Или еще: во время ходьбы мы существенным образом используем «обратную связь» от рецепторов глубокой чувствительности, воспринимающих давление пола на подошвы ног, в чем прекрасно мог убедиться каждый из нас на собственном опыте: когда нога «немеет» и приходится ступать без такой обратной связи, движения наши становятся неловкими и плохо координированными.

Подобная обратная связь, т. е. сравнение того, что действительно происходит, с тем, чего бы мы хотели, должна играть важную роль при управлении организмом или роботом. Общая схема системы управления с обратной связью приведена на рис. 41.

Регулятор, имеющий возможность постоянно контролировать результаты предыдущих управляющих воздействий, может их

изменять, если результирующее поведение системы в какой-то мере неудовлетворительно, скажем, из-за неожиданных возмущений окружающей среды. Например, управляя автомобилем, можно, несмотря на различия в наклоне дороги, поддерживать определенную скорость, если мы по спидометру определяем, что нужно сделать в данный момент — «прибавить газу» или притормозить.

На рис. 42 мы изобразили частный случай обратной связи — так называемую *отрицательную обратную связь*, где через  $\theta_d$

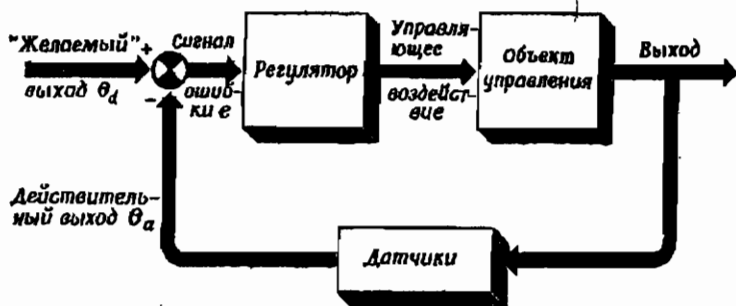


Рис. 42. Система с отрицательной обратной связью, использующая для управления сигнал ошибки  $e = \theta_d - \theta_a$ , т. е. разность между желаемым состоянием объекта управления и его текущим состоянием.

обозначено желаемое значение выходного сигнала, а через  $\theta_a$  — результат измерения истинного значения этой величины; они поступают в детектор ошибок, где вычисляется разность

$$e = \theta_d - \theta_a,$$

и этот сигнал ошибки подается в регулятор. Для каждой такой конкретной системы задача состоит в том, чтобы построить регулятор, уменьшающий погрешность  $e$  до достаточно низкого уровня.

Предположим теперь, что регулятор работает неправильно, в результате чего возникает перекомпенсация этой ошибки. Другими словами, если в начальный момент времени ошибка  $e$  была положительной, то такой регулятор «исправляет» ее на отрицательную, но еще большей величины. Естественно, что в следующий момент времени эта новая ошибка будет «исправлена» на еще большую, только положительную, и так до бесконечности, в результате чего в системе возникнут нарастающие колебания

<sup>1</sup> У читателя не должно создаваться впечатления, что для успешной работы регулятора необходимо, чтобы он сразу полностью исправлял ошибку. Действительно, в системе, где регулятор «исправляет» исходную ошибку на ошибку другого знака, но меньшей абсолютной величины, также возникают

Поэтому, конструируя регулятор, мы должны заботиться о том, чтобы получающаяся в результате система была устойчивой и чтобы при относительно постоянном входном воздействии ее сигнал ошибки достаточно быстро снижался до нуля.

Систему с отрицательной обратной связью, подобную приведенной на рис. 42, часто называют *следящей*. И именно системе управления корабля (а это типичная следящая система) мы обязаны термином «кибернетика», так как этимология этого термина берет свое начало от греческого слова «кибернетек», что означает «кормчий». Как мы уже видели, одно из важных свойств следящей системы состоит в том, что при неудачной конструкции в ней могут возникнуть нарастающие, а не затухающие колебания. И одно из прозрений Норберта Винера, заложившее основу его труда «Кибернетика», состояло в том, что именно подобными нарушениями обратной связи можно объяснить некоторые заболевания человека.

Например, на основании анализа систем с обратной связью Винер смог предсказать два типа нарушений, встречающихся у человека. А его друзья-клиницисты подтвердили существование двух заболеваний, соответствующих этим нарушениям. При одном заболевании человек не может стоять выпрямившись с закрытыми глазами и с большим трудом ходит, так как ему все время нужно смотреть на ноги, которые он поочередно выбрасывает вперед. Это заболевание называется *сухоткой спинного мозга*; оно сопровождается патологическим процессом в спинном мозгу, в результате которого центральная нервная система не получает сигналов обратной связи от суставов, сухожилий, мышц и опорных поверхностей ступней ног. При другом заболевании человек кажется здоровым, пока ничего не делает, но стоит ему, например, попытаться взять стакан с водой, как его рука начинает дрожать и дергаться так сильно, что он расплескивает воду, не донеся ее до рта. Спинальная система обратной связи такого пациента не нарушена, но у него поврежден мозжечок, и, по-видимому, это повреждение приводит к недостаточному торможению мышечной активности, а это в свою очередь — к неустойчивым колебаниям, проявляющимся в виде тремора при выполнении произвольных движений.

---

колебания, но они будут затухающими и постепенно ошибка станет сколь угодно малой. Такие колебания тоже могут быть нежелательны для некоторых систем, но в любом случае они гораздо «приятнее» нарастающих. Аналогично обстоит дело с системами, регулятор которых вызывает недокомпенсацию ошибки, т. е. вносит коррекцию, уменьшающую ошибку по величине, но не меняющую ее знака. В такой системе сигнал ошибки тоже затухает, да и колебаний, хотя бы и затухающих, в ней нет. Возможность обойтись без точной компенсации и составляет самую суть использования обратной связи. — *Прим. перев.*

Эти примеры позволяют нам убедиться в том, что одного лишь наличия обратной связи еще недостаточно и что для обеспечения плавного координированного поведения эта обратная связь не должна быть ни слишком сильной, ни слишком слабой.

После того как мы продемонстрировали важность обратной связи для задач управления, хотелось бы подчеркнуть, что в теории мозга нас будут интересовать системы, для которых сигналами служат не отдельные числа, а целые комплексы активности. Чтобы стало понятным, что мы при этом имеем в виду, займемся вкратце системой управления движениями глаз (этот вопрос более тщательно рассмотрен в гл. 7); это послужит фундаментом для изучения более общих схем управле-

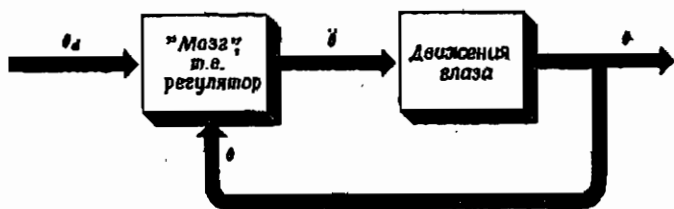


Рис. 43. Грубая схема системы управления движениями глаз.

$\theta_d$  — эрительный угол цели,  $\theta$  — угол взгляда,  $\dot{\theta}$  — угловое ускорение глаза.

ния с обратной связью, теория которых развита на основе работы Питтса и Мак-Каллока [202].

Многие авторы, пытавшиеся применить теорию управления для моделирования фиксации взгляда на неподвижном или медленно движущемся объекте, отмечали, что основную роль в этой системе играют два параметра: текущее направление взгляда  $\theta$  и требуемое направление  $\theta_d$ . После того как это было установлено, они пытались проанализировать поставленную задачу в терминах системы управления, схема которой приведена на рис. 43, при этом они задавали себе вопрос, какую функцию от  $\theta$  и  $\theta_d$  нужно вычислить, чтобы определить угловое ускорение глаза  $\ddot{\theta}$ .

Подобный подход приводил к успеху при анализе многих биологических систем, но он может оказаться совершенно непригодным там, где речь идет о деталях нейронной сети, так как в нем скрыто представление о мозге как о руководителе централизованной системы, манипулирующем небольшим числом данных, например  $\theta$  и  $\theta_d$ , отдающим директивы о необходимом значении  $\ddot{\theta}$ .

Однако мозг не получает значения  $\theta_d$  в готовом виде; оно закодировано в спайках активности целого слоя нейронов, в па-

лочках и колбочках глаза. Кроме того, для управления движениями глаза недостаточно одного сигнала управления, несущего значение  $\theta$ , поступающего на поворачивающий глазное яблоко исполнительный механизм; для этого нужно возбудить по крайней мере одну пару мышц-антагонистов, но даже для этого недостаточно двух сигналов, так как каждая мышца — это целая группа волокон, и для того чтобы она сократилась, необходима координированная активность целой популяции мотонейронов.

Поэтому, хотя и можно представить себе, как построить робот, «мозг» которого будет сконструирован по схеме централизованного преобразователя  $(\theta_a, \theta) \rightarrow \bar{\theta}$  (рис. 43), понадобится специальное устройство предварительной обработки данных, которое играло бы роль «воронки», собирающей в одно число  $\theta_a$  всю совокупность сигналов об активности сетчатки.

В действительности такая схема может оказаться полезной для робота, предназначенного для того, чтобы отслеживать одиночные цели, а не взаимодействовать со сложной средой, и имеющего в качестве эффектора только одно исполнительное устройство, для которого значение  $\bar{\theta}$  является подходящей командой управления. Однако если выходной сигнал нужно «разыграть» на целой системе мотонейронов, как это имеет место в биологии, прежде чем в результате сложных преобразований мы получим  $\bar{\theta}$ , так сказать, «в упакованном виде», то полезность централизованного процессора начинает внушать самые серьезные сомнения.

Для того чтобы сохранить особенности параллельной обработки информации, мы должны прежде всего представить себе преобразования, которым могут подвергаться целые комплексы данных. Найти знакомые примеры таких преобразований совсем не трудно. В самом деле, все мы видим, что три фигуры, изображенные на рис. 44, — это квадраты, хотя они различаются по своим размерам, ориентации и расположению. Как мы выясним ниже, изменения, необходимые для того, чтобы превратить один из этих квадратов в другой, принадлежит одной *группе преобразований* (нам придется сейчас немного заняться математикой). Даже читателям, не склонным к занятиям математикой, принесет некоторую пользу ознакомление с излагаемым здесь материалом, хотя детальный разбор его совершенно не обязателен для понимания дальнейшего изложения.

Рассмотрим прежде всего, как можно передвигать фигуры по плоскости, не поворачивая их и не меняя их размеров. В этом случае каждая точка фигуры проходит одинаковый путь, и этот сдвиг можно описать величиной и направлением *вектора*, соединяющего прежнее и нынешнее положение каждой точки.

Обозначим тогда через  $T_\alpha$  перенос фигуры, при котором каждая точка сдвигается на вектор  $\alpha$ , как показано на рис. 45.

Очевидно, что если  $\alpha$  — это вектор нулевой длины,  $\alpha = 0$ , то при соответствующем переносе  $T_0$  каждая фигура останется там

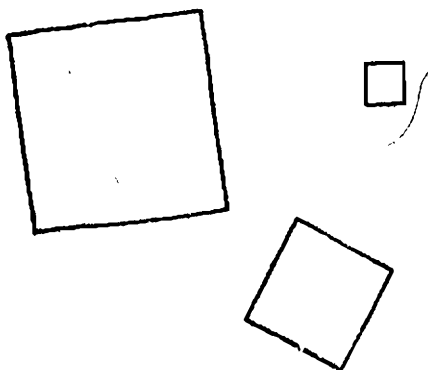


Рис. 44. Квадрат всегда квадрат всегда квадрат.

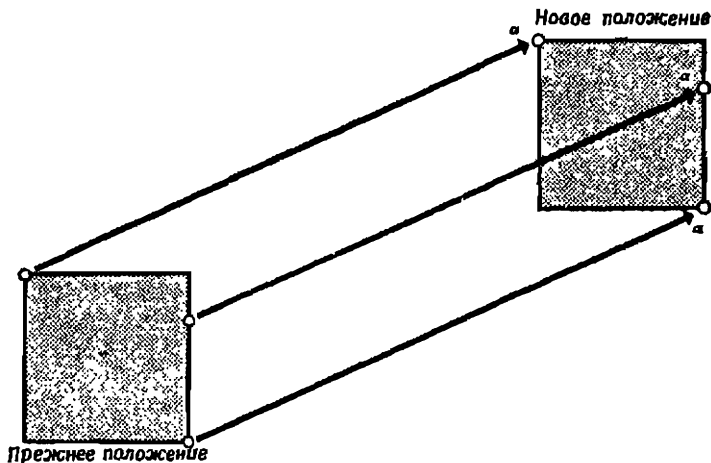


Рис. 45. Перенос  $T_\alpha$  квадрата, задаваемый вектором  $\alpha$ .

же, где она была до этого. Поэтому перенос  $T_0$  называется *тождественным* или *единичным*.

Если нам задана пара переносов  $T_\alpha$  и  $T_\beta$ , то мы можем выполнить сначала перенос  $T_\alpha$ , а затем  $T_\beta$  и получим составной перенос  $T_\beta \cdot T_\alpha$ . («Обратный» порядок этой записи объясняется

тем, что мы обозначаем через  $T_\Phi$  результат воздействия преобразования  $T$  на фигуру  $\Phi$ , а тогда преобразование, переводящее  $\Phi$  в  $T_\beta(T_\alpha\Phi)$ , следует обозначить  $T_\beta \cdot T_\alpha$ .) Как видно из рис. 46, А, преобразование  $T_\beta \cdot T_\alpha$  совпадает с переносом  $T_{\alpha+\beta}$ ,

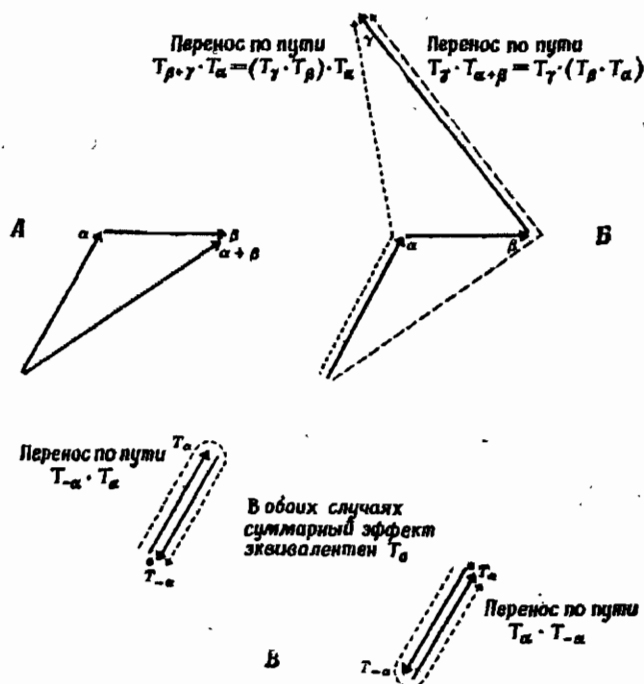


Рис. 46.

А. Если за переносом  $T_\alpha$  следует перенос  $T_\beta$ , то получается перенос  $T_{\alpha+\beta}$ . Б. Ассоциативность: последовательность переноса  $T_\alpha$ , затем  $T_\beta$ , затем  $T_\gamma$  приводит к одинаковому результату независимо от того, как сгруппировать эти три переноса. В. Каждому переносу  $T_\alpha$  соответствует обратный перенос  $T_{-\alpha}$ , компенсирующий эффект первого и приводящий к тождественному или единичному преобразованию (без каких-либо изменений)  $T_0$

определяющимся суммой векторов, задающих исходные преобразования. Другой рисунок, рис. 46, Б, показывает, что безразлично, осуществить ли сначала составной перенос  $T_\beta \cdot T_\alpha$ , а затем уже перенос  $T_\gamma$  или сначала выполнить перенос  $T_\alpha$ , а затем осуществить составной перенос  $T_\gamma \cdot T_\beta$ . И то и другое приведет к одинаковому результату, т. е.

$$(T_\gamma \cdot T_\beta) \cdot T_\alpha = T_\gamma \cdot (T_\beta \cdot T_\alpha) = T_{\alpha+\beta+\gamma}$$

Наконец, рис. 46, В показывает, что если произвести сначала перенос  $T_\alpha$ , а затем  $T_{-\alpha}$ , т. е. перенос на то же расстояние, но



в противоположном направлении, то один из этих переносов «уничтожит» эффект другого, т. е.

$$T_{\alpha} \cdot T_{-\alpha} = T_{-\alpha} \cdot T_{\alpha} = T_0.$$

Преобразование  $T_{-\alpha}$  называют *обратным* по отношению к  $T_{\alpha}$ , и его часто обозначают через  $T_{\alpha}^{-1}$ , где верхний индекс указывает на переход к обратному преобразованию.

Таким образом, на множестве всевозможных переносов на плоскости определен закон композиции, ставящий в соответствие любой паре переносов  $T_{\alpha}$  и  $T_{\beta}$  перенос  $T_{\alpha+\beta}$ , и имеется тождественное или единичное преобразование  $T_0$ , а для каждого переноса  $T_{\alpha}$  определен обратный ему  $T_{-\alpha}$ . Наконец, любая тройка переносов удовлетворяет так называемому *закону ассоциативности*:

$$T_{\gamma} \cdot (T_{\beta} \cdot T_{\alpha}) = (T_{\gamma} \cdot T_{\beta}) \cdot T_{\alpha}.$$

Поэтому множество переносов может служить примером того, что математики называют *группой*.

**Определение.** Группой называется множество  $G$  с определенной на нем операцией, ставящей в соответствие любой паре  $g_1$  и  $g_2$  элементов из  $G$  некоторый третий элемент  $g_1 \cdot g_2$  этого же множества и удовлетворяющей следующим условиям:

1. Операция, определенная на множестве, *ассоциативна*, т. е. для любых трех элементов  $g_1$ ,  $g_2$  и  $g_3$  множества  $G$  справедливо равенство

$$(g_1 \cdot g_2) \cdot g_3 = g_1 \cdot (g_2 \cdot g_3).$$

2. Множество  $G$  содержит единичный элемент, т. е. такой элемент, что для любого  $g$  из  $G$  выполняется равенство

$$g \cdot e = e \cdot g = g.$$

3. Каждому  $g$  из  $G$  соответствует обратный ему элемент  $g^{-1}$ , причем

$$g^{-1} \cdot g = g \cdot g^{-1} = e.$$

Например, множество обычных неотрицательных чисел с определенной на нем операцией сложения не является группой, поскольку обратными относительно этой операции элементами должны быть отрицательные числа. Аналогично всевозможные целые числа не образуют группы относительно операции вычитания, так как в этом случае не выполняется закон ассоциативности: если  $c \neq 0$ , то

$$(a - b) - c \neq a - (b - c).$$

Возвращаясь к преобразованиям, сохраняющим свойство фигур «быть квадратом», мы увидим, что группу образуют не только переносы, но и преобразования подобия, т. е. преобра-

зования, приводящие к изменению масштаба фигуры в  $k$  раз (где  $k > 0$ ). В этом случае единичным преобразованием служит подобие с коэффициентом подобия  $k = 1$ , не меняющее размеров фигур, а обратным относительно подобия с коэффициентом  $k$  служит подобие с коэффициентом  $1/k$ . Образуют группу и повороты. [А как по-вашему, что служит единичным преобразованием в этом случае? А обратным по отношению к заданному?]. Читатель, знакомый с евклидовой геометрией, может быть, помнит, что две фигуры называются *конгруэнтными*, если можно получить одну из другой с помощью «конгруэнтных преобразований», т. е. вращений и переносов, и называются *подобными*, если допустимая группа преобразований включает в себя не только вращения и переносы, но и преобразования подобия. Великому математику XIX в. Ф. Клейну принадлежит мысль, что любую геометрию (как евклидову, так и неевклидову и даже топологию) можно рассматривать как изучение тех свойств фигур, которые инвариантны относительно некоторой заданной группы преобразований.

С этих позиций вполне естественно заняться поиском сетей, выходные сигналы которых определяются лишь свойствами входа, инвариантными относительно некоторой заданной группы операций  $G$ . Рассматривая одну из схем, которая, быть может, лежит в основе нашей способности узнавать зрительные образы, несмотря на такие их преобразования, следует подчеркнуть очень важное обстоятельство, связанное с рис. 44: как бы мы ни смотрели на изображенные там фигуры, даже если мы станем рассматривать их по одной, различия в характере стимуляции сетчатки будут гораздо значительнее, чем сходства. Поэтому необходима дальнейшая обработка сигналов после рецепторов, направленная на извлечение этого сходства.

Питтс и Мак-Каллок [202] предложили схему, позволяющую найти преобразование  $T$  из множества  $G$ , приводящее образ  $\varphi$  к стандартному виду  $\varphi_0 = T\varphi$ . (В разд. 7.3 мы столкнемся со случаем, когда пользуются и преобразованиями выходной активности для того, чтобы привести зависимость между входом и выходом к стандартной форме.)

В работе Питтса и Мак-Каллока искомое преобразование находилось в два этапа.

1. Каждому образу  $\varphi$  сопоставлялся «вектор ошибки»  $E(\varphi)$ , который обращался в нуль тогда и только тогда, когда  $\varphi$  оказывался в стандартной форме.

2. В зависимости от вида вектора ошибки  $E(\varphi)$  выбирается преобразование  $W$ , обладающее свойством уменьшить ошибку. Другими словами, для любых образов  $\varphi$  мы требуем, чтобы вектору ошибки  $E(\varphi)$  ставилось в соответствие такое преобразование  $W[E(\varphi)]$ , что ошибка преобразованного  $W[E(\varphi)]$  образа

$\varphi$  оказывается меньше, чем для  $\varphi$ :

$$\|E\{W[E(\varphi)] \cdot \varphi\} \| \leq \|E(\varphi)\|.$$

причем выписанное выше нестрогое неравенство становится равенством только при  $E(\varphi) = 0$ . В дальнейшем мы станем обозначать  $W[E(\varphi)]$  через  $W_\varphi$ .

Основная задача построения такой схемы состоит в том чтобы найти подходящую меру ошибки  $E$ , и преобразование  $W$  которое, используя этот сигнал ошибки как обратную связь может необходимым образом управлять системой и в конце концов свести ее ошибку к нулю, т. е. привести исходный образ к стандартному виду.

Подобная схема с обратной связью может быть реализована двумя основными способами, причем Питтс и Мак-Каллок явнс рассмотрели лишь один из них.

В *баллистической* схеме структура  $W$  такова, что ошибку удается свести к нулю за один шаг, т. е. в этом случае

$$E(W_\varphi \cdot \varphi) = 0,$$

каково бы ни было  $\varphi$ .

Таким образом, управление в этом случае осуществляется следующим образом:

1) по заданному  $\varphi$  вычисляется  $E(\varphi)$ , а следовательно, и  $W_\varphi$ ;

2) вычисляется  $W_\varphi \cdot \varphi = \hat{\varphi}$ ;

3) предполагается, что  $\hat{\varphi}$  и есть стандартная форма.

Именно такую схему применяют в баллистике, где роль  $E(\varphi)$  — это отклонение пули от цели, а  $W_\varphi$  определяется наводкой в момент выстрела, поскольку вносить коррекции на промежуточных участках траектории нельзя. И в этом принципиальная разница между снарядом и управляемой ракетой, траекторию которой можно многократно корректировать.

В *схеме слежения* не обязательно, чтобы первоначальная ошибка  $E(W_\varphi \cdot \varphi)$  исправлялась сразу; достаточно, если после коррекции она стала хоть сколько-нибудь меньше, чем  $E(\varphi)$ . Мы требуем только, чтобы в результате многократной коррекции, основанной на использовании обратной связи, эта ошибка стремилась к нулю. Управление, реализующее такую стратегию слежения, может быть построено одним из двух следующих способов: 1) непрерывно изменяют образ до тех пор, пока он не приведет к стандартной форме; 2) непрерывно изменяют преобразование, пока не получат преобразование, сразу приводящее исходный образ к стандартному виду.

Приведем соответствующие программы.

1. Пусть  $\varphi$  — результат последнего преобразования входного образа.

1. Заменить  $\varphi$  новым входным образом.

2. Вычислить  $E(\varphi)$  и найти  $W_\varphi$ .

3. Вычислить новый образ  $\varphi$  в виде  $W_\varphi \cdot \varphi$ .
  4. Достаточно ли мало  $E(\varphi)$ ?  
ДА: стоп,  $\varphi$  в стандартной форме.  
НЕТ: переходите к команде 2.
- II. Пусть  $T$  — последний вариант преобразования, а  $\varphi$  фиксировано.
1. Выбрать начальное значение  $T$ , положив его равным тождественному преобразованию  $I \cdot \varphi = \varphi$ .
  2. Вычислить  $E(T_\varphi)$  и найти  $W[E(T_\varphi)]$ .
  3. Вычислить новое  $T$  в виде  $W[E(T_\varphi)] \cdot T$ .
  4. Достаточно ли мало новое  $E(T_\varphi)$ ?  
ДА: Стоп,  $T_\varphi$  в стандартной форме.  
НЕТ: переходите к команде 2.

Для обеспечения сходимости этих программ необходимо условие, более строгое, чем (1). Например, можно потребовать,

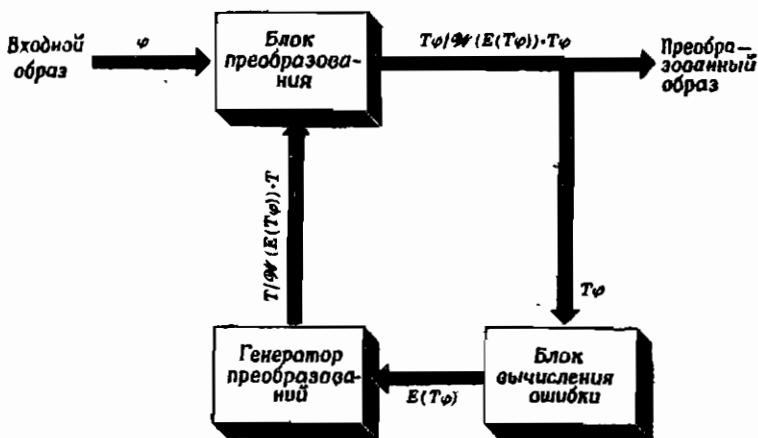


Рис. 47. Обобщенная схема Питтса — Мак-Каллока для преобразования зрительных образов к стандартному виду.

Обозначение  $T/W$  на стрелках означает, что если в момент  $t$  в этом качале сигнал был равен  $T$ , то в момент  $t+1$  он будет равен  $W$ .

чтобы при некотором  $\delta$  из интервала  $(0,1)$  и при любых возможных  $\varphi$  выполнялось неравенство

$$\|E(W_\varphi \cdot \varphi)\| \leq (1 - \delta) \|E(\varphi)\|.$$

Тогда сходимость предложенных программ следует из того, что  $(1 - \delta)^n \rightarrow 0$  при  $n \rightarrow \infty$ .

На рис. 47 приведена схема системы с дискретным временем, реализующая программу II и генерирующая для каждого  $\varphi$  преобразование  $T_\varphi$ , приводящее его к стандартной форме.

Блок, вычисляющий результат преобразования образа, в этой схеме не имеет памяти: принимая на вход образ  $\varphi$  и

преобразование  $T$ , он однозначно выдает на выходе преобразованный образ  $T\varphi$ . Нет памяти и у блока вычисления ошибки: образ  $\varphi$  на входе этого блока однозначно определяет ошибку  $E(\varphi)$ . А вот генератор преобразований является детерминированной системой: если в момент времени  $t$  его состоянием было преобразование  $T$ , а на входе был вектор ошибки  $e$ , то в момент времени  $t+1$  и состояние его и выход будут равны  $W(e) \cdot T$ .

Возможны приложения, в которых разумно применять смешанную стратегию, сочетающую в себе свойства баллистической стратегии и стратегии слежения. Например, использовать сначала генератор  $W_1$  для того, чтобы сделать «большой скачок» и подвести исходный образ достаточно близко к стандартному виду, а затем перейти к использованию генератора  $W_2$ , работающего по принципу слежения, и уже с его помощью осуществить «тонкую подстройку» образа к окончательному стандартному виду. В гл. 5 мы выскажем предположение о том, что именно такие «смешанные» стратегии лежат в основе «принципов организации» ЦНС.

### 3.4. АДАПТАЦИЯ

Сущность теории управления составляет следующая задача: «Располагая достаточно точным описанием системы и зная, что от нее требуется, найти такие воздействия, которые, будучи поданы на вход системы, обеспечат желаемое поведение (или разумное приближение к нему)».

Обычно ситуация осложняется тем, что характеристики системы, которой мы собираемся управлять, известны недостаточно точно и могут даже меняться во времени. Например, одно из наиболее интригующих свойств мозга животного в процессе роста состоит в том, что он должен уметь (и умеет) управлять телом, которое со временем не только увеличивается в размерах, но и изменяет свои пропорции. Кроме того, внешние объекты с фиксированными свойствами изменяют эти свои свойства по отношению к организму и мозг должен многократно приспосабливаться к этому. Таким образом, приспосабливаясь ли к росту тела или обучаясь взаимодействию с новыми объектами в окружающей среде, мозг должен постоянно решать то, что в теории управления называют *задачей идентификации*: «С помощью достаточного числа экспериментов, сводящихся к наблюдению за реакцией некоторой системы на известные входные воздействия, построить динамическую модель системы, обладающую аналогичным поведением».

Для теории управления процедуры идентификации очень важны. Например, представьте себе, что нужно управлять си-

стемой, динамические уравнения которой неизвестны. Тогда вместо того, чтобы конструировать регулятор, пригодный для управления лишь одной специфической системой, построим универсальное управляющее устройство, которое после регулирования некоторых своих параметров сможет управлять любой системой из достаточно широкого множества, причем отрегулированные значения параметров должны соответствовать значе-

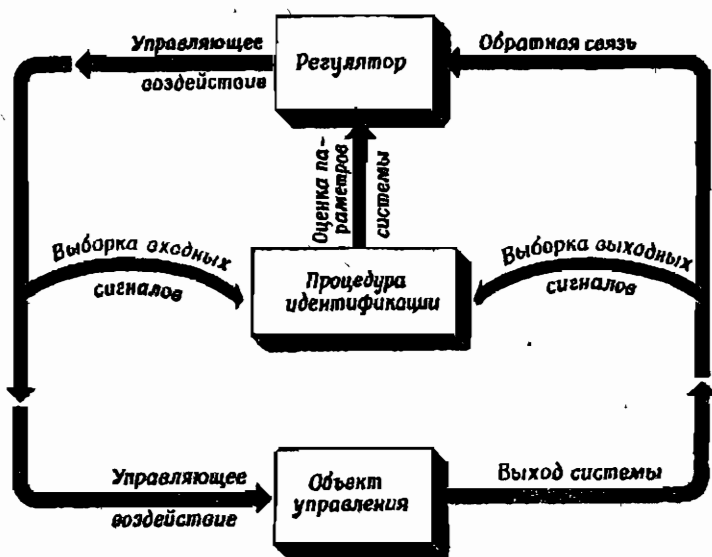


Рис. 48. Регулятор, использующий оценки параметров объекта, полученные с помощью процедуры идентификации, для того чтобы лучше управлять объектом управления (ср. с рис. 39).

нию параметров управляемой системы. После этого мы не станем подсоединять такое управляющее устройство непосредственно к объекту, а предварительно воспользуемся процедурой идентификации. (Возможности использования такой схемы при управлении движениями в мозжечке рассматривались Бойллом и Арбибом [30].) В этом случае регулятор будет все время работать, основываясь на тех значениях параметров управляемой системы, которые доставляются ему системой идентификации в качестве наилучших из числа возможных в данный момент времени оценок (рис. 48).

Если параметры управляемой системы меняются во времени относительно медленно и процедура идентификации успевает дать достаточно точные оценки параметров системы раньше, чем они изменятся, то такой регулятор будет работать хорошо,

несмотря на флуктуацию динамических свойств управляемой системы. Управляющее устройство вместе с процедурой идентификации как раз и представляет собой то, что принято называть «адаптивным регулятором» — он адаптируется (т. е. приспособливает свою стратегию управления) к изменениям динамики объекта управления.

Заметим, не останавливаясь на этом подробнее, что в ряде случаев бывает необходимо, чтобы процедура идентификации генерировала некоторые входные воздействия и для объекта управления, т. е. посылала на его вход сигналы — тесты для проверки различных гипотез о значениях его параметров. В этом случае придется искать компромисс между снижением качества управления вследствие того, что мы не располагаем достаточно точными оценками параметров управляемой системы, и снижением качества управления, связанным с тем, что регулятор время от времени передает управление объектом процедуре идентификации.

Другими словами, «мозг» (т. е. регулятор + процедура идентификации) взаимодействует с «внешней средой» (включая и собственное тело, а не только внешние объекты), используя для этого внутреннюю модель (описываемую самым последним набором параметров адаптации), и это взаимодействие должно обеспечивать коррекцию внутренней модели, а также изменение взаимоотношений с внешним миром в желаемом направлении.

Теория управления оказалась в состоянии предложить некоторые алгоритмы идентификации, позволяющие на основании наблюдений за относительно простым внешним поведением системы находить компактное описание ее внутренних процессов. Однако необходимо помнить, что эти алгоритмы эффективны только тогда, когда «размерность» системы довольно мала. Нам много еще придется заниматься теорией, прежде чем мы найдем такие глобальные параметры состояния организма, которые дают возможность воспользоваться этими алгоритмами или приближенными методами, позволяющими исследовать системы, не вдаваясь во все их сложности. В то же время перед экспериментаторами стоит задача отыскать такие интересные для нас подсистемы, для которых возможно точное и строгое использование существующего теоретического задела.

Для того чтобы продемонстрировать, как процедуры идентификации могут помочь в управлении системой, например помочь мозгу управлять необыкновенно сложными взаимодействиями с внешним миром, расскажем в общих чертах о процедуре идентификации, использованной Сэмюэлом [221] в его ранних работах по составлению программ игры в шашки. Поскольку никто не знает точных рецептов, следуя которым можно наверняка выиграть при игре в шашки, Сэмюэл составил про-

грамму так, чтобы вычислительная машина просматривала последствия каждого хода на несколько ходов вперед и на основании этого выбирала наилучший ход. (В программу были заложены также некоторые правила сокращения перебора ходов, для которых нужно вести расчет, потому что даже машина, способная выполнять миллионы операций в секунду, может испытывать недостаток времени. Эти правила имеют прямое отношение к методам эвристического поиска, о которых мы будем говорить в разд. 4.2.)

Таким образом, стоявшая перед Сэмюэлом задача заключается в том, чтобы найти для вычислительной машины способ численной оценки позиций, возникающих на шашечной доске. Если попросить человека сделать такую численную оценку, то он, возможно, сможет из шести разных позиций, представленных на рассмотрение, выбрать одну, наилучшую, и другую, самую худшую, но сказать что-нибудь вразумительное относительно четырех остальных ему будет гораздо труднее. А такая оценка недостаточно точна для того, чтобы ею могла воспользоваться вычислительная машина. Человек просто не прибегает, во всяком случае сознательно, к численным оценкам, нужным машине, и поэтому, как бы мы ни допрашивали гроссмейстеров, таких чисел нам не получить. (Впрочем, использование методов многомерного шкалирования может, вероятно, дать некоторое представление об этом.) Поэтому мы станем решать эту задачу с позиций теории адаптивного управления. Хотя мы и не имеем представления о том, с помощью какой функции оценивать возникающую на доске позицию, нам по крайней мере известно, что искомая оценка зависит от таких параметров, как число шашек у каждого игрока, число дамек, равновесие на доске, подвижность позиции каждого, контроль за центром и т. п. И дать каждому из этих параметров численную оценку не представляет особого труда. Выберем в результате бесед с игроками в шашки 16 таких параметров, играющих центральную роль в оценке позиции на доске.

На рис. 49 дано наглядное представление для двумерного случая. Здесь каждой паре значений параметров соответствует точка  $(x_1, x_2)$  на горизонтальной плоскости, а соответствующая оценка изображается точкой, лежащей от нее на расстоянии  $z = f(x_1, x_2)$  по вертикали. Если точка  $(x_1, x_2)$  перемещается по плоскости, то  $z = f(x_1, x_2)$  описывает некоторую поверхность, которую мы назовем *оценочной поверхностью*. На этой поверхности немало неровностей, но тем не менее она не так уж сильно отличается от некоторой плоскости, которую мы будем называть *оценочной плоскостью*. Из математики известно, что всякая плоскость описывается уравнением вида  $z = \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 - \theta$ , где  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $\theta$  должны иметь подходящие значения.



Аналогично, какой бы «ухабистой» ни была оценочная «поверхность» в 17-мерном пространстве<sup>1</sup>, которая каждой комбинации значений оценочных параметров ставит в соответствие глобальную оценку позиции на доске, мы все же можем надеяться, что для нее существует хорошая аппроксимация в виде плоскости и что эта аппроксимация позволит машине играть достаточно хорошо. Другими словами, мы можем надеяться найти хорошую

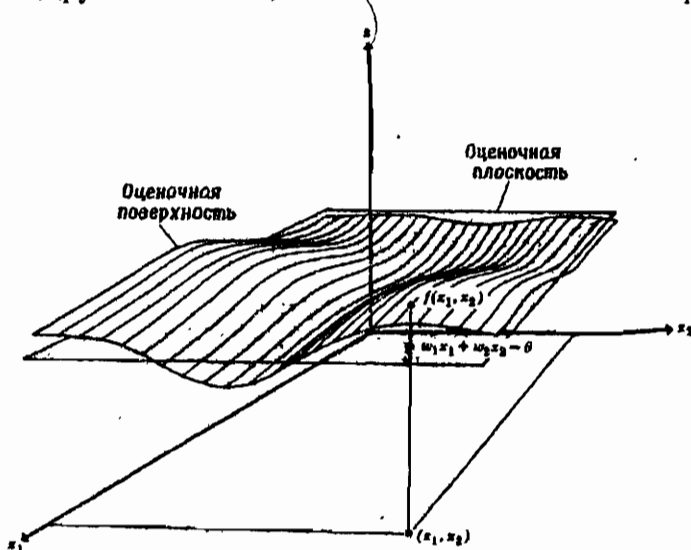


Рис. 49. Здесь показано, как с помощью плоскости (линейной поверхности) можно аппроксимировать нелинейную поверхность.

Для каждой пары параметров  $(x_1, x_2)$  истинная оценка  $f(x_1, x_2)$  приближается линейной комбинацией  $w_1x_1 + w_2x_2 - \theta$ .

оценочную функцию вида  $z = w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_{16}x_{16} - \theta$  (называемую линейным приближением) при подходящем выборе 16 весов  $w_1, \dots, w_{16}$  и  $\theta$ . На самом деле для сравнения двух позиций постоянная  $\theta$  не существенна, поскольку она добавляет ко всем оценкам одинаковую величину, но не меняет их разности, и, значит, нам нужно найти лишь 16 чисел, чтобы получить наилучшее линейное приближение.

Таким образом, с позиций теории систем стратегия, принятая Сэмюэлом [221] в его первой статье, состояла в том, чтобы не только произвольно обрывать просчет позиции, но и *предположить*, что функцию оценки можно аппроксимировать линейной. Последнее было не более чем догадкой, которая могла

<sup>1</sup> Координатами этого пространства являются 16 выбранных оценочных параметров и значение оценочной функции. — Прим. перев.

оказаться совершенно бесполезной, но он положился на это допущение и стал исходить из того, что плоскость даст достаточно хорошее приближение 16-мерной оценочной поверхности и что, следовательно, единственное, что ему остается сделать, это определить 16 весовых коэффициентов, от которых зависит ориентация оценочной плоскости в 17-мерном пространстве.

Пусть в машине имеются текущие значения весовых коэффициентов линейной оценочной функции и она выбирает ход, который, по ее мнению, ведет к позиции с довольно высокой оценкой. Если через несколько ходов после этого выяснится, что игра развивается неудачно и что выбранная стратегия была, по-видимому, переоценена, машина уменьшает значения весовых коэффициентов при тех оценочных параметрах, которые свидетельствовали в пользу выбранного плана игры, и увеличивает их значения при параметрах, которые свидетельствовали против него. Конечно, на самом деле все гораздо сложнее, но существенно лишь то, что Сэмюэлу удалось написать программу, позволявшую вычислительной машине сравнивать свой прогноз с тем, что получалось на доске через несколько ходов в действительности, и соответственно регулировать коэффициенты оценочной функции. Первая шашечная программа Сэмюэла играла не слишком сильно, и это свидетельствовало о том, что линейная оценочная функция не так уж хорошо приближает «реальную». Позднее Сэмюэл [222] воспользовался значительно более сложной оценочной функцией, которую он назвал «таблицей сигнатур»; кроме того, он заложил в программу довольно богатую библиотеку из образцов лучших шашечных партий, сыгранных человеком, и все это вместе позволило программе достигнуть уровня мастера.

Итак, мы познакомились с задачей, в которой качество работы вычислительной машины можно значительно повысить, если вначале предложить ей целый класс возможных стратегий решения, а затем с помощью процедуры идентификации корректировать значения относительно небольшого числа параметров, заставляя машину адаптироваться к конкретным потребностям текущей ситуации. Аналогичные схемы адаптации используются, по-видимому, и в обучении человека после того, как найдена соответствующая структура в центральной нервной системе, в которой может осуществляться необходимая коррекция. Например, обучаясь водить автомашину, мы слышим вначале от инструктора слова, в определенном смысле аналогичные той программе, которую вводил Сэмюэл в свой шашечный автомат. (В других ситуациях такой готовой схемы, требующей лишь уточнения параметров, нет, и именно в этом случае мы начинаем говорить о творчестве.) Запомнив эту «программу», человек не начинает сразу же прекрасно управлять автомобилем,

ему нужно еще скорректировать массу параметров. Ведь увидя помеху справа, мало просто повернуть налево, необходимо еще почувствовать, насколько именно нужно повернуть руль.

Сказанного выше достаточно, чтобы понять, что многие и взаимодействия мозга с окружающей средой могут быть квалифицированы как процедуры идентификации. И чтобы лучше разобраться в некоторых тонкостях подобных процессов, обратимся к следующему примеру.

Представьте себе, что вам нужно приподнять на 15 сантиметров куб, лежащий на столе. Если по внешнему виду кажется, что куб полый и сделан из стали (рис. 50), то можно предположить, что он достаточно легкий и его можно поднять

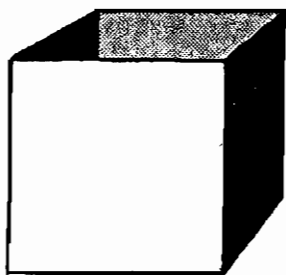


Рис. 50. Полый ли этот стальной куб?

одной рукой. Однако, если на самом деле дно куба, закрытое от вас передней стенкой, залито свинцом, он может оказаться слишком тяжелым и попытка поднять его одной рукой не увенчается успехом. Эта неудача заставит вас в корне изменить свои представления о весе куба и изменить свою стратегию, т. е. поднимать куб двумя руками. И наоборот, если, несмотря на свой обманчивый вид, куб состоит из легкого проволочного каркаса, обтянутого тонкой алюминиевой фольгой, сила, с которой вы потянете его вверх, окажется чрезмерной и вы рванете куб гораздо выше, чем намеревались, так что потом придется опускать его до выбранного уровня. Таким образом, в дополнение к различным механизмам обратной связи (разд. 5.2), позволяющим плавно корректировать незначительные промахи двигательной системы, должны существовать и механизмы более высокого уровня, отвечающие за то, чтобы мы вообще «не ошиблись адресом», и только это позволит успешно взаимодействовать со средой. Кассетная метафора, с которой мы познакомимся в разд. 4.1, даст некоторые представления о том, как это можно делать (см. также разд. 5.5). Пример с подниманием куба (рис. 50) привлекает внимание к нескольким важным вопросам.

1. Необходимо понять, что имеющийся объект — это ящик, и из многих возможных взаимодействий с ящиком выбрать то, которое требует его поднимать.

2. Организм должен решить, какое поведение эффекторов обеспечит необходимое воздействие на ящик, в результате которого будет достигнута поставленная цель.

3. Мозг должен вычислить необходимые сигналы и послать их в спинной мозг, с тем чтобы мотонейроны могли реализовать сокращение необходимого набора мышечных волокон, обеспечивающее требуемое поведение эффекторов.

К такой декомпозиции на три стадии нужно отнестись с определенной осторожностью по причинам, о которых пойдет речь ниже.

1. Эти три стадии могут, по крайней мере частично, выполняться одновременно. Как мы узнаем из разд. 7.2, в мозгу лягушки, по-видимому, «запаяны» такие структуры, что она вообще не нуждается в стадиях 1 и 2. У нас нет оснований считать, что лягушка сначала распознает муху, затем решает схватить ее, затем выбирает подходящую траекторию для языка и, наконец, вычисляет последовательность нейронных команд, реализующих схватывание мухи. Нам кажется, что лягушка вообще не может распознать муху (или «дрожащий» объект), если она не произведет соответствующей ориентации или не нападет на нее. [Здесь нужно сделать два предостережения: а) передний мозг может изменить поведение лягушки: она не станет раз за разом нападать на шмелей; б) приходится признать, что парализованная лягушка, распознает муху, поскольку нейроны, которые в норме управляют реакцией нападения, приходят у нее в возбужденное состояние. В общем тезис состоит в том, что восприятие объекта (по крайней мере на довербальном уровне) состоит в получении доступа к программам взаимодействия с ним, а не в обязательном осуществлении хотя бы одной из таких программ. Мы еще вернемся подробнее к этому тезису в разд. 6.1.]

II. Заметим, что даже тогда, когда человек ясно сознает, какой именно объект находится перед ним и что он собирается с ним делать, *осознанная* оценка (т. е. оценка, которую можно выразить словами) параметров объекта вроде его веса совсем не обязательна. Вполне достаточно, чтобы распознавание и принятое решение приводили к такому выбору путей от рецепторов к эффекторам, который обеспечит действие эффекторов в соответствии с имеющимися значениями существенных параметров. Эту мысль можно развить, задав себе вопрос, а что случилось бы, если бы мы сообщили Сэмюэлу 16 чисел  $w_1, w_2, \dots, w_{16}$ , используемых его программой. По-видимому, сам Сэмюэл не стал бы от этого лучше играть в шашки. Обычно отсюда приходят к выводу, что эти числа не имеют ничего общего с тем, как

играет сам Сэмюэл, и что, следовательно, весь этот поиск по дереву решений, все эти численные оценки и коррекция весовых коэффициентов не имеют ничего общего с тем, как играют люди. Именно поэтому знание весовых коэффициентов не поможет Сэмюэлу. Однако рассмотрим один не вполне обычный довод, который, хотя я и *не думаю*, чтобы он оказался верным в данном конкретном случае, позволяет несколько лучше понять, с чем нам приходится сталкиваться при моделировании работы мозга. Представьте себе, что ваш мозг работает как нейронная сеть, которая, получив информацию о позиции на доске, не рассматривает шаг за шагом сначала последствия одного хода, затем другого и т. д., а вместо этого, «ухватив» всю позицию как нечто целое и «записав» ее в несколько нейронных структур, одновременно вносит в каждый из полученных образов какие-то разные возмущения, а затем организует взаимодействие задействованных структур, и так до тех пор, пока не придет к конечному результату без какой-либо помощи со стороны централизованного управления. Предположим теперь (но я подчеркиваю, что это делается лишь в качестве аргумента в споре, а на самом деле в мозгу нет такого простого соответствия), что в таком мозгу существуют 16 регулируемых синапсов, роль которых в точности соответствует роли 16 весовых коэффициентов в программе Сэмюэла! В таком случае, даже если сообщить Сэмюэлу точные значения весов соответствующих синапсов, он не сможет воспользоваться этим явным знанием для того, чтобы отрегулировать значения этих весов, и самое лучшее, что ему останется, — это по-прежнему регулировать их, играя партию за партией. (Независимо от ценности приведенной аргументация она лишняя раз напоминает нам о том, что современные машины работают почти исключительно в последовательном режиме, а мозг функционирует почти исключительно в параллельном.)

III. Однако люди иногда пользуются для обработки информации алгоритмами более высокого уровня и воздерживаются от действий, прежде чем не проанализируют незнакомый предмет, который нужно поднять. Например, человек скажет себе: «Гм, это похоже на два стула, связанных вместе, и, значит, весит примерно как стол», и только после этого начнет возбуждать в выходных нейронных структурах активность, подобную той, которая потребовалась бы для того, чтобы поднять соответствующим образом стоящий стол. Эта способность использовать «декомпозицию» и «построение аналогий» для оценки системы, избавляющая от необходимости прибегать к физическим экспериментам с ней, является очень важной чертой человеческого поведения. Предвесники такой способности можно найти и у животных, и, как нам кажется, именно на этой основе возник язык.

IV. В наших рассуждениях важную роль играют соображения «деенаправленности». Если вы решили поднять стул, то детали его конструкции и материал обивки несущественны, а его вес—важнейший параметр. И, напротив, если вы собираетесь нарисовать этот стул, то его вес не будет иметь никакого значения, а первые два признака станут весьма существенными. Мы стараемся обращать внимание только на те свойства объекта которые важнее всего с точки зрения немедленного или будущего взаимодействия с ним. В сущности часто мы даже не воспринимаем объект как таковой, а лишь отмечаем его отдельные черты. Так, на стадии I описанного выше процесса мы можем вовсе не воспринимать ящик как таковой, а лишь решить, что его нужно поднять, например для того чтобы подстелить под него скатерть.

Итак, для того чтобы система могла успешно взаимодействовать со сложной средой, ей необходима широкая «информационная база» или «внутренняя модель мира», но полезность даже относительно простой модели мира можно во много раз увеличить, если предусмотреть возможность коррекции параметров, осуществляющих адаптацию модели к новым или изменившимся обстоятельствам.

## Глава 4

### ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ РОБОТОВ

Согласно одному из возможных определений, исследование по искусственному интеллекту состоит в том, чтобы составить программу для вычислительной машины, имитирующую разумное поведение, т. е. поведение, которое нам показалось бы поведением разумного существа, если бы мы не знали, что все это делает машина. К сожалению, стоит лишь уяснить себе, как можно составить программу для решения на машине какой-то задачи, и сразу возникает внутреннее сомнение в том, что эта задача — творческая и требует для своего решения интеллекта. Возможно, что загвоздка заключается именно в последних словах: «...требует... интеллекта». Мы привыкли говорить об интеллекте как о чем-то едином, позволяющем человеку тонко реагировать на изменения внешнего мира и приспособлять свое поведение к этим изменениям. Но разве нельзя себе представить интеллект не как что-то единое, а как целый спектр переплетающихся свойств, каждое из которых в отдельности отнюдь не вызывает особого восхищения, но при проявлении одновременно достаточно большого числа которых наше поведение приобретает характер разумного?

Тьюринг [247] отметил, что он без колебаний назвал бы поведение машины разумным, если бы она выдержала экзамен, подобный описанному ниже. Представьте себе, что экзаменатор находится в комнате с двумя телетайпами, по которым он разговаривает с двумя системами, известными ему только как А и Б. Одна из них — человек, а другая — машина. Так вот, если экзаменатор после того, как он задаст системам достаточное число вопросов, не сможет достаточно уверенно сказать, какая из систем — человек, а какая — машина, мы согласимся считать поведение такой машины разумным. Однако, если только мы не будем догматически настаивать на том, что всякое разумное поведение обязательно должно быть человекоподобным, легко понять, что машине гораздо труднее выдержать «экзамен» Тьюринга, чем вести себя разумным образом. Например, вычисли-

тельная машина умеет быстро и безошибочно решать арифметические задачи, однако для того, чтобы машина выполняла подобные задачи как человек, т. е. медленно и с ошибками, придется составлять гораздо более сложную программу. Или если мы потребуем от систем описать, как они выглядят в голом виде, то машине будет гораздо проще описать человеческое тело, чем воспроизвести замешательство и уклончивые ответы застенчивого человека!

Другими словами, для того чтобы обладать «разумом», система должна обладать многими функциональными способностями человека как решателя задач, но вряд ли разумно требовать от нее умения сойти за человека. Естественно, что это понимал и Тьюринг. Его цель состояла не в том, чтобы найти необходимые условия разумности, а в том, чтобы придумать такой экзамен, сдав который вычислительная машина убедила бы самых закоренелых скептиков в том, что разумные машины существуют, и чтобы свести обсуждение этого экзамена к обсуждению проблемы искусственного интеллекта. (Однако, если бы машина действительно выдержала такой экзамен, настоящего скептика невозможно было бы убедить, что за вторым пультом телетайпа сидел не человек.)

Итак, в разд. 4.1 мы рассмотрим несколько свойств поведения, без которых его, по-видимому, нельзя считать разумным, и привяжем их к нашим представлениям о существовании внутренней модели внешней среды. Затем в разд. 4.2 и 4.3 мы рассмотрим два направления исследований: теорию эвристического поиска и анализ ситуаций, что позволит нам позже в разд. 4.4 понять, как оба эти направления можно объединить в конструкциях «разумных роботов».

#### 4.1. ВНУТРЕННИЕ МОДЕЛИ И РАЗУМ

В разд. 2.1 мы уже имели случай утверждать, что восприятие (в соответствующем глубоком смысле) ориентировано на действие или деенаправлено. В настоящем разделе мы пойдем дальше и допустим, что для сложных систем в изменяющейся обстановке восприятие просто неотделимо от памяти. Восприятие можно тогда рассматривать как синтез частично прогнозирующей внутренней (кратковременной) модели, в построении которой участвует и долговременная память, что позволяет использовать прошлый опыт.

Если я войду в комнату и в глаза мне упадет свет, отраженный от какой-то поверхности (пусть это будет крышка стола), то я пойму, что если ударить в этом направлении кулаком, то рука не пройдет насквозь, послышится глухой звук и в руке возникнет ощущение боли. Однако если мы захотим сконструировать



ровать робот, обладающий восприятием, то неожиданно окажется, что подобное восприятие вовсе не так просто, как кажется на первый взгляд. Ведь роботу на основании лишь того, что поверхность отражает свет, придется предсказать, выдержит ли она определенный вес или нет, из какого материала она сделана, каково ее положение относительно эффекторов робота, а также многое другое, помогающее оценить реакцию объекта на контакт с роботом.

Конечно, можно построить дальномер, чтобы машина могла локализовать поверхность (найти, где она находится), но ей нужно еще и «знать», какие различные операции с объектом могут быть уместны. Человек может, взглянув на белую поверхность, сразу понять, что это блюдо с мороженым, а значит, уместное действие состоит в том, чтобы взять ложку и начать его есть. Взглянув на белую поверхность в другой ситуации, он так же быстро сообразит, что это блокнот и что подходящее действие в данном случае — приподнять большим пальцем руки свободный угол верхнего листка, прижимая при этом указательным пальцем соседний участок бумаги, а затем, подтягивая большой палец к указательному, ухватиться за угол листка и, потянув его вверх, оторвать от корешка. Уже само это длинное нудное описание (а таких примеров можно привести сколько угодно) наводит нас на мысль, что машине, хоть в какой-то мере воспроизводящей сложность человеческого поведения, потребуется необъятная библиотека программ, описывающих, что нужно делать в той или иной ситуации.

Дело здесь не только в многочисленности ситуаций, поскольку даже достаточно подробная последовательность действий вроде описанной в последнем примере требует для своей реализации (по крайней мере у животных) определенным образом организованных сокращений миллионов отдельных волокон, входящих в состав мышц, управляющих движениями плеча, локтя, кисти, пальцев и т. д. В разд. 5.5 мы выскажем предположение о том, что эволюция нервной системы носит в определенном смысле иерархический характер и что по мере появления новых уровней в этой иерархии сложные движения и взаимодействия с окружающей средой становятся более подвластны организму. Такие операции, как захватывание предметов большим и указательным пальцем или движение руки в заданном направлении, используются во многих различных сочетаниях, но при этом не приходится обучаться реализации этих основных движений с помощью активности мышечных волокон для каждого отдельного сочетания (впрочем, как показывает изучение мозжечка, возможно, что наиболее тонкому согласованию отдельных элементов все же приходится обучаться для каждого сочетания по отдельности, хотя и на подсознательном уровне).

К вопросу об иерархии управления мы еще вернемся в разд. 4.4, где пойдет речь об интегральном роботе.

Независимо от этих тонких деталей реализации ясно, что по мере взаимодействия человека с внешним миром он накапливает обширные знания о таких его аспектах, как использование языка, значение разных выражений лица, назначение орудий труда и построек, которые не «заданы» ему генетически (хотя, как мы увидим в разд. 8.1, возможности для такого накопления могут быть и заданными). Можно сказать, что человек создает свою *модель мира*, позволяющую ему по частичной информации, приходящей из этого мира, например по свету, отраженному от поверхности стола, предсказывать (с разной точностью, поскольку мы не претендуем на непогрешимость; см.

Рис. 51. Куб Неккера.

Где находится вершина куба, обведенная кружочком, — ближе к нам или дальше? Посмотрите на рисунок подольше.

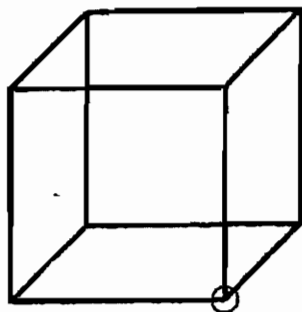


рис. 51) результаты различных взаимодействий с текущей внешней средой, например другую сенсорную информацию, которую можно было бы получить от имеющегося источника стимуляции, скажем ощущение текстуры поверхности стола, если дотронуться до нее пальцами. Очевидно, что для того, чтобы такая «модель» была хоть в какой-то степени полезна, мир, который она моделирует, должен обладать большой «избыточностью». Было бы бесполезно «знать», что все столы, которые нам довелось видеть, твердые на ощупь, если они были твердыми только иногда.

Нам кажется также, что вся внутренняя активность — за возможным исключением такой абстрактной ее формы, как речевая активность человека, постоянно привязана к тому, что мы называем естественной системой координат действия, а именно к некоторому эталону, связанному с позой и активностью системы, причем управление позой помогает стабилизировать активность, создавая возможность для исследования системой внешней среды с помощью своих рецепторов. Весь репертуар возможных действий системы и возможных вопросов, на которые ей приходится «отвечать», помогает определить наилучшую

форму внутреннего кодирования информации. Обзор наших сегодняшних, довольно примитивных представлений о таком кодировании дан в гл. 6.

Все это созвучно с идеями, излагавшимися в разд. 2.1, где мы говорили, что восприятие ищет ответ не столько на вопрос «что?», сколько на вопросы «в какой взаимосвязи?» и «где?». Выделение пространственных отношений из общей совокупности отношений не следует рассматривать как результат волюнтаристской декомпозиции процесса восприятия. Функции восприятия, связанные с вопросом «что делать?», действительно кажутся принципиально иными, нежели функции, связанные с вопросом «где?», и даже управляют этими двумя функциями разные отделы мозга, в чем мы убедимся в разд. 6.3, хотя обе они объединяются в (оперативной) модели.

Главную роль в приобретении любого навыка играет обучение тому, что считать наиболее важной чертой рассматриваемой ситуации. Поэтому можно предположить, что в некоторых случаях при обучении мы, вместо того чтобы выучить структуру сенсорного входа, пытаемся узнать, какой вопрос следует задавать об этой структуре, или, другими словами, на какую ее черту или стимул нужно обратить особое внимание. Например, крыса в лабиринте не просто соотносит свои ответы с предъявляемыми ей стимулами, а осуществляет сложную мышечную деятельность, подвергаясь при этом непрерывной бомбардировке массой сенсорных данных. Крыса может прекрасно помнить, как она добралась до пищи в одном из испытаний, и тем не менее не добралась до нее в следующем, так как не знает, что привело ее к пище — еле уловимый запах, следы на полу, направление, определенная структура мышечной активности или знак на дверце. Поэтому, даже если крыса «прекрасно» запоминает все, что происходит при каждом испытании, может понадобиться множество испытаний, прежде чем она научится не обращать внимания на несущественное и последовательно использовать тот тип примет, который использовал экспериментатор для того, чтобы указать путь к пище. В экспериментах по обучению животных бывают периоды, когда никаких успехов не наблюдается, а затем происходит резкий скачок вверх, как если бы животное напало на новую стратегию или научилось обращать внимание на какую-то важную черту экспериментальной ситуации. Опираясь на эти соображения, можно предположить, что обучение представляет собой процесс накопления, при котором обучаемый экономит время, научаясь применять используемую им стратегию ко все меньшему числу несущественных признаков, синтезировать новые признаки и изменять стратегии. Все, что может указать крысе на то, какой аспект стимулирования является главным, ведет к практически мгновенному обуче-

нию — путем направления внимания в нужную сторону, а не путем конкретных указаний о местоположении пищи. Возможно, что именно такой «фокусировкой внимания» и можно объяснить эффект «инъекционного обучения», который, по утверждению некоторых ученых, можно получить, впрыскивая необученному животному экстракт головного мозга обученного. В качестве менее экстравагантного соображения заметим еще, что главная польза от языка заключена в его способности направлять (или отвлекать!) внимание слушателя.

Очевидно, что если система может воздействовать на окружающую среду и добиваться от нее желаемой реакции (например, воздействием может быть смыкание зубов в области пространства, где по данным ваших органов чувств находится красновато-зеленый предмет, а реакцией — кусок яблока у вас во рту), то можно считать, что система «смоделировала» некий аспект этой среды (в нашем случае определила, что яблоко «правильно» расположено в пространстве). Соответствующая модель может быть генетически заложена в мозгу организма или записана в программе робота. Не следует упускать из виду, что *плюс* к этому системам, взаимодействующим со сложной средой, понадобится и способность изменять эту «модель», включая в нее ранее не учтенные аспекты среды, которые, например, стали существенными лишь за последнее время. По этой причине полезно различать два основных типа моделей. Модели первого типа охватывают взаимоотношения организма с его непосредственным окружением, это *кратковременная (оперативная) память (КП)* или *кратковременная (оперативная) модель (КМ)*. Например, если речь пойдет о читателе, такая модель может охватывать ваши представления о том, что вы еще не добрались до середины книги, ваше представление о характере комнаты за вашей спиной и сознание, что в течение следующих суток вы договорились встретиться с кем-то в назначенный час и в назначенном месте. Такой памяти можно противопоставить *долговременную (или постоянную) память (ДП)* или *модель (ДМ)*, в которой заложены постоянные свойства окружающего мира, например способность узнать яблоко, или ездить на велосипеде, или вспомнить подробности вашего дня рождения, когда вам исполнилось шесть лет.

Между прочим, важно различать приобретение *навыков*, о чем по сути дела и шла речь при обсуждении долговременной памяти, и запоминание *событий*. Навык может формироваться в результате эволюции или в результате накопления опыта «настройки» сенсомоторной координации, как при вождении автомобиля. Нам хотелось бы подчеркнуть, что в приобретении навыка запоминание событий играет совершенно второстепенную роль аналогично тому, как для шашечного автомата

Сэмюэла (разд. 3.4) память на события (т. е. доступ к библиотеке гроссмейстерских партий) играет второстепенную роль по сравнению с возможностью корректировать критические параметры, значения которых отражают кумулятивный эффект игры в целом, а не преимущества или недостатки отдельного хода.

Значение оперативной памяти, которую, как нам хотелось бы подчеркнуть, мы не рассматриваем как аналог «магнитофона» для записи недавних входных воздействий, заключается в том, что она осуществляет синтез (черпая недостающую информацию из долговременной памяти) того пространственно-операционного эталона, на фоне которого рассматриваются все другие события. Благодаря этому система (человек, животное или робот) не привязана в своих действиях к «сиюминутным» сенсорным данным, а может принимать решения, которые в переводе на человеческий язык выглядели бы следующим образом: «Мне нужно быть на работе через 15 минут (КП). В этом автобусе слишком много народа (непосредственная переработка сенсорного входа с помощью долговременной памяти для узнавания толпы и т. п.). Терпеть не могу толкаться в такой толпе (ДП). Лучше пойду пешком (смотрит на часы). Ох, если побежать, то можно успеть на троллейбус (бежит, вскакивает в троллейбус, едет на работу)». Читатель без труда разовьет этот пример, добавив сюда еще несколько скобок. Суть его в том, что наш герой пользовался моделью мира для того, чтобы спланировать свое будущее поведение. Например, в приведенном отрывке в неявном виде сквозила мысль о том, что успеть на работу вовремя более вероятно, если поехать на троллейбусе, чем если пойти пешком.

Слово «модель», которое мы постоянно употребляем, не следует понимать слишком буквально. Мы не столь наивны, чтобы предположить, что, будь у нас возможность заглянуть в кору головного мозга ребенка, мы обнаружили бы там подробную копию мира в целом, а, рассмотрев ее при большом увеличении, нашли бы манекены, изображающие членов его семьи и друзей. Мы просто представим себе нейронную сеть, изменяющуюся под влиянием опыта таким образом, что если последовательность спайков на входе этой сети содержит в себе в закодированном виде некоторый вопрос об окружающем мире, то последовательность спайков на ее выходе будет содержать ответ на этот вопрос, и системе при этом не нужно в промежутке заниматься исследованием реального мира. С течением времени вычислительная машина в нашей голове настраивается таким образом, что наши действия становятся все более приспособленными к целому ряду свойств внешнего мира, помимо тех, которые действуют на наши органы восприятия в данный момент.

Иными словами, выражение «модель» в контексте «внутренняя модель мира» нужно понимать в самом абстрактном, а не в конкретном смысле. Мы уже провели различие между ДМ как собственно внутренней моделью мира, в которой собраны его свойства, отражающие наш прошлый опыт в форме, помогающей организовать настоящее поведение и улучшать саму модель, и КМ как одной из внутренних моделей, описывающих текущее «окружение». Мы воспринимаем не только то, что находится у нас перед глазами. Если мы находимся в комнате, то мы воспринимаем свое присутствие в ней вместе со всеми находящимися в ней вещами; это позволяет нам, например, взять предмет, находящийся позади нас, который мы заметили прежде, не отыскивая его вновь. Наше восприятие не сводится к независимой обработке ряда последовательных «моментальных снимков» комнаты, а предполагает изначальное осознание самого факта существования комнаты вместе с ее наиболее важными чертами, после чего нам останется только подметить расхождения между нашей моделью и тем, что нам требуется знать о комнате и ее обстановке, для того чтобы «заполнить пробелы» и скорректировать нашу моментальную модель; это произойдет, например, если мы протянем руку назад за нужным предметом и выясним, что кто-то только что сдвинул его с места. Мы хотим еще раз повторить, что все эти процессы моделирования и коррекции закодированы в терминах свойств и поведения нейронов и имеют мало общего с «архивом» в виде моментальных снимков окружающей среды.

В качестве еще одного оправдания нашему выделению пространственных соотношений из числа всех прочих хотелось бы добавить, что мы не пользуемся, как можно было бы подумать, разными моделями для объектов, отличающихся лишь своими размерами и расположением в пространстве. Наши модели, напротив, должны быть достаточно гибкими в том смысле, который подсказывает то, что я назову *кассетной метафорой*. Рисовать каждый кадр мультипликационного фильма по отдельности слишком непрактично. Поскольку мультифильм может идти целую минуту без изменения «декораций», т. е. фона, на котором происходит действие, такой фон можно нарисовать один раз. Кроме того, на среднем плане может находиться дерево, остающееся в течение определенного периода неизменным, если не считать его расположения относительно других объектов в кадре, и в частности относительно заднего плана — фона. Поэтому его можно нарисовать на отдельном диапозитиве и в каждом последующем кадре при необходимости сдвигать этот диапозитив относительно рамки и, следовательно, относительно фона. Наконец, даже для переднего плана может оказаться возможным нарисовать один раз все те части действующих лиц,

которые остаются неизменными, а на отдельных слайдах пририсовывать к ним для каждого кадра положение рук и ног, выражение лица и т. п. После этого для каждого кадра набирают целую кассету из таких диапозитивов и фотографируют наложенное изображение на экране, причем одна кассета отличается от другой лишь по нескольким параметрам, и число новых рисунков оказывается минимальным.

Аналогичная стратегия весьма экономного описания событий, занимающих достаточно продолжительный отрезок времени, возможно, используется и мозгом, где ДП соответствует «архиву диапозитивов», а КП — каждой новой кассете. В этом случае акт восприятия можно сравнить с использованием сенсорной информации для перестановки диапозитивов, уже имеющихся в кассете, и добавления необходимых слайдов из архива для замены старых или для добавления каких-то новых деталей методом проб и ошибок, с тем чтобы выяснить, не «подходит» ли какой-то новый слайд с точки зрения его соответствия сенсорному входу больше, чем один из старых. Кроме того, часть деятельности организма по изменению своих взаимоотношений с внешней средой можно представить себе как направленную на получение входов, которые позволили бы скорректировать КП в результате предпочтения одних «диапозитивов» другим, а также скорректировать ПМ путем «исправления» или «редактирования» уже имеющихся слайдов и добавления «совершенно новых».

Вероятнее всего, критерии, заставляющие предпочесть одни «слайды» другим, вырабатываются как в процессе эволюции, так и в процессе индивидуального развития. Например, у вас может быть слайд «колибри», расположенный в кассете так, чтобы это соответствовало расстоянию 10 метров до объекта; вдруг из ДМ «выскакивает» слайд «насекомое» и оказывается, что если поставить его в кассету на отметку 3 метра, то он будет больше соответствовать сенсорному входу и, следовательно, заменяет старый. В случаях же, подобных кубу Неккера (рис. 51), у нас есть два одинаково хороших «слайда» — один для куба, выступающего верхней гранью вперед, а другой для куба с этой же гранью, уходящей назад, и мы пользуемся то одним из них, то другим, поскольку у нас нет контекста, который подсказал бы, какое из этих представлений следует «оставить».

Сравнение со «слайдами», конечно, неудачно, да и «кассета» — это не коробка, в которую вставляются неподвижные слайды, скорее это скопление нейронов, лежащее на пути каналов, соединяющих сенсорную систему с двигательной. И «вставляя» тот или иной слайд, мы производим операцию, соответствующую активации этой сети, что приводит к возникновению переходных процессов, развивающихся автономно. Организуя

поперечные связи, такая «кассета» создает необходимый эталон действия «поза — эффекторы». В связи с этим каждый слайд не ограничивается информацией какой-либо одной модальности, а использует «подсказки» от одного или нескольких органов чувств или от обратной связи двигательной активности для того, чтобы «пробудить» огромный объем мультимодальной информации, направленной на действие. В разд. 6.2 мы попытаемся использовать достоинства кассетной метафоры, не привязывая их к такому понятию, как «слайд», поскольку это могло бы слишком жестко ограничить наши представления о нейронной активности, но сохраняя общие идеи о том, что все тонкие акты восприятия происходят на некотором фоне, что нельзя воспринимать мелкие детали в пустоте и что текущий набор слайдов весьма сильно влияет на выбор каждого нового слайда. Короче говоря, мы всегда действуем в рамках определенного контекста.

При обсуждении адаптивных систем в разд. 3.4 мы выяснили, что введение процедуры идентификации резко повышает способность управляющего устройства взаимодействовать с внешним миром, если только этот мир обладает определенными свойствами (например, если оценочную поверхность можно считать плоской, как в программе шашечного автомата), т. е. если «внутренняя модель» управляющего устройства с самого начала не вполне «ошиблась адресом». Разовьем это соображение, отметив вместе с Грегори [93], что система, использующая «внутреннюю модель» для того, чтобы извлечь выгоду из временной и пространственной избыточности внешней среды, имеет следующие положительные стороны.

+1. Поскольку описание любых объектов, если рассматривать их в ограниченном аспекте их возможных взаимодействий, оказываются избыточными, их можно заменить перечислением нескольких ключевых для данного взаимодействия признаков, и стратегия поиска таких признаков помогает сэкономить время при определении взаимодействий с объектами. Для того чтобы распознать конкретные объекты в конкретной ситуации, нам понадобятся даже не все из этих ключевых признаков. В самом деле, поскольку разные сенсорные модальности могут вызывать один и тот же репертуар взаимодействий, искажения некоторых характеристик объекта или их отсутствие «не страшны», если только это не приводит к разрушению «хворума» основных признаков.

+2. Модель является прогнозирующей в том смысле, что наблюдаемые свойства объектов внешней среды могут коррелировать с теми, которые еще предстоит наблюдать, и, что особенно важно, потому, что она может продолжать функционировать даже при временном отсутствии некоторых важных



входов; это и происходит, когда вы чихаете за рулем автомобиля или пробираетесь в темноте через знакомую комнату.

+ 3. Если некая ситуация оказалась подобной другой, для которой такая модель уже была «построена» ранее, то система успешно ведет себя в этой ситуации. Психологи называют этот факт «положительным переносом обучения».

Однако у такой системы есть и свои недостатки.

— 1. Если данная ситуация аналогична другой, для которой уже есть подходящая «модель», но отличается от нее некоторыми важнейшими чертами, то «модель» собьет систему с правильного пути — это так называемый «негативный перенос»; например, мы можем уронить очень тяжелый куб, потому что на вид он казался гораздо легче и мы недостаточно напрягли свои мышцы, пытаясь поднять его (рис. 50 гл. 5).

— 2. Внутренние модели очень консервативны, отражая скорее прошлое, чем настоящее, и при быстрых изменениях обстановки могут послужить причиной весьма ошибочных суждений.

Первый из отмеченных недостатков напоминает нам о том, что любую систему, которая не может позволить себе отвести достаточно места в своей памяти для всестороннего обследования ситуации или потратить достаточно времени на такое обследование — независимо от того, пользуется она при этом внутренней моделью или нет, — можно «обмануть». Для того чтобы успешно работать, система должна либо сузить диапазон своей активности, избегая нетипичных ситуаций, либо использовать обратную связь, чтобы определять, когда нужно включать новые черты в уже существующую модель (это позволит устранить первый недостаток), например пользуясь тактильными ощущениями для распознавания тяжелого металла в предыдущем примере, или когда нужно вовсе отказаться от прежней модели, в корне пересмотреть ее (это позволит устранить второй недостаток). Как это ни грустно, но приходится согласиться с тем, что если на коррекцию модели затрачивается слишком много времени, то не остается времени, чтобы извлечь из этого пользу, а если слишком мало, то может случиться, что мы будем пользоваться моделью еще долго после того, как она перестанет оправдывать себя.

На основании всех приведенных выше соображений о внутренних моделях нам кажется, что среди свойств, играющих важную роль в разумности поведения, обязательно должны найти себе место следующие.

*Существование корректируемой модели мира, обладающей адаптивностью.* Для того чтобы действовать разумным образом, система должна не только учитывать свойства своего окружения, но и уметь корректировать свои представления об этих

свойствах, основываясь на новых наблюдениях и изменениях взаимосвязей.

*Гибкость и общность.* Разумная система должна использовать прошлый опыт не только для адаптивного поведения. Она должна также уметь применять свой прошлый опыт в ситуациях, которые по внешним признакам не похожи на встречавшиеся ранее, например уметь понять, что методы, разработанные для решения одних задач, можно применить и для задач совершенно другого профиля.

*Способность к планированию.* Разумная система должна использовать свою модель для планирования и оценки альтернативных стратегий поведения, прежде чем она примет одну из них. Для системы переработки символов между планированием и действием нет особой разницы, но для робота или животного это различие вполне реально и имеет очень важное значение; им необходимо распознать пропасть на своем пути и спланировать свои действия так, чтобы не свалиться в нее, а не осознать свою ошибку уже после катастрофы.

История математики напичкана баснями о людях с феноменальными способностями к устному счету, но по всем остальным аспектам интеллекта — значительно ниже среднего уровня. Вычислительную машину, производящую миллионы операций в секунду, следует отнести к той же категории, если ее программа рассчитана лишь на решение арифметических задач, например на обслуживание бухгалтерского учета. Но как мы убедились в гл. 3, возможности вычислительной машины не ограничены бесчисленными повторениями простейших арифметических действий, о чем ярко свидетельствует шашечный автомат Сэмюэла — программа, составленная так, что ее поведение зависит от нескольких параметров, «корректируемых по мере накопления опыта».

Такая программа может в некотором нетривиальном смысле учиться. Но даже если игра в шашки и кажется более интеллектуальным занятием, чем арифметические действия, выполняемые в уме, это все же вполне определенный и единственный навык, и позволительно спросить, в какой степени можно рассчитывать на создание программы, которая сможет справиться с задачами, возникающими в более сложных разнообразных ситуациях. В разд. 4.2 мы займемся изучением одного метода, известного как метод эвристического поиска, который находит себе повсеместное применение в программах такого типа, но это будет лишь частью ответа. Гораздо важнее то, что мы узнаем все больше и больше нового, и это позволяет нам все лучше и лучше понимать природу естественного и искусственного интеллекта, а вовсе не пытаемся найти что-то одно, без чего интеллекта не существует.

## 4.2. ПЛАНИРОВАНИЕ И ЭВРИСТИЧЕСКИЙ ПОИСК

Независимо от того, пытаемся ли мы найти последовательность шахматных ходов, позволяющих нам выиграть партию, нащупать ход рассуждений, который приведет нас от аксиом к доказательству некоторой теоремы евклидовой геометрии, или выяснить кратчайший путь со службы на званый вечер, мы можем представлять себе дело так, как будто мы ведем поиск в некотором обширном пространстве состояний. Мы располагаем множеством всевозможных позиций на шахматной доске, списком уже доказанных теорем евклидовой геометрии или перечнем всех улиц и переулков в городе и его пригородах для нашей задачи о маршруте. Кроме того, у нас есть набор операторов, переводящих нас из одного состояния в другое: правила игры в шахматы, правила дедуктивного вывода в геометрии или движение по прямой и повороты на перекрестках в последней задаче. В каждом случае мы начинаем с некоторого начального состояния и приходим к решению задачи, если нам удастся найти последовательность шагов — операций, которые приведут нас в приемлемое конечное состояние. Более того, часто нам хотелось бы, чтобы и сама последовательность таких шагов была оптимальной в некотором смысле, как это имеет место в задаче о маршруте, когда нам хочется по возможности быстрее попасть на ужин.

В случае доказательства теорем планирование и действие неразличимы. Но при игре в шахматы мы должны планировать на несколько ходов вперед, ведь мы не можем забрать назад уже сделанный ход, столкнувшись с совершенно неожиданным и губительным для нас ответным ходом противника. И конечно, если мы спешим в гости, нет смысла попробовать сначала проехать часть каждого из нескольких возможных путей, с тем чтобы выяснить, какой из них короче. (Последний пример напоминает нам о необходимости компромиссов в процессе обучения: иногда полезно заняться экспериментированием, чтобы собрать информацию, которая окажется полезной в дальнейшем, хотя используемый при этом «путь» будет, без сомнения, далек от оптимального.) Таким образом, разумная система должна не просто двигаться в пространстве состояний, определяемом (или определяющим) решаемой в данный момент проблемой; она должна, кроме того, уметь построить модель, описывающую некоторые участки этого пространства, и с помощью этой модели исследовать различные возможные планы действия, прежде чем выбрать один из них.

Для того чтобы представить себе эту ситуацию несколько более конкретно, будем считать, что в распоряжении шофера имеется некая модель в виде карты, изображенной на рис. 52,

и что для упрощения рассуждений расстояния на карте действительно пропорциональны протяженности соответствующих участков дороги.

Какой же путь от работы в гости самый короткий? Пусть читатель попробует выяснить это, а затем подробно объяснит, что он для этого делал. При этом может оказаться, что, имея

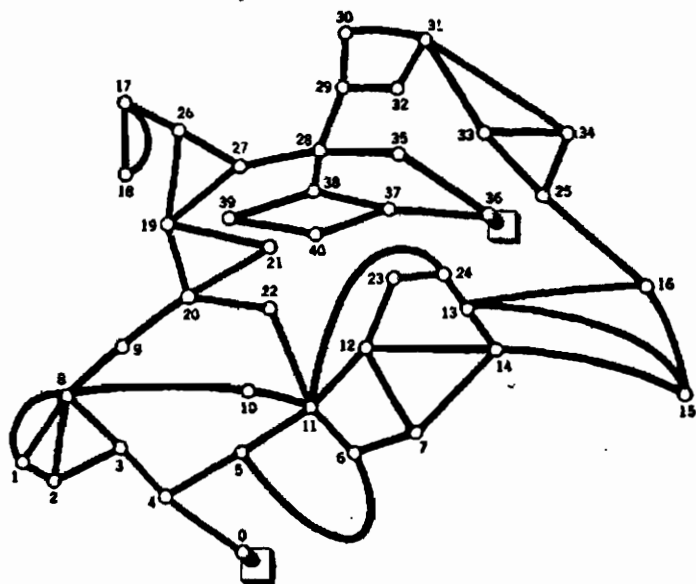


Рис. 52. Как найти кратчайший путь со службы (пункт 0) в гости (пункт 36)— задача, рассматриваемая на рис. 53—59.

На этой карте расстояния между пунктами пропорциональны истинным расстояниям между перекрестками.

возможность видеть всю карту в целом, вы воспользуетесь какими-то геометрическими соображениями. Мы же попробуем сейчас показать, как это можно сделать, пользуясь локальным, пошаговым алгоритмом.

Прежде чем описать несколько алгоритмов, помогающих на стадии планирования найти подходящий путь на графе, который служит моделью пространства состояний с определенными на нем операциями, нам хотелось бы высказать несколько общих соображений.

1. Во многих случаях нельзя рассчитывать на получение подробной карты, с тем чтобы на каждом перекрестке «с одного взгляда» было ясно, куда надо повернуть — направо или налево. Вместо этого, как при игре в шахматы, у нас есть возможность

генерировать по описанию одного состояния описание всех тех состояний, в которые можно попасть за один ход. В действительности для большинства реальных ситуаций число возможных состояний превышает объем памяти самых современных и самых больших машин, и поэтому мы можем хранить в явном виде лишь те состояния, которые либо потенциально важны для решения текущей задачи, либо настолько важны для решения других задач, что их стоит запомнить на будущее. Последнее соображение особенно важно при обучении (шашечный автомат Сэмюэла хранит в своей памяти гроссмейстерские партии, к которым он время от времени обращается), но мы не будем касаться этого вопроса здесь.

2. Одно из следствий замечания о размерах пространства состояний заключается в том, что мы практически никогда не можем пойти по пути полного перебора возможностей, а должны каким-то образом (это целое искусство, о котором мы еще поговорим) ограничивать свой поиск правдоподобными альтернативами. Однако такое выделение правдоподобных альтернатив обычно опирается на надежную информацию. Например, если в нашем примере с рис. 52 речь идет о банкете в городской ратуше, то разумно предположить, что на каждом перекрестке будут дорожные знаки, показывающие, как проехать на главную площадь города, и, следовательно, ни в каком поиске на стадии планирования нет нужды. Но если вы собрались в гости к приятелю, живущему на окраине, то вся информация, на которую вы можете рассчитывать, оказавшись у перекрестка, ограничивается смутным ощущением, что «эта улица, кажется, ведет в нужном направлении».

3. Игра в шахматы связана с дополнительными осложнениями, которых мы касаться не будем ввиду нашей приверженности к задаче о выборе маршрута. В шахматах мы стараемся найти ход, не только непосредственно приводящий нас к выгодной позиции, но и минимизирующий опустошение, которое может вызвать умный противник своим ответным ходом.

4. Возможно, нам удастся воспользоваться специальными знаниями для того, чтобы «сократить» граф состояний, объединив некоторые его узлы в один, и тем самым уменьшить число альтернатив, которые надо рассматривать. Например, если мы знаем, что самый быстрый путь в гости частично проходит по магистральному шоссе, то мы можем убрать с графа все развязки, кроме тех, по которым мы собираемся на него выехать и с него съехать, и оставить на карте только тот кусок графа, который соответствует улицам пригорода, где живет наш друг<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Такая операция эквивалентна объединению всех выброшенных вершин в одну, соединенную только с нулевой вершиной. — *Прим. перев.*

5. Один из полезных методов поиска оптимального пути использует «двусторонний поиск». Некоторые из читателей наверняка признаются, что искали оптимальный путь на рис. 52, «формируя» маршрут с двух разных концов — и от службы, и от пункта назначения. Можно вспомнить также, насколько удобно решать задачи по математике, отталкиваясь не только от их условий, но и от ответа (если он приведен), подсказывающего

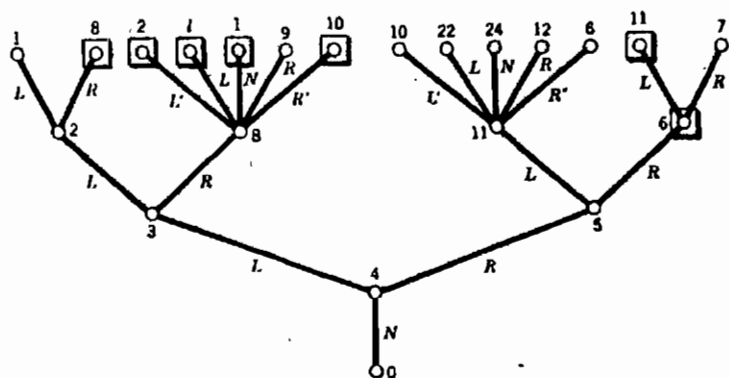


Рис. 53. Первые пять уровней «дерева решений» для задачи, представленной на рис. 52.

От каждой вершины отходят «ветви» к вершинам, отвечающим всем тем пунктам, в которые можно попасть по путям, показанным на рис. 52, не проезжая каких-либо промежуточных пунктов. Это дерево можно «подстричь», отбрасывая вершины, окруженные квадратиками, как только мы находим более короткий путь к пункту с тем же номером. Например, на рис. 52 в пункт 8 ведут два пути: один, проходящий через пункты 4 и 3, и другой, более длинный, проходящий через пункты 4, 3 и 2; соответствующая этому последнему вершина заключена в квадратик. Говоря о длине пути, мы имеем в виду расстояние по настоящей карте (рис. 52), а не по дереву решений, что становится понятным если рассмотреть пути, ведущие в пункт 6.

иногда, в каком направлении искать решение. Здесь мы рассмотрим лишь «однонаправленные» методы поиска, идущие от начального состояния, хотя на самом деле существует и их двусторонние аналоги.

Обратимся теперь к некоторым подходам, помогающим нам избегать необходимости рассматривать на стадии планирования все возможные траектории, получающиеся на модели. Множество альтернативных маршрутов на рис. 52 можно изобразить с помощью дерева (рис. 53), корень которого соответствует исходному пункту 0, а из каждой вершины выходит столько дуг, сколько путей на рис. 52 выходят из соответствующего пункта, не считая того пути, по которому, мы в этот пункт попали. Несколько первых уровней такого дерева, отвечающего рис. 52, приведено на рис. 53. Во время наших дальнейших рассуждений мы просили бы читателя постоянно возвращаться

к рис. 52 для проверки, соглашается ли он с оценками расстояний, которыми мы пользуемся для отбора и отбрасывания вершин на этом дереве решений. Эти оценки не всегда будут верны, так что это — настоящее упражнение на понимание основных принципов.

И хотя на этом рисунке показано всего пять ярусов, уже сейчас видно, что дерево можно «подстричь». Например, на рис. 53 есть три вершины, соответствующие пункту 1 на рис. 52, и ясно, что если путь в гости лежит через пункт 1, то отрезок пути от работы к пункту 1 в свою очередь должен быть кратчайшим. Поэтому на рис. 53 можно «обрезать» все ветви, проходящие через вершину 1 и идущие вначале по пути  $NLRL$  и  $NLRN$ , поскольку оба эти начальных пути длиннее, чем путь  $NLLL$ , тоже ведущий в пункт 1. Аналогичным образом отбрасывается вершина 6, к которой ведет путь  $NRR$ , и все остальные вершины, заключенные в квадратики.

Особенно важно сейчас отметить, что отброшенный путь к вершине 6 является первым — подчеркиваю первым, а не вторым — с которого мы начали. Это получилось потому, что путь с двумя перекрестками (4 и 5) оказался длиннее, чем с тремя (4, 5 и 11), хотя мы обратились к последней возможности позже из-за лишнего перекрестка. В подобном случае нам приходится отбрасывать все ветви, выращенные из старого узла, и начинать анализировать ветви, являющиеся продолжением только что найденного более короткого пути, поскольку кратчайший путь, если он только проходит через вершину 6, просто не может начинаться с неэффективного начального пути в 6.

Этот метод, известный в теории управления как метод динамического программирования («Если путь из  $a$  в  $c$  через  $b$  оптимален, то оптимальными должны быть и оба отрезка из  $a$  в  $b$  и из  $b$  в  $c$ »), несомненно, позволяет сократить число ветвей, которые нужно выращивать на нашем дереве решений, и в конечном счете обязательно приводит к решению, поскольку по сути дела мы при этом вовсе не отказываемся от *полного* перебора, а не рассматриваем лишь те пути, неэффективность начальных отрезков которых сразу указывает, что они не могут служить кратчайшим путем *куда бы то ни было*. А последние слова «куда бы то ни было» вскрывают самую суть того, почему этот метод поиска почти наверняка потребует гораздо больше времени, чем тот, которым воспользовался читатель, решая задачу о кратчайшем маршруте на рис. 52; этот метод не использует информации о желанной цели.

Для того чтобы понять, как можно использовать информацию о цели, нам придется вернуться к проблеме полной и неполной информации, затронутой в пункте 2. Если имеющаяся информация полна и совершенно надежна, то построенное де-

рево решений в конечном счете «сведется» к оптимальному решению без каких-либо лишних ветвлений.

Один из видов представления полной информации — а мы еще раз подчеркиваем, что на стадии планирования такой информации обычно нет, — состоит в том, что для каждого узла  $x$  приведенного графа будет указана протяженность  $h(x)$  кратчайшего пути из  $x$  в цель. В этом случае на каждом пере-

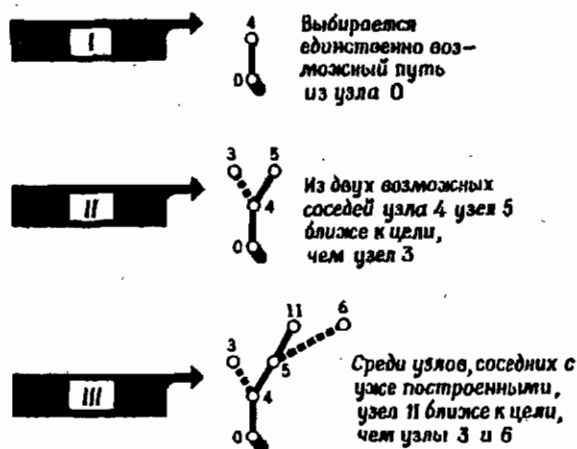


Рис. 54. Применение эвристики Дорана — Мичи для исследования карты, изображенной на рис. 52.

Читателю предлагается самому проверить, не сделали ли мы каких-нибудь ошибок. Для этого полезно иметь циркуль и с его помощью проверить расстояния по рис. 52. Показаны первые три этапа исследования (I—III). Пунктиром показаны возможные пути, которые еще предстоит исследовать и которые исходят из уже построенных узлов. Сплошные же линии соединяют старый узел с новым, построенным по принципу «ближайшего узла по прямой».

крестке мы практически сразу смогли бы решить, в какую сторону теперь двигаться, так же как если бы мы следовали дорожным знакам, ведущим к ратуше.

Именно на этом соображении основан подход, предложенный Дораном и Мичи [60] в схеме, которую они назвали *методом градиента*, но только вместо истинного расстояния  $h(x)$  они использовали нечто, что называлось *эвристическим* расстоянием  $\hat{h}(x)$ . Здесь в качестве  $\hat{h}(x)$  хотелось бы иметь некоторую правдоподобную оценку истинного расстояния, для определения которой не надо находить кратчайший путь из  $x$  в цель. Например, для нашей задачи об оптимальном маршруте роль такого  $\hat{h}(x)$ , очевидно, могло бы выполнять «расстояние по прямой» в отличие от  $h(x)$ , или истинного «расстояния по дороге».

Всем нам кажется оправданным, оказавшись на развилке незнакомой дороги, свернуть в направлении к цели. В равной



мере разумным представляется и предложение Дорана и Мичи использовать для «стрижки» дерева решений не только принцип динамического программирования, но и эвристическую информацию и в связи с этим выращивать из каждой вершины только

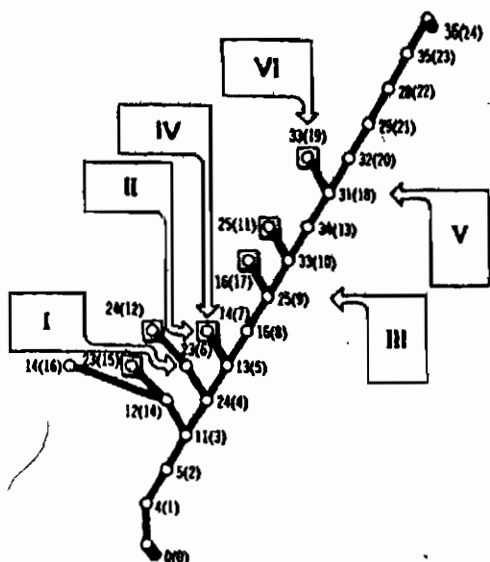


Рис. 55. На этой схеме есть только сплошные линии, соответствующие путям, которые действительно исследовались на окончательном варианте дерева. Цифры, стоящие у каждого узла, показывают: первая — номер узла на рис. 52, к которому ведет этот путь, а вторая (в скобках) — номер этапа, на котором был построен этот путь. Читателю придется пройти через 36 этапов для того, чтобы убедиться в справедливости примечаний к этапам 6, 7, 9, 7 (и снова ср. с 16, 18, 19).

Почему включение этапа 11 ошибочно?

I. «Тупик»:  $h(23) < h(16)$ , хотя узел 16 «лучше» из соседей узла 13.

II. Еще один «тупик»:  $h(14) < h(16)$ .

III. Здесь можно видеть основную слабость этого метода: от узла 25 «по прямой» очень близко до узла 36, но через разделяющую их пропасть нет моста, а забравшись так далеко, не так-то просто «отказаться» от уже проделанного планирования, вернуться назад, поближе к началу и пытаться строить совсем другой маршрут.

IV. Этот путь будет «закрыт» на этапе 16.

V. Здесь пришлось затратить немало труда (с этапа 14 до 17) на исследование узлов, которые были «ближе» к цели, прежде чем удалось продолжить движение к цели.

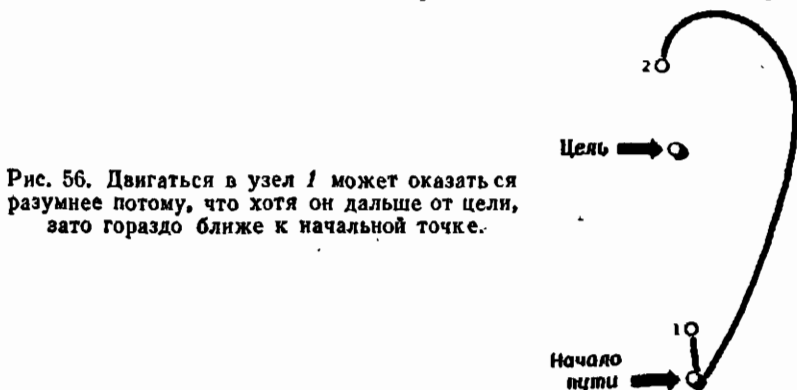
VI. Алгоритм возвращает нас снова к узлу 33, но мы обрываем этот неэффективный путь, исходя из соображений динамического программирования.

одну ветвь — ту, которая ведет к вершине с наименьшим эвристическим расстоянием до цели из числа ближайших соседей рассматриваемой вершины (рис. 54). Мы предлагаем читателю самому убедиться в том, что, приложив этот метод к плану на рис. 52, мы получим дерево решений, показанное на рис. 55, где подле каждой вершины в скобках указан этап, на котором она была получена. Для того чтобы иметь возможность проверить

различные значения  $h$ , полезно иметь циркуль. Комментарии нужно читать в том порядке, в каком они перенумерованы.

Упражнения. 1. Увеличьте вдвое протяженность прямого пути от пункта 11 к пункту 24 и постройте новое дерево решений. 2. Вместо «расстояния по воздуху»  $h(x)$  используйте «угловое отклонение»  $h_1(x)$ , т. е. всегда выбирайте ту ветвь, которая возможно точнее направлена к цели. Какое дерево решения получится в этом случае?

Мы видим, что методом градиента найти путь к цели удалось всего за 26 шагов, несмотря на то что высота дерева



равна 15, так что на каждый уровень приходится в среднем менее двух ветвей—это резко контрастирует с 14 ветвями, полученными для дерева на рис. 53, которое мы успели вырастить лишь до четвертого уровня.

Таким образом, при удачном выборе эвристического расстояния вроде использовавшегося в нашем примере число путей, которые нужно сравнивать, можно сократить до вполне приемлемого. Возможно, читатель уже заметил, что полученный предложенным методом маршрут не оптимален, а значит, сразу встает вопрос, существует ли такой способ использования эвристической информации, который позволял бы значительно сократить дерево решений и тем не менее давал бы оптимальное решение.

Положительный ответ на этот вопрос дали Харт, Нилссон и Рафаэл [105]. Суть их подхода иллюстрирует рис. 56: хотя здесь по-прежнему используется «расстояние по прямой», после узла «Начало пути» следует выбрать узел 1, а не узел 2, как в предыдущем методе; это связано с тем, что хотя узел 1 и дальше от цели, но зато он намного ближе к начальной точке.

Выше мы видели, что Доран и Мичи построили свой алгоритм, пытаясь аппроксимировать поведение в случае, когда есть полная информация в виде функции  $h(x)$ , т. е. протяженности кратчайшего пути из узла  $x$  в точку назначения. Наш новый алгоритм построен по тому же принципу, но только в нем используется другая форма представления полной информации, а именно функция  $f(x)$ , определяющая протяженность кратчайшего пути из начала в точку назначения, который *проходит через узел  $x$* . Понятно, что  $f(x)$  действительно несет полную информацию: из любого узла нужно двигаться в тот соседний узел, у которого  $f(x)$  имеет наименьшее значение, и полученный путь окажется оптимальным.

Пользуясь принципом динамического программирования, мы можем представить  $f(x)$  в виде суммы

$$f(x) = g(x) + h(x),$$

где  $h(x)$ , как и раньше, — длина кратчайшего пути из  $x$  в цель, а  $g(x)$  — длина кратчайшего пути из начального состояния в  $x$ .

Как и прежде, мы можем аппроксимировать  $h(x)$  каким-то эвристическим расстоянием  $\hat{h}(x)$ , но чем можно аппроксимировать  $g(x)$ ? Здесь мы примем подход, согласно которому в любой момент времени  $t$ , определяемого текущей фазой планирования, мы будем аппроксимировать  $g(x)$  с помощью  $g_t(x)$  — длины наикратчайшего пути в  $x$  из начального состояния среди тех путей, которые мы уже перебрали до момента времени  $t$ . Другими словами, мы аппроксимируем  $f(x)$  в момент времени  $t$  с помощью функции

$$f_t(x) = g_t(x) + \hat{h}(x).$$

Харт, Нилссон и Дьюда предложили использовать эту эвристическую информацию для «сокращения» дерева решения (в дополнение к сокращению это связано с соображениями динамического программирования), отводя от каждого узла только ту ветвь, которая ведет к узлу с «минимальной эвристической длиной пути»  $f_t(x)$  среди всех ближайших соседей исходного узла. Они смогли доказать, что если  $\hat{h}(x)$  никогда не бывает больше, чем  $h(x)$  [как в нашем случае, когда  $\hat{h}(x)$  — это расстояние по прямой и, следовательно, не может быть больше  $h(x)$ ], то этот алгоритм всегда дает оптимальное решение.

Читатель может убедиться, что этот метод заслуживает доверия, проверив, что представленный на рис. 57 результат его применения к задаче, поставленной на рис. 52, действительно совпадает с кратчайшим путем «с работы в гости». Интересно отметить также, что теперь поиск потребовал всего 23 шага и привел к оптимальному решению, тогда как на рис. 55 нам понадобилось 26 шагов, и было найдено лишь субоптимальное

решение. Таково, по-видимому, вознаграждение за дополнительную работу, которую приходится делать, следя за значениями  $g_i(x)$  при появлении каждого нового узла  $x$ .

Между прочим, читателю следует обратить внимание на то, что условию  $h(x) \geq \hat{h}(x)$  удовлетворяет и случай отсутствия информации [ $\hat{h}(x) = 0$ ; в этом случае метод практически возвращает нас к полному перебору (рис. 53)], и случай полной информации [ $\hat{h}(x) = h(x)$ ]; при этом решение задачи нашим методом можно получить сразу и никаких ветвлений на пути из начального состояния к цели не возникнет].

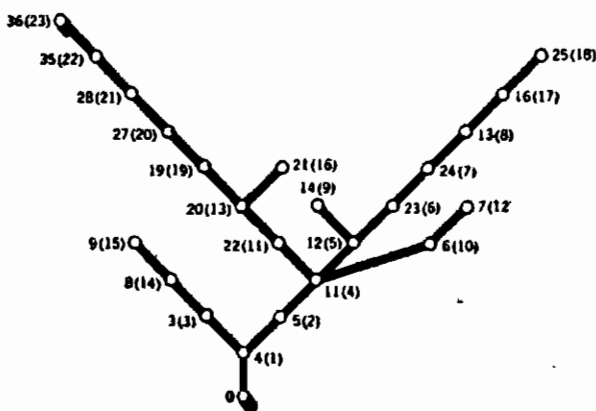


Рис. 57. Применение эвристики Харта, Нилссона и Рафаэла для задачи о кратчайшем маршруте на рис. 52.

Метод построения этого дерева аналогичен приведенному на рис. 55, с той единственной разницей, что на каждом этапе строится не соседний узел, ближайший к цели, а соседний узел, для которого минимальна сумма «проеденного расстояния, приводящего в этот узел из начала», и расстояния до цели «по прямой».

Мы надеемся, что такое подробное изучение *эвристического поиска* в приложении к задаче об оптимальном маршруте убедило читателя, что многие процессы, на первый взгляд кажущиеся исключительно проявлением человеческого разума («Ну, я посмотрел на рис. 52 и вижу два относительно прямых отрезка пути, один вначале, а другой в конце, ведут вроде бы навстречу друг другу, я их, знаете ли, соединил, и получился кратчайший путь»), можно представить в виде последовательности стандартных операций («найти узел с наименьшим значением  $f_i(x)$ »), которые можно выполнять по заданной программе на вычислительной машине. Как должно было стать совершенно ясно из пяти предшествующих этому примеру замечаний, мы не собираемся утверждать, что именно эти операции происходят в мозгу человека; там наверняка происходят и другие процессы. Ранее, подчеркивая различия между исследо-

ваниями по искусственному интеллекту и теорий мозга, мы уже отмечали, что наша цель в этой главе состоит не в том, чтобы построить модель работы мозга, а в том, чтобы понять, как можно свести разумное поведение к последовательности элементарных операций в надежде (которая пока еще не оправдалась), что это поможет понять, каким образом активность нейронов позволяет нам вести себя разумным образом.

В заключение этого параграфа рассмотрим важную программу, послужившую одной из основ общего исследования эвристики, о которой мы только что говорили. Речь идет об «общем решателе задач» (ОРЗ) Ньюэлла, Шоу и Саймона [183]. Интересно, что их общая схема весьма близка к схеме Питтса и Мак-Каллока (разд. 3.3), как показывают комментарии, данные в квадратных скобках. ОРЗ представляет собой общую схему решения задач следующего типа.

1. Имеется заданное множество объектов. [У Питтса и Мак-Каллока ему соответствует множество образцов.]

2. Задан конечный набор оценок различий и способ определения различий между двумя заданными объектами. [У Питтса и Мак-Каллока этому соответствует функция ошибки  $E$ , но, поскольку у ОРЗ набор различных оценок конечен, эти оценки дают лишь грубые указания на то, «чего нам недостает».]

3. Задан конечный набор операторов и таблица операторов — оценок различий, определяющая, при каком различии какой оператор *вероятнее всего* уменьшит это различие. [У Питтса и Мак-Каллока этому соответствует генератор преобразований.]

4. Задан исходный объект (например, список аксиом логики высказываний) и конечный объект (например, утверждение, истинность которого мы хотим доказать). Требуется найти последовательность операторов, которая преобразует исходный объект в требуемый (если операторам соответствуют правила логического вывода, то искомая последовательность операторов даст требуемое доказательство искомого утверждения).

Вся хитрость здесь заключается в том, что, поскольку используемая шкала различий дает лишь очень незначительную информацию о том, что же нужно изменить, нет никакой гарантии, что использование оператора, рекомендованного в таблице, действительно преобразует имеющийся объект в другой, который будет ближе к цели. Более того, нет даже гарантии, что этот оператор вообще можно применить к имеющемуся объекту, и иногда приходится искать промежуточное преобразование, которое должно подготовить исходный объект к возможности применения «желаемого» оператора. В связи с этим уже нельзя действовать шаг за шагом, как в схеме Питтса — Мак-Каллока. Вместо этого приходится строить «дерево решений», регистри-

рующее, какие использовались операторы и на каких этапах. Цель занимающегося этим блоком общего наблюдения программы ОРЗ состоит в том, чтобы обеспечить такое использование ресурсов, при котором максимально «росли» бы ветви дерева, по-видимому, ведущие к цели, как на рис. 58.

В каждом узле мы можем определить различие между имеющимся объектом и целью, а затем выяснить, какой оператор

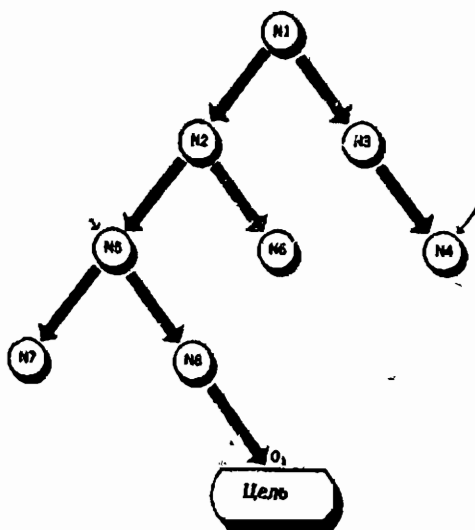


Рис. 58. Пример «дерева решений», которое может быть построено блоком общего контроля программы ОРЗ.

Различия между N5 и целью кажутся менее значительными, чем различия между целью и N6, и поэтому все внимание сосредоточивается на этом пути; N4 кажется даже дальше от цели, чем N1, и поэтому дальнейшего исследования этого пути не производится.

рекомендует использовать в этом случае таблица. Может оказаться, что некоторые из них сразу применить нельзя. Исходя из всех этих соображений, мы должны решить, в какой узел следует двигаться дальше и какой из возможных операторов применять.

Таким образом, в ОРЗ предусмотрена функция *наблюдения — управления* с запоминанием различных участков пути, которые, как может выясниться в дальнейшем, может быть, и ведут к цели, и именно организация этой программы управления и отличает по-настоящему ОРЗ от схемы Питтса — Мак-Каллока.

Общий подход, характерный для ОРЗ, был использован Миллером, Галантером и Прибрамом [167] в качестве основы для их программного подхода к психологии, изложенного

в книге «Планы и структуры поведения». В этой книге под понятием *план* имеется в виду «некоторый иерархический процесс, позволяющий управлять порядком выполнения некоторой последовательности операций», и высказывается предположение, что такой план определяет механизм преобразования понимания в действие, до этого времени остававшийся вне рамок теории познания. Авторы этой книги предполагают также, что организму доступны многие другие планы помимо того, который действительно используется.

Основная с функциональной точки зрения часть их теории сродни таблице операций — различий программы ОРЗ или

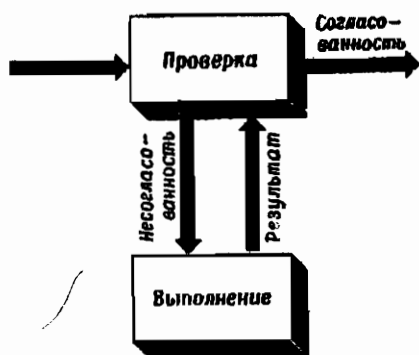


Рис. 59. Блок ПВПВ.

Операция повторяется до тех пор, пока проверка не установит соответствия между имеющимся и требуемым.

схемам, типа показанной на рис. 37. Блок ПВПВ (где ПВПВ означает Проверку, Выполнение, Проверку, Вывод), схема которого приведена на рис. 59, представляет собой систему с обратной связью, осуществляющую многократные проверки и пробные действия до тех пор, пока не будет достигнуто согласование между желаемым и планируемым положением вещей.

Миллер, Галантер и Прибрам [167] утверждают, что всякий план по своей форме — это иерархическая структура из блоков ПВПВ. Например, план забивания гвоздя можно описать так, как показано на рис. 60, где блок выполнения, входящий в блок ПВПВ для всей операции в целом, представлен в виде двух других блоков ПВПВ. Именно в этом и проявляется иерархическая структура плана. Теория требует использования дополнительных механизмов, которые предотвращают заикливание, возникающее при бесконечных неудачных прозёрках (если, например, вы попали на сучок), и позволяют прерывать процесс (например, если вы попали молотком по пальцу). Отметим, что

в нашем блоке ПВПВ все параметры состояния контура обратной связи можно наблюдать извне, тогда как в более сложных иерархических структурах многие состояния остаются внутренними и скрыты от наблюдения.

В какой области головного мозга разрабатываются подобные планы? Авторы приводят результаты физиологических исследований, которые, по их мнению, показывают, что план

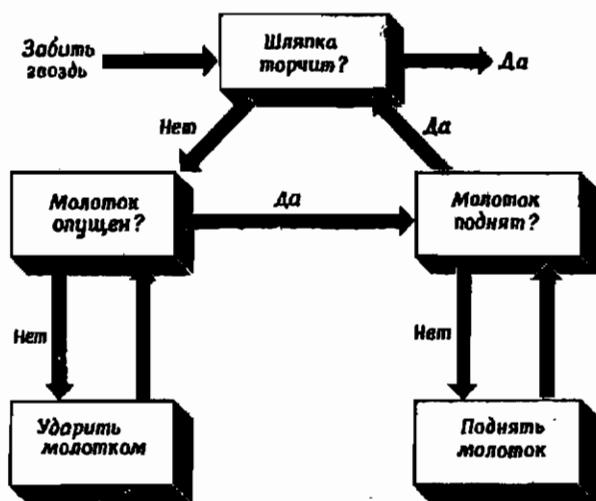


Рис. 60. Иерархический план, в котором блок выполнения глобальной системы ПВПВ представлен в виде двух систем ПВПВ более низкого уровня.

поведения выбирается или заменяется другим в лобной коре (которая, как мы должны считать, занята вопросами тактики), а за его реализацию отвечает лимбическая система. Люди после фронтальной лоботомии ведут себя так, как если бы за их «настоящим» не стояло будущего. И дело не в том, что им все равно; они, по-видимому, просто не в состоянии планировать свое поведение на будущее, как это делают «нормальные» люди.

Кроме того, у них несколько ослаблена мотивация — еще один симптом существования лишь ради сиюминутных целей. Можно считать, что в задачу выбора внутренней среды и, по крайней мере частично, во взаимодействие с ней вовлечен также и гипоталамус. Направленность внимания в значительной степени оценивается в таких понятиях, как «цель» или «намерение»; поэтому в любое время должно производиться определение ценностей или хотя бы важности того или иного факта. Такая система ценностей вырабатывается на основании опыта,



наследственного или личного, и связана с выживанием. Последствия действий, оцененные по этим критериям как «благоприятные» или «неудачные», могут подкреплять или ослаблять будущие акты, в результате чего возникает иерархия выбора, закладываемая в центральную нервную систему. Но все это весьма умозрительно, и за годы, прошедшие до времени выхода этой книги, авторы изменили ряд своих физиологических интерпретаций.

Вместо того чтобы пытаться искать корреляцию между структурой ПВПВ и устройством различных областей мозга, гораздо интереснее разобраться в «расхождениях» между устройством ОРЗ и ПВПВ. Целью ОРЗ является, если ограничиться одним примером, напечатать правильное доказательство теоремы. Задача же соответствующей системы ПВПВ состоит в достижении такого состояния, когда никаких теорем доказывать не нужно. И в этом заключены глубокие различия между разными направлениями в теории человеческого поведения. Теории *гомеостаза* обращают главное внимание на поддержание постоянства основных параметров организма: содержание сахара и кислорода в крови, температуры тела и т. п., и объясняют человеческий интеллект как некий выкрутас, придуманный природой в процессе эволюции для того, чтобы решить эту проблему регулирования нескольких переменных. Другие люди, которым хотелось бы понять, как Бетховен мог создать свои симфонии, считают, что проблемы гомеостаза не имеют к этому никакого отношения. И быть может, примирить эти два подхода удастся после того, как, поняв, каким образом в процессе эволюции мозг научился решать проблемы выживания в столь невероятной многообразной среде, мы поймем и то, каким образом он строит такие разнообразные внутренние модели, что они могут охватить не только все трудности жизни в современном обществе, но также сферу фантазии и воображения.

В любом случае мы закончим на этом наш экскурс в область психологии и сделаем еще несколько замечаний об ОРЗ, которые позволят увидеть последние достижения «эвристического программирования» в более правильном свете.

Претензии ОРЗ на общность основаны на том, что эта программа может решить любую задачу, например доказать любую теорему исчисления высказываний, которая может быть решена с помощью поиска по дереву решений (типа приведенного на рис. 58) и таблицы операторов — оценок различий. К сожалению, именно эта общность подхода затрудняет использование в его рамках специальных приемов, придуманных для решения специальных задач. Кроме того, не все задачи можно решить таким способом, и, даже если такой подход возможен, мы видим настоящее проявление творческого интеллекта не столько в удач-

ном применении таблицы операторов — оценок различий, сколько в осознании того, какие именно различия существенны для данной задачи, и в построении на базе опыта таблицы операторов, позволяющих устранять эти различия. Возможно, что методы, родственные методу Ура и Восслера [249], составивших машинную программу, которая сама генерирует детектор признаков для распознавания образов, развиваясь, достигнут в конце концов такого уровня, когда их можно будет положить в основу программы автоматического формирования таблицы операторов — оценок различий в дополнение к пакету программ управления ОРЗ. Однако подлинное «творчество» при решении задач состоит, по-видимому, в чем-то другом — в том, чтобы «увидеть проблему в истинном свете».

Для того чтобы вкратце рассказать о работе Ура и Восслера [249] по распознаванию образов, в которой программа сама вырабатывает детекторы признаков и оценивает их работу, рассмотрим образы, представленные на большом квадрате (или формальной «сетчатке»), разбитой на очень мелкие квадратики. Если предположить, что размеры такой сетчатки  $20 \times 20$ , то один из подходов к глобальному распознаванию образов может заключаться в том, чтобы рассматривать квадраты размерами, скажем,  $5 \times 5$  в поисках признаков, которые могут помочь распознаванию. [В более сложном варианте эта процедура используется на ранних этапах предварительной обработки. Например, полезные признаки можно искать по кусочно-линейному представлению образа (ср. с рассмотрением зрительной системы кошки в разд. 2.4).] Так, при распознавании букв латинского алфавита полезными признаками служат: маленькая перевернутая буква V, образующая верхнюю часть буквы A, наклонная линия ее ножки, полукружья в букве B и т. п. Программа Ура и Восслера генерировала подобные эталоны размером  $5 \times 5$  случайным образом и затем опробовала их на большом числе различных букв, предъявляемых на стадии обучения. Сущность их подхода состоит в том, чтобы независимо от уровня, на котором генерируются эти эталоны, отбирать те из них, которые оказались тесно связанными с одними буквами и совсем не подходят для других и, значит, полезны при дискриминации. Те же эталоны, которые не связаны определенно ни с какими буквами, отбрасываются, и в конце концов в машине оказывается список признаков, позволяющий очень хорошо различать разные буквы алфавита.

Приведем теперь два примера того, насколько важную роль играет для человека, решающего какую-то задачу, способность представить ее в такой форме, которая открывает более простой путь к решению. Для начала рассмотрим игру, в которой два лица по очереди называют любые целые числа от 1 до 9 при

условии, что это число не было названо ранее, а выигрывает тот, кто первый сможет дополнить сумму названных до этого чисел до пятнадцати. Для некоторых это трудная игра, пока они не поймут, что с помощью магического квадрата (рис. 61) эту игру можно свести к игре в крестики-нолики.

6	1	8
7	5	3
2	9	4

Рис. 61. Магический квадрат и игра в крестики-нолики. Сумма цифр во всех строках и столбцах этого квадрата, а также на его главных диагоналях равна 15.

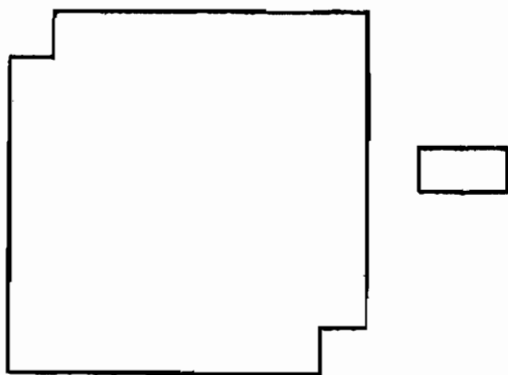


Рис. 62. Можно ли покрыть прямоугольниками размером  $1 \times 2$  фигуру, полученную из квадрата  $8 \times 8$ , у которой из двух противоположных углов вырезали по квадратик  $1 \times 1$ ?

Рассмотрим затем следующую задачу (рис. 62). Покрыть фигуру, получившуюся из квадрата со стороной в 8 единиц с вырезанными из двух противоположных углов квадратиками размером  $1 \times 1$ , прямоугольниками размером  $2 \times 1$ . Оказывается, что сделать этого нельзя. Но как это доказать? Не с помощью же перебора всех возможных способов покрытия? На самом деле эту задачу можно решить методом математической

индукции по размерам большого квадрата, но доказать это гораздо проще, воспользовавшись удобным представлением исходной задачи. Для этого представим себе, что исходный большой квадрат — это шахматная доска. Нетрудно убедиться в том, что каждый прямоугольник  $2 \times 1$  покрывает одно черное и одно белое поле этой доски при любом способе покрытия. А это значит, что число покрытых белых и черных полей при любом покрытии должно быть одинаковым, чего не может быть в данном случае, поскольку из нашей шахматной доски вырезаны два поля одинакового цвета.

Конечно, все это никак не помогает решить вопрос об источнике удачной формы представления. И нам остается только, добавив к нашему списку «ингредиентов» интеллекта высокого уровня «способность находить удачные представления», перейти к следующему разделу, где мы узнаем, как вычислительная машина может анализировать изображение своей среды на телевизионном экране, пользуясь тем, что перечень различных объектов, с которыми ей, возможно, придется иметь дело, ей заранее известен.

### 4.3. АНАЛИЗ ОБСТАНОВКИ

Познакомившись с тем, как машина может использовать графовую модель операции для описания среды и планирования стратегии поведения, мы хотели бы теперь понять, как научить робота с помощью нескольких картинок на экране телевизора строить внутренние модели окружающей среды. В этом разделе мы с целью сопоставления вкратце рассмотрим два механизма обработки таких изображений, запрограммированных для вычислительной машины, а затем займемся *анализом обстановки*, в результате которого зрительное восприятие обстановки в целом можно свести к восприятию совокупности объектов, каким-то образом расположенных в пространстве. В задачах *распознавания букв* предъявленную картинку нужно отнести к одному из сравнительно небольшого числа классов, например определить цифру или букву алфавита. В задачах распознавания *рукописных текстов* на картинку попадает уже целое слово, а образующие его буквы несколько искажены тем, что они связаны друг с другом. Поэтому при попытках разобрать написанное слово необходимость разбиения на элементы предъявляет программе дополнительные требования помимо распознавания букв. Но, с другой стороны, появление контекста может послужить толчком к развитию методов, непригодных для обработки единичных символов. Например, что означает символ **а** — букву *a* или букву *и*?

Трудно сказать, но если эта буква встретилась в слове «тар», т. е. безусловно является второй буквой слова «т — р», то, справившись со словарем, мы узнаем, что существует слово «тир», но нет слова «тар» и поэтому следует избрать первое толкование. Люди обычно используют гораздо более широкий контекст для разрешения неопределенностей. Однако в настоящее время непрактично было бы вкладывать в машину нечто большее, чем словарь общеупотребительных слов и выражений, и, следовательно, ее подход к использованию контекста нельзя даже сравнивать с возможностями человека, который по завязке интриги на стр. 43 детективного романа может догадаться о развязке на стр. 217!

Нам хотелось бы теперь перейти от обработки зрительного образа, представленного в виде четко очерченного контура, о котором к тому же известно, что он содержит линейную последовательность символов, к нечеткому распределению света и теней на экране телевизора (или распределению потенциалов в колбочках и палочках) и спросить себя, как можно распознать эту картину и извлечь информацию, необходимую для взаимодействия с окружающей средой, которую эта картина отображает. Заметим, что подобный анализ обстановки может быть организован по иерархическому принципу не менее чем с двумя различными уровнями анализа. Сравните, как вы идете по улице, где препятствия надо различать лишь для того, чтобы не наткнуться на них (велико же бывает смущение, если таким препятствием оказывается знакомый, утверждающий, что вы нарочно сделали вид, будто не замечаете его), т. е. когда вы видите, где препятствие, а не что это такое, с тем, как вы складываете из кусочков картинку и где в равной степени важно и «что» и «куда». Однако провести здесь четкую грань нельзя. Решая навигационную задачу, мы должны принимать во внимание не только положение, но и скорость перемещения препятствия, а (как показывает материал разд. 2.1) ответ на вопрос «что» в значительной степени зависит от характера нашей активности в данный момент.

Рассмотрим конкретную задачу составления программы для работа рука — глаз, состоящего из телевизионной камеры, вычислительной машины и механической руки, предназначенной для того, чтобы брать предметы со стола (рис. 63). Вычислительная машина может пользоваться различными программами для управления рукой в зависимости от формы предмета — куб это, пирамида или шар. Мы будем говорить, что робот «распознал» предмет в тот момент, когда машина получает доступ к соответствующей программе. В настоящее время подобные программы узнают куб «по имени» и используют наименование для адресации соответствующей подпрограммы. Простота ситуа-

ций, в которых приходится работать роботу, позволяет в определенной степени обойти проблему ее направленности. В более сложных ситуациях может оказаться необходимым вызывать подпрограммы в зависимости от целого комплекса признаков, не пользуясь программами распознавания объектов. В среде же, в которой встречаются лишь кубы, пирамиды и шары, «распознавать» предметы очень просто: если у предмета нет острых ребер, это шар, если в поле зрения попадает грань с четырьмя углами, это куб, при условии, что видны еще две вершины, и

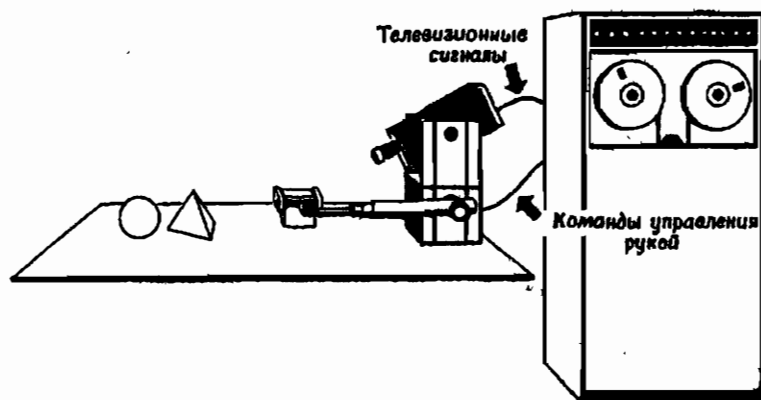


Рис. 63. Гипотетический робот, использующий сигнал от телевизионной камеры для того, чтобы с помощью вычислительной машины управлять движениями механической руки.

пирамида, если дополнительно видна лишь одна вершина. (Важно отметить, что такая простая классификация становится возможной лишь потому, что робот заранее «знает», что кроме кубов, пирамид и шаров ему ничего не может встретиться. Это своего рода «знание контекста», которое должно быть воплощено в КМ (разд. 4.1). Обычно мы принимаем решения быстрее, чем могли бы, поскольку можем использовать свои знания о некоторых свойствах окружающей среды. Конечно, иногда, например если человек вместо ужа взял в руки гремучую змею, это «знание» может и подвести.)

Поскольку речь идет о роботе, остается задача выяснения местоположения предмета и его ориентации. Здесь, однако, важно отметить, что, например, для куба, изображенного на рис. 64, машине вовсе не нужно вычислять все координаты куба, а достаточно определить середину видимой грани  $AB$  и невидимой грани  $CD$  — единственные параметры, знание которых необходимо для программы захвата куба и правильного положения руки.

Рассмотрим в этом свете различные способы анализа обстановки, разработанные разными группами, занимающимися конструированием роботов (разд. 4.4), примерно к 1970 г. Обычно прежде всего решают задачу замены двумерного раstra интенсивности света приближенным контурным изображением предме-

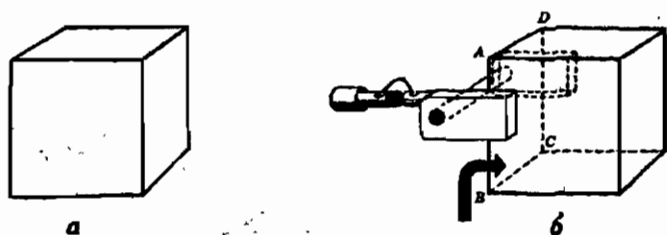


Рис. 64. Для управления движениями механической руки, изображенной на рис. 63, необходимы координаты невидимой грани куба.

а. Объект, как его «видит» камера. б. Грань, координаты которой необходимы для того, чтобы правильно расположить «руку».

та на зрительном поле. [Для упрощения задачи обычно пользуются плоским освещением, не дающим теней. В настоящее время ведутся работы над тем, как помешать роботу рассматривать тени как самостоятельные объекты (черта, характерная в

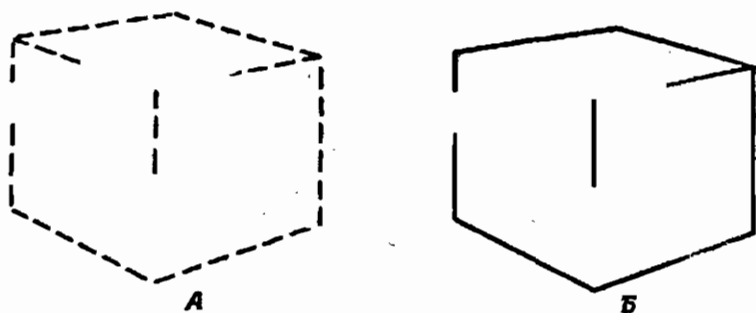


Рис. 65. Две стадии предварительной обработки изображения куба.

для совсем маленьких детей.) Таким образом, первые два этапа обработки зрительных изображений у роботов аналогичны предварительной обработке зрительных стимулов у кошки (разд. 2.4): сначала усиливается контраст, а затем точки наибольшего контраста соединяются короткими прямыми отрезками. Результат подобной обработки применительно к изображению куба показан на рис. 65, А. Следующий шаг состоит в том, чтобы до некоторой степени заполнить промежутки с помощью длинных

прямых, в основном проходящих по коротким отрезкам, в результате чего получается контур, изображенный на рис. 65, Б.

Отметим, что рис. 65, Б никак нельзя назвать законченным контурным изображением куба. Некоторых линий здесь не хватает, особенно на пересечении двух граней, где характер отражения света меняется мало или совсем не меняется, и в результате детекторы контраста не дают необходимого материала блоку линейной аппроксимации.

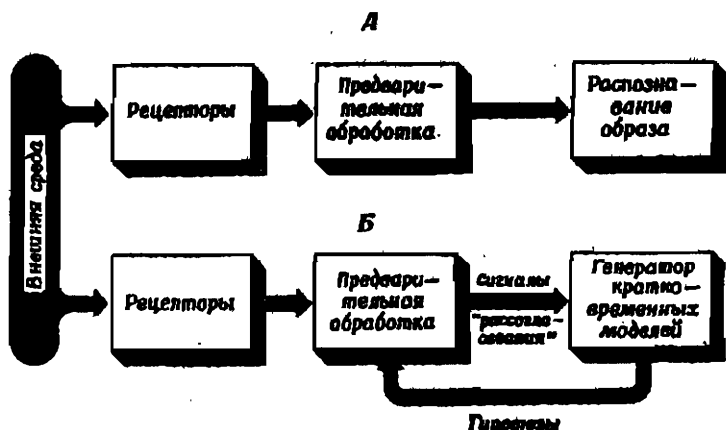


Рис. 66.

А. Обработка зрительных образов методом продолжения прямых. Б. Один из возможных вариантов анализа вложением. Вероятно, подобным образом происходит обработка зрительной информации у человека. При этом «сферическое управление», использующее рабочую гипотезу, вызывает перестройку канала прохождения сигнала.

По-видимому, возможны две основные стратегии (рис. 66) дальнейшей обработки такого незавершенного изображения, как на рис. 65, Б. Первая из них — *метод продолжения прямых* (straight-through analysis) — состоит в том, чтобы попытаться дополнить контур до «идеального контурного изображения», а затем пытаться распознать этот новый контур. При втором — *анализе вложением* (nested analysis) — сначала выдвигают гипотезу о том, что может изображать исходный грубый набросок, а затем уже исследуют его более тщательно, стараясь подтвердить примерную гипотезу. Мне кажется, что второй подход больше соответствует естественной схеме, используемой человеком.

При использовании метода продолжения прямых несовершенный набросок контура предмета в прямолинейной среде можно обрабатывать с помощью эвристического поиска идеального контура, основываясь на эвристиках «линии должны продолжать существующие линии» или «нужно выбрать имеющийся угол и



провести через него прямую, параллельную уже существующей»; поиск продолжается до тех пор, пока не удастся удовлетворить таким критериям полноты, как «любая линия всегда должна соединять две вершины и не может повиснуть в воздухе» или (если есть возможность пользоваться объемной информацией) «если вершина расположена на ближнем конце прямой, то из нее обычно должно выходить более двух прямых». Если штрих на исходном несовершенном рисунке очень короткий, его можно стереть. Если две прямые продолжают одна другую, то разрыв между ними можно заполнить, если только между ними нет пересечений, свидетельствующих о том, что они принадлежат разным объектам.

Анализ вложением также может использовать подобные процедуры продолжения прямых, но для него они являются составной частью процесса распознавания объектов. Например, главная идея подхода Дьюда и Харта [62] состоит в том, чтобы сначала найти вертикальные прямые, а затем попытаться «наращивать» ответвления от этих прямых, постоянно проверяя, не приводит ли это к очертаниям некоторого «известного» предмета. В такой программе анализ изображения продолжается лишь до тех пор, пока предмет не будет узан с определенной степенью достоверности, и, следовательно, «идеальное» контурное изображение предмета строится машиной уже после распознавания, а не до него.

Читатель сам может попытаться составить перечень необходимых команд, позволяющих дополнять изображения, подобные показанному на рис. 65, Б. Более тонкие методы могут использовать также информацию о цвете предмета и материале, из которого он сделан.

Создается впечатление, что люди пользуются анализом вложения в большей степени, чем методом продолжения линий. Мы воспринимаем контур, как бы плохо он ни был различим, потому что мы узнали куб, а не потому узнаем куб, что добросовестно дорисовали все контурные линии. Искусство импрессионистов в значительной степени основано на их умении передать игру цвета на поверхностях, и прошло много времени, прежде чем другие художники и широкая публика поняли, что это дает такое же «истинное» представление об окружающем мире, как и четкие контуры, раскрашенные соответствующими красками. И так же как в проблеме распознавания рукописных текстов, где, как мы убедились, предположения о том, что мы видим слово, имеющееся в словаре, позволяет компенсировать недостаток информации, приводящий к разночтениям, так и здесь гипотеза о том, что наблюдаемый предмет является одним из знакомых нам предметов, позволяет компенсировать неполноту контурной информации. Этот факт — то, что мы ищем достаточно

число признаков, по которым наблюдаемый стимул можно отнести к одному из известных объектов, а не пытаемся оценить все детали (включая и отсутствующие) зрительного образа, — открывает, по-видимому, возможность простой механистической интерпретации наблюдений гештальт-психологии, утверждающей, что мы воспринимаем «целое», а не совокупность «деталей», как и следует из закона «замыкания» (law of closure), согласно которому, например, изображение на рис. 67 будет принято как квадрат. Понятно, что, узнав в этом изображении квадрат, мы можем затем заполнить разрыв на правом ребре, но главное как раз в том, что это изображение мы воспринимаем как квадрат с «дыркой», а не как «фигуру из пяти прямолинейных отрезков. Вы спрашиваете, а не квадрат ли это? Конечно, нет. Для квадрата достаточно четырех отрезков».

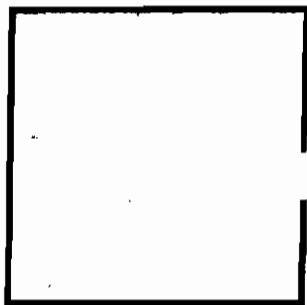


Рис. 67. Иллюстрация закона «замыкания». Эта фигура воспринимается как квадрат с разрезом.

Воспринимая сложную обстановку, человек быстро переводит глаза с одной точки на другую. Точки фиксации взгляда соответствуют деталям, весьма важным для восприятия. Другими словами, система со сложной организацией восприятия не просто равномерно сканирует обстановку, а ищет те несколько ее черт, которые позволили бы быстро составить общее суждение о ней в целом. Знать, на что следует посмотреть после этого, — прекрасный пример одной из составляющих интеллекта. Например, Тихомиров и Познанская [242] выяснили, что шахматисты-мастера смотрят на доску меньше, чем новички, и запоминают позицию точнее, причем мастера переводят свой взгляд с одного ключевого места позиции на другое, а новички сканируют доску случайным образом. Если же расположить фигуры на доске случайным образом, так что у мастера не может возникнуть содержательной стратегии поиска, результаты его попыток запомнить расположение фигур оказываются сравнимыми с результатами новичка.

На этом этапе читатель может возразить, что в наших рассуждениях слишком смазывается различие между человеком и

роботом. «В конце концов робот обрабатывает телевизионную картину, а мы воспринимаем реальный мир», — возмутится он.

Хотя не следует преуменьшать многие различия, имеющиеся между людьми и (существующими) машинами, разграничение, выраженное в приведенной фразе, основано на недоразумении. Человеческий мозг, перерабатывающий электрические потенциалы, приносимые зрительным трактом, столь же далек от «реальности», как и вычислительная машина, перерабатывающая изображение на телевизионном экране. А ощущение реальности создается благодаря тому, что предварительную обработку мы осуществляем подсознательно, а начинаем работать сознательно (хотя я и не берусь объяснить, как именно!) лишь на уровне представления зрительного образа в виде совокупности объектов, расположенных в пространстве, представления, которое многократно оправдывало себя в качестве прочной основы взаимодействия с внешним миром. Таким образом, именно направленная на действие оперативная модель (ср. разд. 4.1) внешней среды (которую для робота тоже можно сделать, хотя и в значительно более простом варианте, чем тот, что есть у человека), а не осознание предварительной переработки, сопутствующей формированию этой модели, обеспечивает ощущение реальности.

Анализ вложением свидетельствует еще и о том, что переработка сенсорной информации ни в коей мере не является однонаправленным процессом (рис. 66, А), а организована по принципу схемы на рис. 66, Б, где даже периферическая переработка зависит от процессов централизованного формирования гипотез. Естественно, что учет сенсорной информации другой модальности, а также сигналов обратной связи от рецепторов значительно усложнит картину.

Убедившись в том, что распознавание простых объектов можно поручить машине, и получив попутно некоторые представления о процессах восприятия у человека, мы должны заняться проблемой анализа обстановки, образованной несколькими предметами, из которых одни частично загораживают другие. Для простоты мы будем рассматривать лишь статичные среды. (А это значит, что мы можем вернуться и еще раз пересмотреть часть картины, будучи уверенными, что там ничего не изменилось; однако при этом мы лишаем себя тех многих важных примет, которые дает движение.) Предположим также, что мы работаем с «идеальными контурами», которые аккуратно воспроизводят все видимые границы.

Один из методов, вполне успешно справлявшийся с анализом обстановки из нескольких предметов, каждый из которых принадлежит короткому списку «знакомых» объектов, получил название *метода подгонки модели* [214]. По своей сути это тот же метод, который мы обсуждали в связи с рис. 63. Предпо-

жим, например, что у нас есть «модели» куба, шара, пирамиды. Тогда мы сможем подогнуть модель куба под 9 линий (рис. 68, А), а затем снять их, оставив нерешенной проблему распознавания оставшегося контура. Но к этому контуру легче подогнуть модель призмы, чем модель куба или шара, и, следовательно, мы заканчиваем анализ обстановки, сделав вывод, что перед нами «Куб, стоящий перед призмой».

Другой подход, также основанный на использовании идеальной контура, но, кроме того, требующий, чтобы все изображения были образованы лишь прямыми, основан на декомпозиции

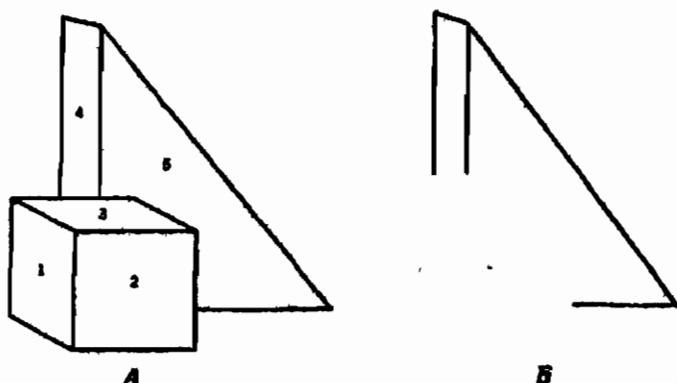


Рис. 68. Пример подгонки моделей.

Подогнав модель куба под девять отрезков (А), мы можем снять их, оставив остальные линии (Б). Эти оставшиеся линии больше соответствуют призме, чем кубу или шару и, следовательно, анализ изображения приводит к выводу: «Куб, стоящий перед призмой».

изображения с последующими попытками распознавания отдельных его частей. В этой связи Гузман [98] предложил метод, основанный на изучении каждого узла для выяснения того, насколько правомерно считать, что примыкающие к ней области принадлежат одной и той же фигуре.

Рассмотрим рис. 69, где показаны узлы трех типов. Заметим, что узел типа «стрелка» на рис. 68, А встречается в разных ориентациях трижды и что во всех случаях две из областей разбиения, образующих угол стрелки (1 и 2), оказываются принадлежащими одному предмету, а третья область (3) — другому. Узел типа У встречается лишь однажды, и все его грани принадлежат одному предмету. Наконец, узел типа Т встречается тоже три раза, и во всех случаях области, лежащие по разные стороны от «верхней» перекладины, принадлежат разным объектам.

Это наводит на мысль о возможности следующего подхода. Составим «турнирную таблицу», в которой каждой паре

различных областей соответствует одна клетка; для каждой такой пары будем решать, являются ли две входящие в нее области двумя гранями одного предмета, в зависимости от значения «показателя связи», который вычисляется по трем приведенным выше признакам следующим образом. Будем записывать в каждую клетку таблицы по единице каждый раз, когда найдется узел, в котором соответствующие области являются областями  $(1, 2)$ ,  $(2, 3)$  или  $(3, 1)$  узла  $Y$  или областями  $(1, 2)$  — для «стрелки», и минус 1, если области являются областями  $(1, 3)$  или  $(2, 3)$  для «стрелки» или узла  $T$ . Закончив эту обработку,

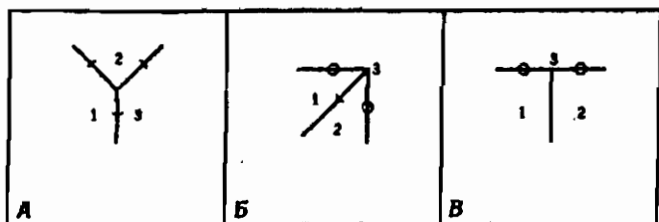


Рис. 69. Три типа узлов, которые можно использовать в качестве признаков в задаче декомпозиции изображения на отдельные объекты.

А. Узел типа  $Y$ . Б. «Стрелка». В. Узел типа  $T$ . Ребра, помеченные дужками, вероятнее всего, разделяют две грани одного и того же объекта, и для них показатель связи должен быть равен  $+1$ . Ребра же, помеченные кружочками, вероятнее всего, разделяют грани двух разных объектов, и для них показатель следует положить равным  $-1$ .

мы относим к одному объекту все области, для которых суммарный показатель связи не менее  $+1$ .

Пример подобной обработки рис. 68, А приведен на рис. 70. Мы рекомендуем читателю проделать аналогичную работу с рис. 71, где он сможет убедиться, что некоторые из локальных указаний (например, для узлов 8, 9 и 11) будут ошибочными, но учет всех узлов в целом дает правильную декомпозицию.

После того как мы воспользовались подобным алгоритмом декомпозиции, мы без особого труда сможем применять и методы распознавания изолированных объектов, получая в результате рабочее описание обстановки. Изящное обобщение работы Гузмана можно найти у Хаффмана [122].

Проблему «изучения структурного представления по примерам» рассматривает Уинстон [262], а «процедуру представления данных в вычислительных программах для понимания естественных языков» — Виноград [260].

Все эти примеры ясно показывают, что машины в состоянии провести анализ обстановки и описать ее в виде совокупности предметов, расположенных в пространстве вполне определенным образом. Конечно, существующие методы применимы лишь

в условиях хорошего освещения и для небольшого числа простых объектов, но так или иначе первый шаг уже сделан. Быть может, еще важнее то, что многие процессы, которые кажутся

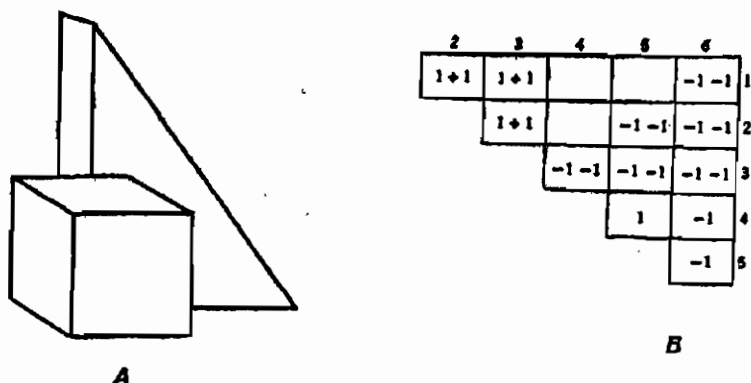


Рис. 70. Использование признаков рис. 69 для того, чтобы отделить куб от стоящей за ним призмы.

У грани 1 положительные показатели связи с гранями 2 и 3, а у граней 2 и 3 — между собой. В то же время у граней 1 и 3 отрицательные показатели связи с «гранью» 6, у грани 2 — с 5 и 6, у грани 3 — с 4 и 5 и т. д. На основании этого делается вывод о том, что грани 1, 2 и 3 принадлежат одному объекту. Аналогичным образом положительно связаны между собой грани 4 и 5, тогда как область 6 выделяется как самостоятельный «объект» (фон).

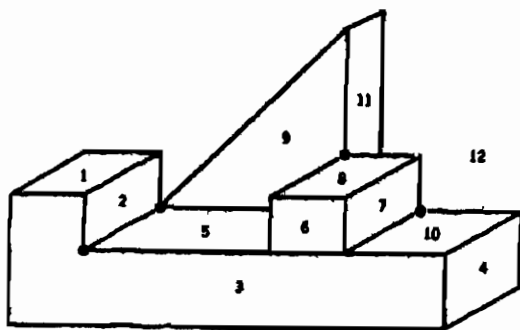


Рис. 71. Это изображение правильно анализируется с помощью признаков рис. 69, несмотря на то, что классификация узлов, помеченных жирными точками, была ошибочной.

само собой разумеющимися, например наша приобретенная в очень раннем возрасте способность распознавать отдельные объекты в перенасыщенной предметами комнате, на самом деле весьма сложны. И изучая их реализацию на машине, мы не только начинаем понимать, что именно требует объяснения, но

и получаем какое-то представление (возможно, ошибочное, но эти ошибки помогают иногда наметить новые направления исследований) о том, как могут быть устроены механизмы, которые мы надеемся обнаружить в нервных сетях. Но прежде чем вернуться к теории мозга, бросим беглый взгляд на то, как эвристический поиск и анализ обстановки объединяются в задаче управления роботом.

#### 4.4. КОНСТРУИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО РОБОТА

Если воспользоваться методами анализа обстановки и построить «модель мира», то в дальнейшем эту модель можно использовать как основу для планирования действий робота. Исследуем такую задачу интеграции функций более подробно. Рассмотрим роботы двух типов. Мы не будем заниматься здесь «слепыми» роботами, которые прокладывают себе дорогу «на ощупь», натываясь на препятствия и обходя их. Вместо этого мы изучим робот, который умеет анализировать изображения на телевизионном экране и «различать» (в том смысле, как об этом говорилось в разд. 4.3) объекты и, следовательно, обходить их, еще на них не наткнувшись. В любом случае, очевидно, желательно, чтобы система имела возможность запоминать предметы, на которые она уже наткнулась или которые она «зрительно» обнаруживала на своем пути, с тем чтобы не повторять своих прежних ошибок.

В роботах «глаз — рука» (рис. 72, А) того типа, которые создаются в рамках проекта МАС в Массачусетском технологическом институте и проекта «Искусственный интеллект» в Стэнфорде, телевизионная камера вводит в машину картинку, а машина извлекает из картинку информацию, необходимую для управления механической рукой, которая должна подбирать отдельные предметы, находящиеся в поле зрения телевизионной камеры, и что-то делать с ними. В подвижном роботе, создаваемом в Стэнфордском научно-исследовательском институте, телевизионная камера расположена на роботе сверху, а полученные ею изображения преобразуются в модель окружающей среды, на основе которой робот должен эффективно решать различные задачи, например, обнаружить какой-то объект и переместить его в нужное место, не прибегая к методу проб и ошибок.

Пользуясь либо сигналами дальности, либо изображениями, получаемыми от камеры в двух различных позициях для обеспечения «стереоскопичности» представления, машина может получать информацию о расстояниях. Специальное освещение исключает образование теней в поле зрения камеры, что позволяет избежать затруднений, возникающих из-за того, что машина принимает тени за материальный объект. В разд. 4.3 мы

уже познакомились с некоторыми методами анализа подобных зрительных образов, позволяющих распознавать изображение в терминах отдельных предметов, расположенных в строго определенных местах вокруг робота.

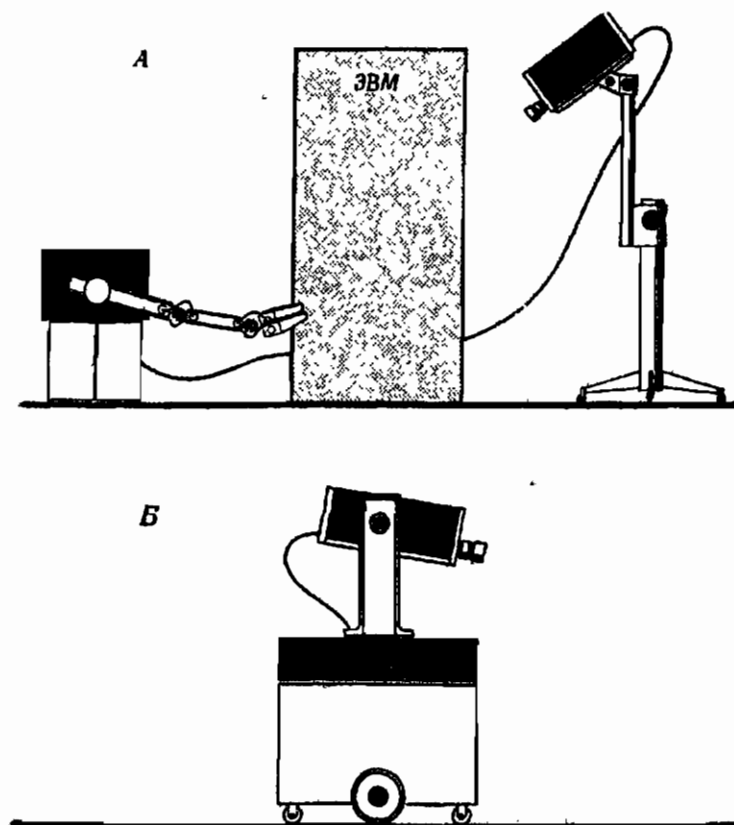


Рис. 72. Два типа роботов.  
А. Робот «рука—глаз». Б. Подвижный робот.

В 1970 г. самая сложная задача, которую умел решить робот «глаз — рука», состояла в следующем:

1. Проанализировать обстановку и найти в поле зрения «кучу» из трех зрительно различных элементов, например блок А, лежащий на блоке В, который в свою очередь лежит на блоке С.

2. Запомнить результат такого анализа (информацию, зафиксированную в памяти, мы обозначим буквой М).



3. Основываясь на  $M$ , вычислить координаты основания кучи. Преобразовать эти координаты в последовательность команд, которые заставят механическую руку «выдернуть» предмет, лежащий в основании кучи, в результате чего все три предмета окажутся разбросанными по поверхности стола. (Алгоритм этой операции составлен в соответствии с законами кинематики — хорошо изученного раздела механики.)

4. Проанализировать новую обстановку и, основываясь на полученных результатах, восстановить обстановку, соответствующую  $M$ . (Для этого от машины требуется уметь не только распознать, какие элементы старой обстановки соответствуют тем или иным элементам новой, она должна также «понять», что в заданном порядке строительных блоков в неявном виде содержится требование о том, что блок  $B$  нужно перемещать после блока  $C$ , а блок  $A$  — после блока  $B$  и что, прежде чем перемещать блок  $C$ , нужно освободить для этого место. Более того, поскольку программа, которую мы вкратце описываем, не использует зрительную обратную связь, машина должна обеспечивать траектории, исключаяющие «случайное» смещение блоков и обеспечивающие неподвижность блоков до тех пор, пока механическая рука не захватит их и не положит на место.)

К сожалению, у механической руки слишком много свободного хода в суставах, и поэтому даже при самых точных вычислениях в ее поведении могут возникать ошибки.

Более совершенная и требующая гораздо больше расчетов программа будет непрерывно использовать не только зрительную (с помощью телевизионной камеры), но и тактильную обратную связь; для этого на захватываемых поверхностях руки будут установлены датчики давления, благодаря чему рука сможет лучше избегать препятствия и не выпустит блок до тех пор, пока не установит его в полагающемся ему месте «кучи». (Некоторое представление об этой задаче читатель может получить, пытаясь складывать блоки с закрытыми глазами.)

Опишем теперь столь же нестрого одну из задач, с которой умеет справляться подвижный робот.

1. Проанализировать обстановку и распознать в ней несколько крупных препятствий, выяснив их расположение на полу комнаты.

2. Результат этого анализа (назовем его снова  $M$ ) запомнить.

3. Получив команду «подтащить большой куб к двери», использовать  $M$  для планирования двух траекторий, одной большого куба и другой, по которой большой куб можно подталкивать к двери.

4. Преобразовать этот план в последовательность команд, управляющих двигательной системой робота. (Поскольку такой робот движется как бы с «закрытыми глазами», он может на-

талкиваться на предметы, скрытые от него в начальный момент времени за другими предметами и оказавшиеся на его расчетном пути. Если это произойдет, то робот остановится и начнет по существу все заново, т. е. с фазы I.)

Остановимся теперь поподробнее на вопросе о том, как составить такую программу для управляющей машины робота, чтобы она могла автоматически перевести команду «подтащить большой куб к двери» в соответствующую последовательность команд для двигательной системы робота. (Все дальнейшее изложение основано на результатах работы группы ученых Стэнфордского научно-исследовательского института.)

Итак, предположим, что у робота уже есть машинная память, содержащая в закодированном виде внутреннюю модель мира, которая на рис. 73 представлена соответствующим «планом». В результате такого анализа он представляет окружающий его мир в виде комнаты, в одной из стен которой имеется дверь, а на полу стоят два небольших куба, один большой куб и диван. Кроме того, имеются участки, в которых, возможно, расположены другие предметы, но которые мы называем «неизученными», поскольку по каким-то причинам, возможно потому, что были закрыты от обозрения другими предметами, их не удалось проанализировать.

. Прежде всего управляющая машина разбивает проблему верхнего уровня «подтащить большой куб к двери» на две задачи второго уровня:

1. Подойти к большому кубу.
2. Подойти к двери, толкая куб перед собой.

Затем машина должна приступить к дальнейшему дроблению этих задач. На этом этапе нам потребуется планирование, т. е. мы должны выделить допустимые траектории и отобрать одну из них. (На этом этапе используются главным образом внутренние расчеты, в полной мере реализующие потенциальное быстрое действие машины, а не относительно медленное взаимодействие с внешней средой. При решении аналогичных задач в более сложной обстановке машине может потребоваться перебрать тысячи возможных траекторий, прежде чем она начнет посылать команды в свою двигательную систему. Об алгоритмах, направляющих процесс планирования, мы уже вкратце говорили в разд. 4.2.) В том случае, когда внешняя обстановка выглядит так, как это показано на рис. 73, машина может решить начать с маневра  $RC$  или  $RA$ , для того чтобы обойти ближайший маленький куб, а затем двигаться по прямой  $CD$  или  $AB$  соответственно, для того чтобы подойти к большому кубу. Затем она может выбрать путь  $RAB$  потому, что этот путь короче, и потому, что он не проходит через неизученную территорию, где можно натолкнуться на препятствия. Иначе говоря, команда I

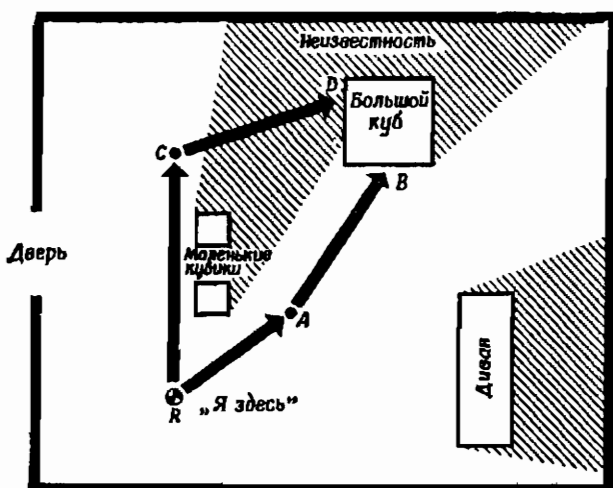


Рис. 73. Возможная «модель внешнего мира» робота. Показаны два пути  $RAB$  и  $RCD$ , по которым робот может прийти из своего внешнего положения  $R$  к большому кубу.

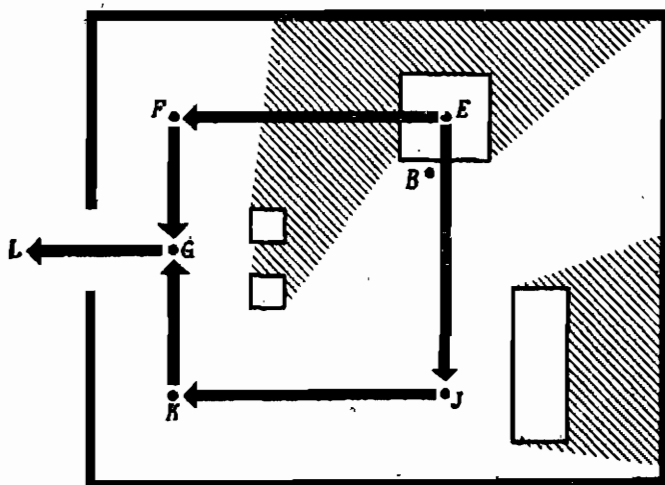


Рис. 74. Траектории  $EFG$  и  $EJKGL$ , по которым можно толкать большой куб к двери.

будет переведена в две следующие команды:

- i. Идти из  $R$  в  $A$ .
- iii. Идти из  $A$  в  $B$ .

Аналогичным образом рассматривается и шаг 2, для планирования которого нужно, например, сделать выбор между траекториями  $EJKGL$  и  $EFGL$  (рис. 74). Здесь предпочтение может

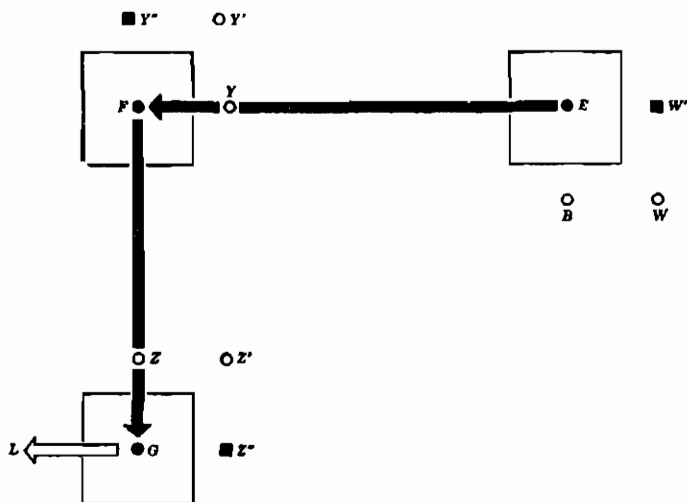


Рис. 75. Подробная траектория  $BW'W'Y'Y'Z'Z'L'$  движения робота из положения  $B$  для того, чтобы продвинуть большой куб по траектории  $EFGL$ .

быть отдано траектории  $EFGL$ , поскольку она значительно короче, и это может перевесить потенциальный риск путешествия по «неизвестной» территории. Иными словами, машина переведет команду 2 приблизительно следующим образом:

- 2i. Толкать куб  $E$  в  $F$ .
- 2ii. Толкать куб  $F$  в  $G$ .
- 2iii. Толкать куб  $G$  в  $L$ .

Почему «приблизительно»? Для того, чтобы учесть возможность наткнуться на непредвиденное препятствие по пути из  $E$  в  $F$ . Таким образом, составляя программу для фазы «толкать из  $E$  в  $F$ », машина должна включать в нее не только последовательность команд движения, но и «пакет тестов» типа: «Наткнулись ли вы на препятствие? Если нет, продолжайте согласно программе. Если да, исследуйте препятствие и скорректируйте

внутреннюю модель. По новой модели спланируйте новую траекторию с учетом нового начального расположения. После этого приступайте к выполнению плана». Упомянув о необходимости уточнять команды, мы в дальнейшем будем делать это лишь в той мере, в какой это может понадобиться в отсутствие непредвиденных препятствий.

Однако даже без учета непредвиденных случайностей дело начинает все более запутываться. Для того чтобы подтолкнуть большой куб из  $E$  в  $F$ , робот должен встать за него (т. е. в позицию  $W'$  на рис. 75) и затем продвинуться достаточно далеко (а именно до  $Y$ ) вперед, толкая перед собой куб, который в результате окажется в позиции  $F$ . Таким образом, машина должна не только перевести команду «Перетащить большой куб из  $E$  в  $F$ » в команду «Перейти из  $W'$  в  $Y$ », но и добавить перед ней еще две: «Перейти из  $B$  в  $W$ » и «Перейти из  $W$  в  $W'$ », обеспечивающие правильное расположение робота перед началом толкания. Используя сокращенную запись «Перейти ( $R, A$ )» вместо «Перейти из  $R$  в  $A$ », мы на третьем уровне уточнения команд получим следующую программу:

Перейти ( $R, A$ ).  
 Перейти ( $A, B$ ).  
 Перейти ( $B, W$ ).  
 Перейти ( $W, W'$ ).  
 Перейти ( $W', Y$ ).  
 Перейти ( $Y, Y'$ ).  
 Перейти ( $Y', Y''$ ).  
 Перейти ( $Y'', Z$ ).  
 Перейти ( $Z, Z'$ ).  
 Перейти ( $Z', Z''$ ).  
 Перейти ( $Z'', L$ ).  
 Стоп.

Кроме того, команду «Перейти ( $A, B$ )», обрабатываемую после команды «Перейти ( $R, A$ )», нужно разбить на две:

Повернуться на  $\theta$ .  
 Продвинуться на  $x$ .

Эти команды говорят роботу, что ему нужно повернуться на соответствующий угол  $\theta$ , а затем продвинуться прямо вперед на расстояние  $x$ . В то же время в разд. 3.2 мы уже видели, что подпрограмму «Повернуться на  $\theta$ » можно в конце концов выра-

зять в виде «Закрепить левое колесо и повернуть правое на 4 оборота», а подпрограмма «Продвинуться на  $x$ » может быть переведена как «Повернуть синхронно оба колеса на 12 оборотов».

Подобным образом нам придется пройти шесть иерархических уровней уточнения деталей, прежде чем мы перейдем от «простой» команды «Передвинуть большой куб к двери» к последовательности, составленной исключительно из основных логических команд и соответствующих сочетаний трех команд управления колесами:

Л. Закрепив Правое колесо, повернуть Левое на один оборот.

П. Закрепив Левое колесо, повернуть Правое на один оборот.

О. Повернуть одновременно Оба колеса на один оборот.

Выше, стараясь упростить изложение, я сознательно допустил одну серьезную ошибку (возможно, сделав непреднамеренно еще несколько). Читатель может проверить, насколько хорошо он усвоил материал разд. 4.1, постаравшись найти эту ошибку, прежде чем читать дальше.

Подведем итог. Для того чтобы робот мог эффективно взаимодействовать со сложной средой, ему нужно иметь (по крайней мере) следующее:

1. Набор рецепторов, с помощью которых можно ощущать мир, и набор подпрограмм анализа обстановки, позволяющих преобразовывать полученные ощущения в содержательные — с точки зрения возможных взаимодействий — отношения.

2. Набор эффекторов и набор соответствующих подпрограмм, позволяющие осуществлять элементарное взаимодействие со средой и перемещать рецепторы на стадии анализа обстановки.

3. Внутреннюю модель, отражающую результаты всех проводившихся до этого и не утративших своей актуальности анализов обстановки и всех действий системы. В последнем замечании как раз и таится ответ на вопрос, заданный читателю только что: в предложенной выше программе никак не предусмотрена возможность изменения модели, связанная с изменением взаиморасположения робота и куба.

**Упражнение.** Напишите свой вариант программы, учитывающий такую возможность. (*Указание:* при этом окажется необходимым различать команду «Перейти ( $R, A$ )» и «Перейти ( $W, Y$ )», поскольку в последнем случае приходится еще и толкать ящик.)

4. Решатель задач, умеющий по результатам анализа обстановки производить коррекцию внутренней модели, осуществлять компиляцию программы действий по имеющимся командам верхнего уровня и, если это окажется необходимым, прерывать

прочую деятельность для того, чтобы скорректировать модель и перепланировать свои действия.

Перечисленные выше четыре функции кажутся необходимыми и для адаптивных организмов. Теперь мы можем снова вернуться к теории мозга, которой посвящена третья часть этой книги. Во второй части мы рассмотрели функции, необходимые для организации разумного поведения, а также возможные способы реализации некоторых из них на вычислительной машине. Сейчас перед нами стоит вопрос, как воспользоваться пониманием этих функций, не попадая при этом в ловушку ошибочных представлений о том, что мозг действует как последовательный автомат. Мы уже подчеркивали в разд. 1.1, что большинство работ по искусственному интеллекту основано на выполнении последовательности простых операций над пассивно хранящимися в памяти данными, тогда как наша теория мозга уделяет главное внимание параллельной работе множества операторов над целой структурой взаимосвязанных данных и схемам управления, реализующим действия организма.

## ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

# ТЕОРИЯ МОЗГА

---

### Глава 5

#### НЕЙРОННАЯ РЕГУЛЯЦИЯ ДВИЖЕНИИ

В третьей части книги мы перейдем от общих функциональных соображений к изучению мозга как структурного субстрата процессов восприятия, памяти и принятия решений. Учитывая наш тезис о деенправленности этих функций, мы считаем уместным посвятить настоящую главу изучению нейронного механизма управления движениями, поскольку именно в движениях проявляются действия организма.

В разд. 5.1 мы рассмотрим работу мышц и увидим, как спинной мозг с помощью обратной связи управляет движениями. В разд. 5.2 (читатель, уже пресытившийся анатомической терминологией, может его опустить) мы расскажем, каким образом структуры среднего и переднего мозга модулируют и направляют процессы управления, протекающие в спинном мозгу. В частности, мы обратим внимание на коренные изменения основных систем связи, обусловленные развитием новой коры у млекопитающих. Для того чтобы связать эти морфологические соображения с задачей управления роботом (разд. 4.4), мы посвятим разд. 5.3 анализу управления ходьбой (к сожалению, слишком краткому), обратив особое внимание на взаимодействие зрительных и вестибулярных входных сигналов, сигналов обратной связи от спинного мозга и от внутренней модели внешнего мира, приводящее к целенаправленной деятельности. Рассмотрение анатомии (разд. 5.2) и динамики (разд. 5.3) естественным образом подведет нас к изучению иерархического устройства системы управления движениями, которым мы и займемся в разд. 5.4. В частности, нас интересует взаимодействие «настроек», осуществляемых на высшем и рефлекторном уровнях и уточняющих грубое «моторное» управление, обеспечиваемое более древними областями переднего мозга. Здесь, по-видимому, важную роль играет принцип, состоящий в том, что наши движения управляются как по баллистической схеме, так и с помощью механизма обратной связи, обеспечивающего «тонкую настройку» движения в конце траектории.



Наконец, в разд. 5.5 мы постараемся связать материал предыдущих четырех разделов с основной темой нашей теории мозга, с гипотезой о том, что вычисления, производимые в мозгу, распределены по областям, а не управляются каким-то единым верховным центром.

### 5.1. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ И СПИННОЙ МОЗГ

При изучении нервных механизмов моторной деятельности очень важно понять центральную роль спинного мозга в организации движения конечностей и их координации, который обеспечивает компенсацию непрерывно меняющейся внешней обстановки и осуществляет коррекцию позы; это дает возможность организму сохранять равновесие при сложной двигательной активности. В этом разделе мы познакомимся с некоторыми контурами обратной связи спинного мозга, а в следующем опишем в общих чертах механизмы управления «высшего уровня», связанные с поведением.

Спинной мозг (рис. 76) расположен в позвоночнике. На поперечном сечении спинного мозга можно отчетливо различить *серое вещество* (тела нервных клеток и дендриты) и *белое вещество* (в основном аксоны). Входные и выходные каналы четко разделены: тела *первичных сенсорных клеток* (клеток, дендриты которых «специализированы» на получении сенсорной информации) сосредоточены в ганглиях задних корешков, а их аксоны попадают в задние рога спинного мозга по задним корешкам. Тела мотонейронов расположены в передних рогах спинного мозга, а их аксоны идут в составе передних корешков. Передний и задний корешки объединяются, образуя нервный ствол. Все тело животного разделено на ряд сегментов, каждый из которых иннервируется нервами, отходящими от соответствующего сегмента спинного мозга.

На рис. 76 видно, что спинной мозг состоит в основном из белого вещества. Здесь проходит множество восходящих и нисходящих нервных волокон, связывающих различные сегменты спинного мозга между собой, а также спинной мозг с головным. Серое вещество разделяет белое вещество спинного мозга на четыре тяжа, получивших название *столбов*: два *боковых* (или латеральных), один *задний* (дорсальный) и один *передний* (вентральный).

О значении путей, приходящих в спинной мозг извне, свидетельствует тот факт, что движение мышцы может возникнуть не только в ответ на что-то увиденное или услышанное, но и может быть вызвано мыслью или прикосновением. Другими словами, мотонейрон может реагировать на входные сигналы

любой сенсорной модальности или даже на смесь таких сигналов, причем они могут смешиваться даже очень далеко от периферии. В этом разделе мы сосредоточим свое внимание на непосредственных связях между сенсорными клетками и мотонейронами (хотя таких связей относительно мало), к которым относятся и *моносинаптические* рефлекторные дуги, где между

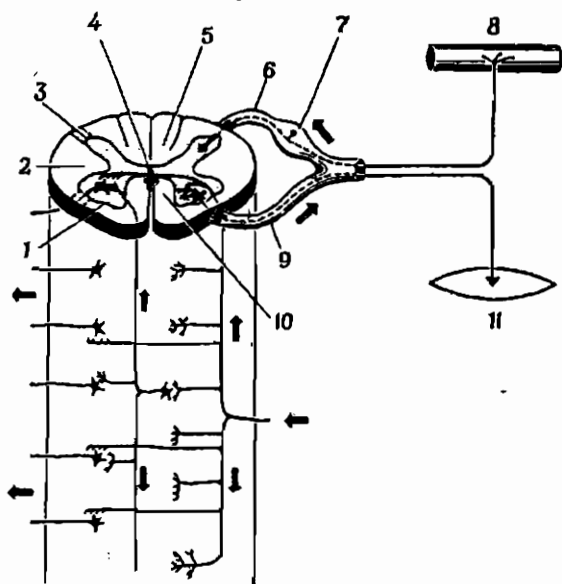


Рис. 76. Схема поперечного сечения спинного мозга.

Сенсорная информация (в том числе и сигналы обратной связи) поступает по задним корешкам, а управляющие сигналы к эффекторам уходят по передним корешкам. Нервная сеть, изображенная под поперечным сечением, должна напоминать о богатстве восходящих и нисходящих путей, идущих по спинному мозгу. 1—передний рог; 2—боковой столб; 3—задний рог; 4—центральный канал; 5—задний столб; 6—задний корешок; 7—ганглий заднего корешка; 8—мышечные веретена и сенсорная поверхность; 9—передний корешок; 10—передний столб; 11—мышцы-эффекторы.

рецептором мышцы и мотонейроном имеется всего один промежуточный синапс, и лишь весьма кратко упомянем о связях между различными сегментами спинного мозга, обеспечивающими координацию движений конечностей и автоматическое поддержание вертикального положения тела.

В таком сжатом описании, естественно, нет возможности уделить должное внимание всем деталям строения спинного мозга, которые должна учитывать любая действительно глубокая теория движения животных. Мы же преследуем здесь более ограниченную цель — дать общее представление о том, к чему привел бы подобный детальный анализ.

То, что мы привыкли называть *мышцей*, на самом деле состоит из тысяч отдельных *волокон*. Каждый мотонейрон, тело которого расположено в спинном мозгу, образует синапсы на нескольких из этих мышечных волокон и управляет ими. Те мотонейроны, которые управляют тонкими движениями, например движениями пальцев у приматов, воздействуют на очень небольшое число волокон каждый. В других случаях, например в плече, один мотонейрон может управлять тысячами мышечных волокон. Волокна группируются в *пучки*, из которых в свою очередь образуются мышцы, причем в отдельных мышцах число волокон достигает нескольких миллионов. Волокна одной *двигательной единицы* (т. е. волокна, иннервируемые одним мотонейроном) входят в состав разных пучков, благодаря чему действие каждой двигательной единицы распространяется на всю мышцу. Существует два пути повышения уровня развиваемого мышцей усилия: один из них, играющий более важную роль, основан на увеличении числа волокон, включающихся в процесс сокращения в результате синаптической активации; другой — повышение активации отдельного мышечного волокна — приводит к гораздо менее значительному увеличению активности. По мере сокращения мышцы в процесс включаются все новые группы волокон; сначала относительно мелкие волокна, затем покрупнее, затем еще более крупные, причем на каждом этапе относительное приращение усилия примерно одинаково, что способствует плавности движений.

Из разд. 2.2 мы уже знаем, что можно приказывать мышце перестать сокращаться, но нельзя непосредственно заставить ее расслабиться, и поэтому противоположными движениями управляют пары мышц-антагонистов (рис. 77).

Однако в управлении движением в таких суставах, как плечевой, имеющий более одной степени свободы, участвует много мышц, и здесь нет особого смысла выделять пары мышц-антагонистов (см. рис. 36).

В большинство естественных движений вовлекаются сразу несколько суставов. Например, для того чтобы с максимальной силой ухватиться за что-нибудь рукой, кисть должна быть фиксирована в состоянии разгибания. Этим занимаются специальные мышцы, которые можно назвать фиксаторами. Мышцы, работающие одновременно и поддерживающие мышцу, осуществляющую основное движение, называются *синергистами*. Например, если мы пытаемся поднять что-нибудь одним пальцем, в работу включается сразу много мышц. Если развиваемое при этом усилие недостаточно, то в действие вступают и мышцы кисти; если и этого мало — включаются мышцы предплечья, а на этом этапе начинают действовать и многие другие мышцы, расположенные по всему телу и обеспечивающие поддержание позы.

Спинальный мозг осуществляет многие важные рефлексы. Например, у спинального животного (т. е. у животного, у которого перерезан спинной мозг на уровне верхних сегментов, так что головной мозг не участвует в управлении движениями) наблюдается чесательный рефлекс: оно может дергать ногой, стараясь почесать раздражаемый участок тела. При этом движения в суставах происходят одновременно (синергия). Те же общие реакции наблюдаются и у интактного животного (с ненарушенной нервной системой), но в этом случае движения в разных суставах могут изменяться. Таким образом, помимо замкнутого спинального контура низшего уровня, обеспечивающего, как мы

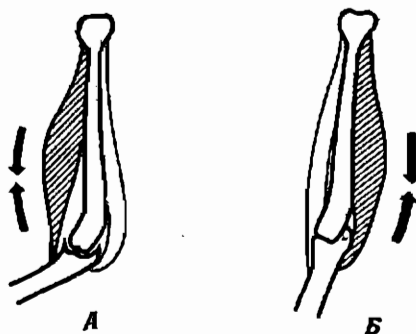


Рис. 77. Пара мышцы-антагонистов.

Активное сокращение мышцы-сгибателя вызывает пассивное расслабление ее антагониста — мышцы-разгибателя (А) и наоборот (Б). Сокращаясь, сгибатель уменьшает суставной угол (А), а разгибатель — увеличивает его (Б).

увидим ниже, рефлекторные движения, независимо от величины нагрузки, без помощи высших центров, в этих грубых макродвижениях могут участвовать и высшие центры, обеспечивающие их тонкую настройку. Даже после перерезки спинного мозга *какая-то* информация может передаваться от головы к телу. Если повернуть голову, то кожа на шее передаст сведения об этом телу, что, возможно, вызовет естественные позные рефлексы. К тому же движения головы изменяют положение центра тяжести. Тем не менее можно утверждать, что при перерезке спинного мозга поток информации от головы к телу очень резко сокращается и что остающейся информации явно недостаточно для управления упомянутыми рефлексам.

В связи с этим мы будем считать, что роль головного мозга состоит в упорядочении выбора мышц-синергистов, последовательности их включения в работу и подавления нежелательных составляющих. Такая организация управления, вероятно, эффективна для большинства задач, но, естественно, она ограничивает

репертуар возможных движений. (Например, становится трудно поглаживать себя одной рукой по животу, одновременно хлопывая другой рукой по голове. А то, что человеку это удастся, свидетельствует о новом уровне приспособляемости, достигнутом за счет развития новой коры головного мозга.) Таким образом, главная наша задача заключается в том, чтобы понять, как организм целенаправленно выбирает группу мышц-синергистов, изменяет и координирует их совместную работу.

В разд. 3.3 мы уже убедились в том, что обратная связь (рис. 78), т. е. возможность сравнивать реальный результат с «желаемым», должна играть важную роль в процессах управления как в организме, так и у робота. Подобно тому как,

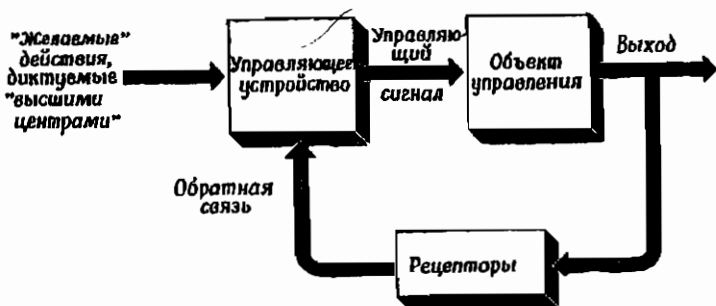


Рис. 78. Система с обратной связью, в которой в регуляторе управляющий сигнал вычисляется по разности между действительным поведением системы и «желаемым» характером этого поведения.

управляя автомобилем, мы для поддержания постоянной скорости должны нажимать на тормоз, если дорога идет под гору, и на газ, если дорога пошла вверх, так и в нервной системе неразумно было бы ожидать, что для обеспечения постоянства реакции от высших центров непрерывно поступают какие-то постоянные команды. Напротив, для плавных координированных действий, вероятно, необходимы весьма сложные и разнообразные процессы управления. Посмотрим, в частности, как локальные контуры обратной связи в спинном мозгу обеспечивают требуемое поведение в условиях меняющейся нагрузки.

Обратная связь используется, например, в нервной системе для поддержания относительно постоянной длины мышцы при небольших изменениях нагрузки. Для того чтобы понять, каким образом ЦНС получает сигналы обратной связи для компенсации такого рода, возьмем кусок резинки, длина которой в нерастянутом состоянии равна  $l_0$ . Закрепим оба конца этой резинки зажимами, которые можно разводить относительно друг друга на разные расстояния  $l$  (рис. 79). Выберем на резинке две про-

извольные точки  $A$  и  $B$ , расстояние между которыми при нерастяннутом состоянии резинки равно  $d_0$ ; тогда до тех пор, пока расстояние между зажимами будет не больше  $l_0$ , т. е. резинка будет оставаться нерастянутой, расстояние между этими точками будет оставаться равным  $d_0$ . Но если зажимы развести на большее расстояние, то резинка растянется и расстояние между точками  $A$  и  $B$  возрастет пропорционально увеличенной длине всей

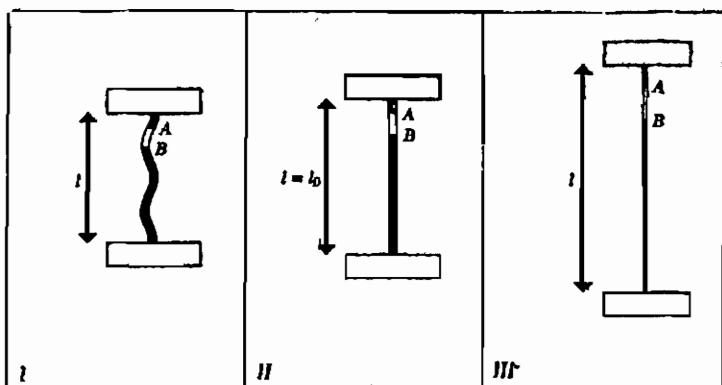


Рис. 79. Длина участка  $AB$  пропорциональна расстоянию  $l$  между двумя зажимами при условии, что это расстояние не меньше длины  $l_0$  резинки в нерастяннутом состоянии.

- I.  $l < l_0$  — резинка не растянута и «областается».
- II.  $l = l_0$  — резинка не растянута, но распрямлена.
- III.  $l > l_0$  — резинка растянута.

резинки. Это новое расстояние  $d$  между  $A$  и  $B$  можно подсчитать по формуле  $d = (l/l_0) \cdot d_0$ , если резинка растянута. А это позволяет нам определить  $l$  косвенно, измерив расстояние между точками  $A$  и  $B$  и восстановив по нему значение  $l$  по формуле  $l = l_0(d/d_0)$ , работающей всякий раз, когда  $l$  больше, чем  $l_0$ .

Описанная схема отражает принцип получения нервной системой информации о длине мышцы. В любой мышце можно увидеть не только крупные «рабочие» мышечные волокна, называемые *экстрафузальными*, сокращение которых изменяет взаиморасположение костей, к которым они прикреплены, но и мелкие *интрафузальные волокна*, на которых расположены окончания особых рецепторов, *мышечных веретен*; интенсивность разряда мышечных веретен сообщает нервной системе о степени растяжения мышечных волокон в соответствующей области по тому же самому принципу, как в случае резинки по длине «участка  $AB$ » можно было определить длину резинки в целом.

Таким образом, контур обратной связи, используемый ЦНС для управления длиной мышцы, в основных чертах выглядит

так, как показано на рис. 80; для простоты мы изобразили на схеме один мотонейрон, одно экстрафузальное и одно интрафузальное волокно, тогда как на самом деле в каждой крупной мышце имеются целые популяции таких элементов. Будем считать, что верхняя точка закреплена неподвижно, а нижняя может перемещаться вверх и вниз при различных условиях нагрузки и сокращения мышцы. На нашей схеме  $\alpha$ -мотонейрон

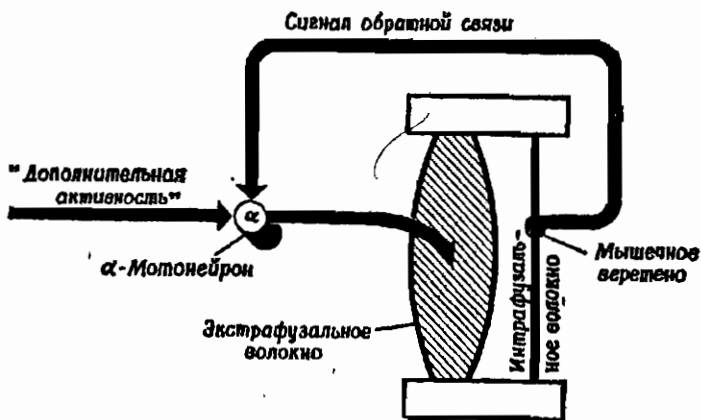


Рис. 80. Система с обратной связью для регулирования длины мышцы, построенная на принципе, представленном на рис. 79.

Мышечное веретено контролирует степень растяжения интрафузального волокна относительно длины покоя, а получаемый сигнал используется для увеличения активности  $\alpha$ -мотонейрона, что в свою очередь вызывает сокращение экстрафузального волокна до тех пор, пока это растяжение не компенсируется.

(т. е. мотонейрон, управляющий «рабочими» экстрафузальными волокнами) получает входные сигналы двух типов: «внешние» стимулы (комбинированный эффект сигналов «высшего управления», взаимодействия нескольких конечностей и т. п.) и сигналы «обратной связи», приходящие от мышечных веретен. До тех пор пока внешний стимул остается достаточно сильным для того, чтобы «рабочие» волокна могли поддерживать общее сокращение мышцы, не вызывая растяжения мышечного веретена, рецепторная иннервация почти ничего не добавляет к этому «внешнему» стимулу. Предположим, однако, что эти «внешние» стимулы таковы, что они поддерживают мышцу в состоянии, соответствующем состоянию интрафузального волокна на грани растяжения. Если повесить затем к нижнему зажиму дополнительный груз, то произойдет следующее:

1) дополнительный вес вызовет дополнительное растяжение мышцы;

2) в результате этого растянется и мышечное веретено, которое начнет генерировать сигналы обратной связи;

3) это приведет к повышению суммарного уровня возбуждения на входе, а значит, и на выходе  $\alpha$ -мотонейрона;

4) вследствие этого мышца дополнительно сократится и с течением времени по крайней мере частично вернется к своей прежней длине.

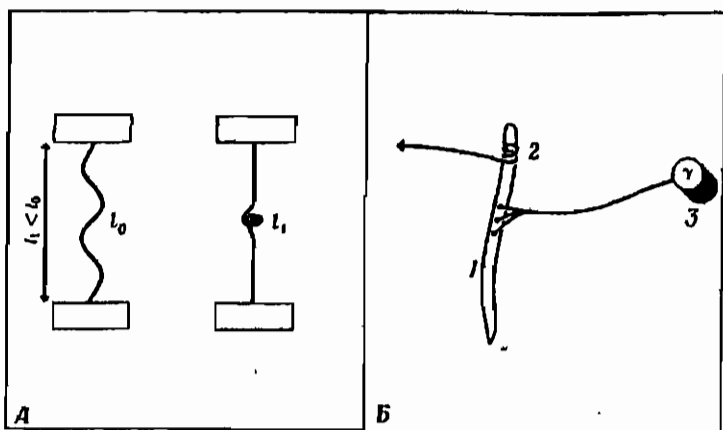


Рис. 81. Длину покоя резинки можно уменьшить, завязав на ней несколько узелков (А, справа), а длину покоя интрафузального волокна можно уменьшить, вызвав его сокращение, управляемое  $\gamma$ -мотонейроном.

1 — область, сокращающаяся при активации мотонейрона; 2 — мышечные веретена; 3 —  $\gamma$ -мотонейроны.

У этой схемы организации управления есть две отличительные особенности.

I. Можно сокращать мышцу до любой длины, меньшей чем длина покоя интрафузального волокна, вызывая достаточно интенсивный разряд  $\alpha$ -мотонейрона, но, к сожалению, размер необходимого возбуждения варьирует в зависимости от нагрузки.

II. Можно обеспечить сохранение длины мышцы при минимальной чувствительности к изменениям нагрузки, но, к сожалению, это справедливо лишь в том случае, когда длина мышцы равна длине покоя соответствующего интрафузального волокна.

Догадливый читатель, возможно, уже нашел выход из этих затруднений: нужно *изменять* длину покоя интрафузального волокна. Возвращаясь к нашему примеру с резинкой (рис. 79), представим себе, что мы завязываем узлы в средней части резинки (рис. 81, А). Нервная система достигает подобного эффекта благодаря тому, что в ней, кроме  $\alpha$ -мотонейронов, управляющих



сокращением «рабочих» экстрафузальных волокон, имеется множество  $\gamma$ -мотонейронов (рис. 81, Б);  $\gamma$ -мотонейроны образуют синапсы в средней части интрафузальных волокон и могут вызывать их сокращения, что приводит к уменьшению эффективной длины покоя. (Напомним, что все эти мотонейроны расположены в спинном мозгу, и их аксонам приходится передавать возбуждение на большие расстояния, прежде чем они достигнут мышечных волокон.)

Итак, если нам надо изменить длину мышцы, мы можем соответствующим образом возбудить  $\alpha$ -мотонейроны, обеспечивающие требуемое сокращение мышцы в условиях минимальной нагрузки, одновременно возбуждая  $\gamma$ -мотонейроны, с тем чтобы вывести интрафузальные волокна на новый уровень растяжения и обеспечить необходимые сигналы обратной связи относительно новой длины волокна. Таким образом,  $\alpha$ -активация быстро выводит длину мышцы в «требуемую окрестность», а  $\gamma$ -активация осуществляет «тонкую настройку» длины, подгоняя активность  $\alpha$ -мотонейронов к причудливым изменениям внешней нагрузки.

В действительности же дело обстоит еще сложнее. Например, как показывает рис. 82, в рассматриваемой системе есть еще один источник сигналов обратной связи — так называемые *тельца Гольджи*, находящиеся в сухожилиях; при мышечном сокращении эти тельца растягиваются и в них возникают нервные импульсы, поступающие в нервные центры и сообщающие о размерах усилий, развивающихся в сухожилиях. Кроме мышечных веретен, реагирующих на изменение длины мышцы, о которых здесь говорилось, существуют и другие рецепторы, контролируемые по типу обратной связи скорость растяжения, участвуя тем самым в обеспечении плавности происходящих движений (в отличие от стабилизации заданной позы). И наконец, необходимо отметить все еще нерешенную проблему распределения управления движением между  $\alpha$ - и  $\gamma$ -системами. Но несмотря на все эти нерешенные вопросы, мы по крайней мере начинаем понимать, как  $\alpha$ -система может обеспечить быструю и приблизительно верную реакцию, после чего в игру вступает обратная связь, освобождающая нервную систему от необходимости учитывать в своих расчетах незначительные изменения периферических условий. Возвращаясь к нашим рассуждениям в разд. 3.3, испытываешь большое искушение считать, что  $\alpha$ -система обеспечивает баллистическую, а  $\gamma$ -система — следящую составляющую комбинированной баллистико-следящей стратегии, которая позволяет быстро переводить систему в новое состояние, не теряя в то же время преимуществ, которые дает компенсация ошибок с помощью сигналов обратной связи.

Получив некоторое представление о роли обратной связи в упрощении задач управления изолированной мышцей для «выс-

ших центров», займемся теми следствиями, которые вытекают из наших представлений о том, что движениями в каждом суставе управляет по меньшей мере пара мышц. Рассмотрим пару сгибатель — разгибатель, схематически изображенную на рис. 83. Совершенно ясно, что угол в этом суставе зависит от

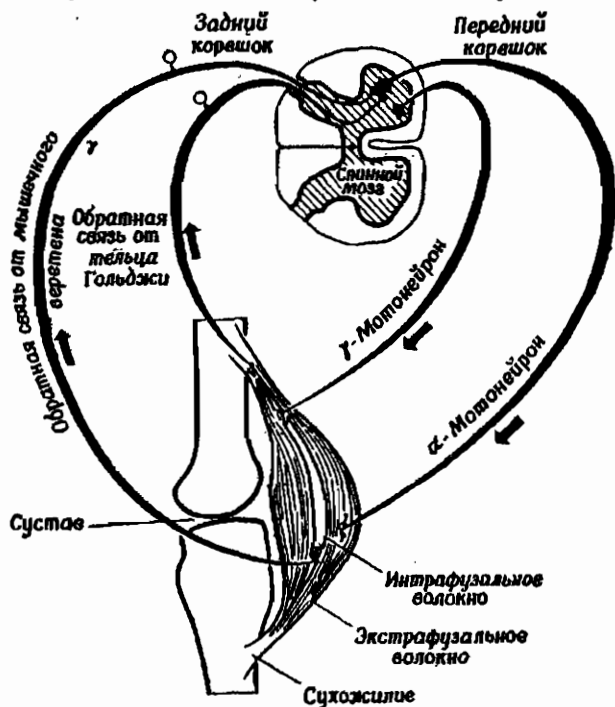


Рис. 82. Менее схематичное изображение механизмов, представленных на рис. 80 и 81, показывающее взаиморасположение мышц и костей, а также контуры управления, проходящие через спинной мозг.

того, насколько сокращение сгибателя превосходит по силе сокращение разгибателя. Не менее ясно, что было бы расточительством сильно сокращать обе мышцы, чтобы добиться разницы, которую можно получить и при незначительных сокращениях тех же мышц. Поэтому, если нервной системе нужно, например, уменьшить угол в суставе, она должна не только *увеличить* сокращение сгибателя, но и *уменьшить* сокращение разгибателя. На рис. 83 представлена схема с обратной связью, автоматически осуществляющая такие координированные действия. На этой схеме рецептор мышечного веретена не только возбуждает α-мотонейрон своей собственной мышцы, но и понижает возбудимость, обычно (хотя, возможно, и не всегда; см. [224])

через посредство тормозного вставочного нейрона,  $\alpha$ -мотонейрона мышцы-антагониста. Поэтому выходной сигнал мышечного веретена не только увеличивает сокращение мышцы-агониста,

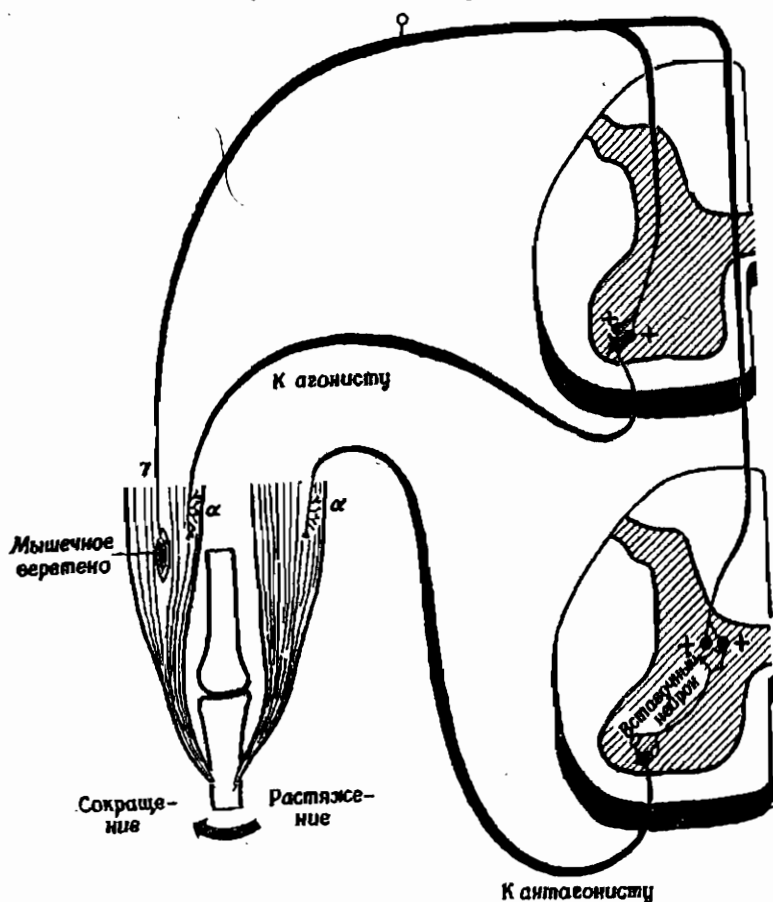


Рис. 83. Схема, дополняющая рис. 82.

Обратная связь от мышечного веретена мышцы-агониста не только повышает уровень возбуждения  $\alpha$  мотонейрона, управляющего сокращением этой мышцы, но кроме того, через посредство тормозного вставочного нейрона понижает уровень возбуждения  $\alpha$ -мотонейрона, управляющего сокращением мышцы-антагониста.

но и уменьшает сокращение мышцы-антагониста, обеспечивая экономию мышечных усилий при выполнении заданного движения.

Приведенные выше соображения позволяют понять основные достоинства сочетания иерархической организации управления с локальными контурами обратной связи, «уменьшающими

загрузку высших уровней вычислительными задачами». Мы могли бы продолжить начатое здесь исследование локальных контуров управления, показав, как взаимосвязаны нейроны, принимающие участие в управлении различными суставами одной и той же конечности, каким образом две конечности одной пары связаны внутрисегментарными рефлексамии, получившими свое название, потому что они происходят в пределах одного сегмента спинного мозга, и как на этой основе достраиваются межсегментарные рефлексии, объединяющие действия различных сегментов спинного мозга и обеспечивающие плавные автоматические коррекции позы или последовательность шагов во время локомоции. Однако, вместо того чтобы подробно разбирать здесь все эти связи (если бы мы даже и решились на это, многие наши рассуждения оказались бы спекулятивными, ибо спинной мозг — настолько сложная система, что в нем до сих пор еще немало загадок для нейрофизиолога), мы попытаемся дать читателю возможность почувствовать всю их сложность на примере процесса ходьбы (разд. 5.3). Некоторые читатели, быть может, захотят сначала ознакомиться с общим очерком анатомии некоторых отделов головного мозга, участвующих в управлении движением.

## 5.2. ЕЩЕ ОДНО ОТСТУПЛЕНИЕ.

### НЕИРОАНАТОМИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Цель этого раздела (его можно опустить без ущерба для понимания дальнейшего материала) состоит в том, чтобы на основе данных, изложенных в разд. 5.1, наметить схему различных спинномозговых рефлекторных путей, для которых сенсорная информация поступает в спинной мозг по задним корешкам, а «команды» мотонейронов покидают его по передним корешкам. При этом может оказаться полезным вспомнить терминологию, введенную в разд. 2.3.

Прежде всего познакомимся с общей организацией двигательной системы, схематически представленной на рис. 84. Эта схема основана на рисунках Наута, о лекциях которого уже упоминалось на разд. 2.3. Рассмотрим сначала белые блоки и связи, показанные сплошными линиями. Помимо «локальных каналов», являющихся одновременно как внутри-, так и межсегментарными, у позвоночных имеются еще два важных канала. Четвертый канал — «новый» спино-таламический тракт — имеется только у лекопитающих; его мы рассмотрим позднее. Второй канал, восходящий от вторичных сенсорных клеток к мозжечку, расположенному позади ствола мозга, обеспечивает мозжечковый контроль. Третий канал образован древним лемнисковым трактом и встречается у животных, находящихся на более низ-

кой стадии развития, чем млекопитающие (по причинам, которые станут ясными в разд. 5.3, этот контур на схеме не показан). Лемнисковый тракт представляет собой «древнюю» часть спино-таламического тракта, состоящего из двух филогенетически различных компонентов, которые несут различные функции и оканчиваются в разных центрах. Этот тракт идет от сенсорных ядер в передний мозг через клетки таламуса. [Перерезка спино-таламического тракта вызывает по крайней мере временное исчезновение чувства боли (в связи с этим его иногда называют «болевым трактом»). Полезная роль боли состоит в том, что она вызывает активацию ретикулярной формации (о чем речь пойдет ниже).]

Даже у человека лишь примерно одна десятая волокон спино-таламического тракта идет непосредственно в таламус, а остальные «отклоняются» и уходят в ретикулярную формацию (РФ). РФ образована нейронами ствола и спинного мозга (но не переднего мозга), которые не специализированы по сенсорным модальностям. (Ретикулярная формация может служить классическим примером области со спорными границами. Предложенное выше определение является, вероятно, наиболее широким.)

Клетки РФ часто называют «неспецифическими» клетками, поскольку они способны воспринимать сенсорные стимулы разной модальности. Однако не следует считать, что у нейронов РФ нет специфических функций. В том, что зачастую кажется нам хаотичным, далеко не всегда отсутствует всякий порядок. В пределах РФ наблюдается временная миграция функций, проявляющаяся в том, что, по-видимому, одна и та же клетка в разные моменты времени может настраиваться на прием совершенно различных стимулов. Это не должно нас удивлять, если только мы не слишком стремимся переносить то, что нам известно о периферических проекциях, на весьма сложным образом взаимосвязанные центральные клетки. Не следует также считать, что подобная миграция функций свидетельствует о неограниченных возможностях каждого нейрона. В любом таком изменении нужно уметь увидеть заложенные в нем степени свободы, так же как и в поздних рефlekсах, которые вызывают удивление лишь до тех пор, пока мы не поймем, что все происходящее строго предопределено. Такое отсутствие монополии неизбежно, коль скоро речь идет об области, в задачу которой входит управление теми или иными функциями, причем характер управления зависит от многих модальностей: мы можем поднять ногу, потому что наступили на гвоздь или увидели перед собой ступеньку, или услышали приказ и т. п.

РФ обладает чрезвычайно широким диапазоном регуляторных функций. У отдаленных предков человека она, возможно, представляла собой высший уровень нервной регуляции. РФ



и до сих пор играет большую роль в регуляции «позы» и «устойчивости». Вместе с локальными каналами спинного мозга она осуществляет поддержание позы в гравитационном поле, т. е. обеспечивает устойчивость организма во внешнем пространстве. РФ проникает также в *гипоталамус*, вместе с которым она обеспечивает гомеостаз организма, т. е. примерное постоянство внутренней среды (содержание в крови углекислоты, сахара и т. п.), функционирование механизма дыхания и регуляцию кровяного давления. РФ несет и свои особые функции, поддерживая различные «типы» поведения организма, и в первую очередь — чередование периодов сна и бодрствования, а также регулируя переключение с одного режима на другой. Из всех функций РФ мы наиболее тщательно познакомимся именно с системой управления «типами» поведения, модель которой описана в разд. 7.1.

Перейдем теперь к заштрихованным блокам и пунктирным связям на рис. 84. Новая кора (неокортекс) полушарий головного мозга — характерный признак млекопитающих, «скачкообразно» возникший в процессе эволюции. Чем больше развита новая кора, тем на более длительные сроки может животное «планировать» свою деятельность. Отделы мозга, начиная от среднего мозга и ниже, заняты тем, что происходит «здесь и в данный момент». Даже шимпанзе неспособны подобно человеку предвидеть будущее и учитывать это при планировании своих действий. Долгосрочному планированию способствуют также сложные социальные взаимодействия, ставшие возможными благодаря тому, что различные области коры головного мозга человека приспособлены к управлению его речевой деятельностью.

Вместе с новой корой появились и новые контуры управления. Образовались новые ядра (группы клеток) таламуса, на которых находятся синапсы спино-таламического тракта, несущего в новую кору информацию, очищенную от «примесей» эффектов древних путей, проходящих через РФ. Появился также новый прямой двигательный тракт, названный *пирамидным*, передающий команды непосредственно от новой коры в спинной мозг. У приматов, способных производить весьма тонкие манипуляции (может, их следовало бы называть «педипуляциями», поскольку они производятся ногами?), имеются даже прямые связи между новой корой и отдельными мотонейронами.

Эти новые структуры существуют не обособленно от более старых, а скорее расширяют и модифицируют функции старых структур. С подобной схемой модификации функций, вызванной появлением новой коры, мы познакомимся в разд. 6.3, где будут намечены естественные возможности соматотопического подключения зрительной коры к верхнему двуххолмию, обеспечивающего большее совершенство зрительного поведения млекопитающих по сравнению с более примитивными позвоночными. Пирамид-

ный путь также имеет тенденцию идти в обход более древних двигательных путей, но лишь 10% его волокон идут непосредственно к мотонейронам. Возможно, что это объясняется как тем, что регуляция движения носит в основном иерархический характер, т. е. высшие центры определяют структуру возбуждения целых групп мотонейронов, а не каждого из них, так и тем, что большая часть исходящих сигналов несет прогноз того, что должны делать такие группы эффекторов, и, следовательно, направляются в относительно высокорасположенные спинномозговые центры, где осуществляется контроль сигналов обратной связи от низших центров и с периферии. Затем такие «корреляционные центры» получают возможность «доложить» головному мозгу о том, насколько происходящие движения «соответствуют плану». (Все это весьма напоминает идею *внутренней* обратной связи [69].) Каждой структуре возбуждения высших центров, ответственной за инициацию движения, соответствует определенная структура возбуждения сенсорных центров, и каждое осуществленное движение вызывает изменение структуры сенсорного входа. Таким образом, между сенсорной и моторной системами существуют как внутренние, так и внешние взаимосвязи.

Занятно, что в литературе «новые» пирамидные пути получили название «классических». Это объясняется тем, что клиницисты-невропатологи разобрались в них гораздо раньше, чем удалось распутать филогенетически более древние пути, идущие от РФ. Помимо этих совершенно новых путей, неоспиноталамического (или классического лемнискового восходящего) сенсорного тракта и пирамидного (классического нисходящего) двигательного тракта, имеются также новые пути, надстроенные над старыми. Это параллельный экстралемнисковый восходящий сенсорный тракт, надстроенный на филогенетически более древнем лемнисковом тракте; оба пути объединяются на уровне среднего мозга, откуда они разветвляются, достигая различных областей коры и проходя через РФ ствола мозга; это и параллельный экстрапирамидный двигательный тракт, нисходящий к двигательным ядрам, проходя по пути через базальные ганглии и РФ ствола. Нужно добавить, что РФ ствола мозга осуществляет модифицирующие влияния — как восходящие (на полушария большого мозга и мозжечка), так и нисходящие (на сенсорные и двигательные ядра). Судя по имеющимся данным, по-видимому, существуют центробежные механизмы, регулирующие сенсорную деятельность организма; соответствующие волокна этого механизма проходят по классическому восходящему сенсорному тракту «против движения». Все упомянутые тракты на самом деле не изолированы, как может показаться из схемы, а взаимодействуют друг с другом. Параллельно с классической последовательностью восходящих нейронов можно заметить и



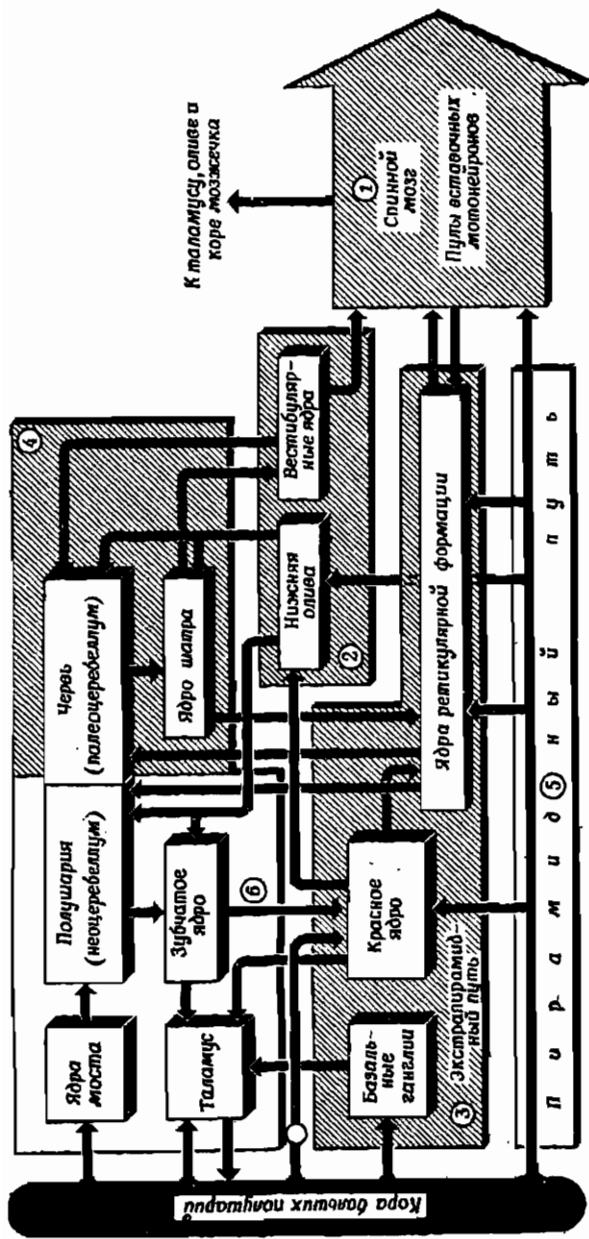


Рис. 85. Схема взаимосвязей между мозжечком и пирамидными и экстрапирамидными путями. Фидогенетически более «древняя» система (блоки 1—4, заштрихованы) дополняется у млекопитающих развитием пирамидного пути (5), таламуса, полушарий мозжечка и связывающих с ними структур (6).

нисходящую систему, связывающую в обратном направлении те же самые узлы промежуточной обработки информации.

В ином виде схема, изображенная на рис. 84, представлена на рис. 85, заимствованном (с некоторыми изменениями) у Брукхарта [34]. На нем схематически представлен мозжечок и его «окрестности» и показано, как развитие новой коры и нового таламуса сопровождалось развитием новых структур мозжечка. О пулах вставочных нейронов спинного мозга (1) уже упоминалось в разд. 5.1. В областях 1 и 2 сосредоточена система управления позой (иногда в этом участвует и зрительная система). Заложить же основы устойчивости позы необходимо, поскольку всякое более сложное целенаправленное поведение отправляется обычно от некоторой устойчивой позы. Экстрапирамидная система (3) является древней (в эволюционном смысле) и богатой перекрестными связями областью и может действовать как сама по себе, так и под управлением коры головного мозга. Возможно, что именно здесь хранятся (врожденные) программы таких двигательных актов, как бег, спаривание, бегство или нападение. Пирамидный путь (5) — система «молодая»; он появляется лишь у млекопитающих, тогда как у птиц сильно развиты другие системы, играющие у млекопитающих менее значительную роль.

Для того чтобы управлять позой (1 и 2) и движением (3 и 5), а также избегать ситуаций, когда пулам вставочных нейронов спинного мозга посылаются противоречивые распоряжения, необходимо какое-то подобие обратной связи между объектом управления и управляющим устройством. Червь мозжечка (палеocerebellum 4) получает сигналы из областей 1 и 2, а также от ядер ретикулярной формации и организует канал обратной связи, так сказать, «с черного хода», через *ядро шатра*. Относительно небольшая часть его выхода уходит через крышу мозжечка в центры управления позой, а также в ретикулярные ядра и пулы вставочных нейронов. Филогенетически более молодые отделы нервной системы используют, по-видимому, новые структуры старых аналогичных отделов для установления связей и организации обратной связи. Например, «новый» мозжечок (6), т. е. два полушария мозжечка, должны координировать ставшие теперь возможными более тонкие изменения позы. Среди входов в эти полушария есть пути от коры головного мозга (проходящие через ядра моста), образующие, по-видимому, часть пирамидного пути, а это наводит на мысль о том, что неocerebellum получает информацию о текущих двигательных командах. Однако многие из этих волокон приходят сюда из так называемых ассоциативных двигательных полей, а не только от первичной моторной коры. Выходы «нового» мозжечка проходят через зубчатые ядра. Отметим, что каждое из этих ядер получает такой же входной сигнал, как и соответ-

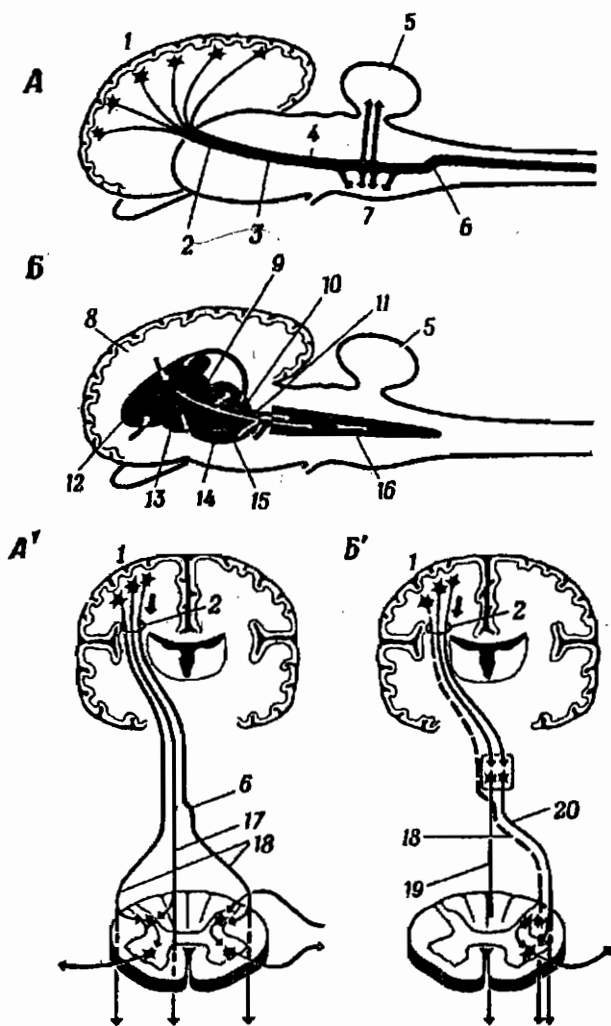


Рис. 86. Схема мозга «обобщенного» млекопитающего.

Показаны те же структуры, которые изображены на рис. 86, но пирамидный и экстрапирамидный пути искусственно разделены. Пирамидный путь — вид сбоку (А) и вид спереди (А'). Экстрапирамидный тракт — вид сбоку (Б) и вид спереди (Б').

1 — моторная зона коры; 2 — внутренняя капсула; 3 — ножка мозга; 4 — кортико-спинальный тракт; 5 — мозжечок; 6 — перекрест пирамидных путей; 7 — варолиев мост; 8 — кора больших полушарий; 9 — скорлупа; 10 — таламус; 11 — красное ядро; 12 — зубчатое ядро; 13 — бледное ядро; 14 — черная субстанция; 15 — гипоталамус; 16 — покрывка и ретикулярная формация; 17 — перекрест кортико-спинальный тракт; 18 — латеральный кортико-спинальный тракт; 19 — ретикуло-спинальный и вестибуло-спинальный тракт; 20 — ретикуло-спинальный тракт.

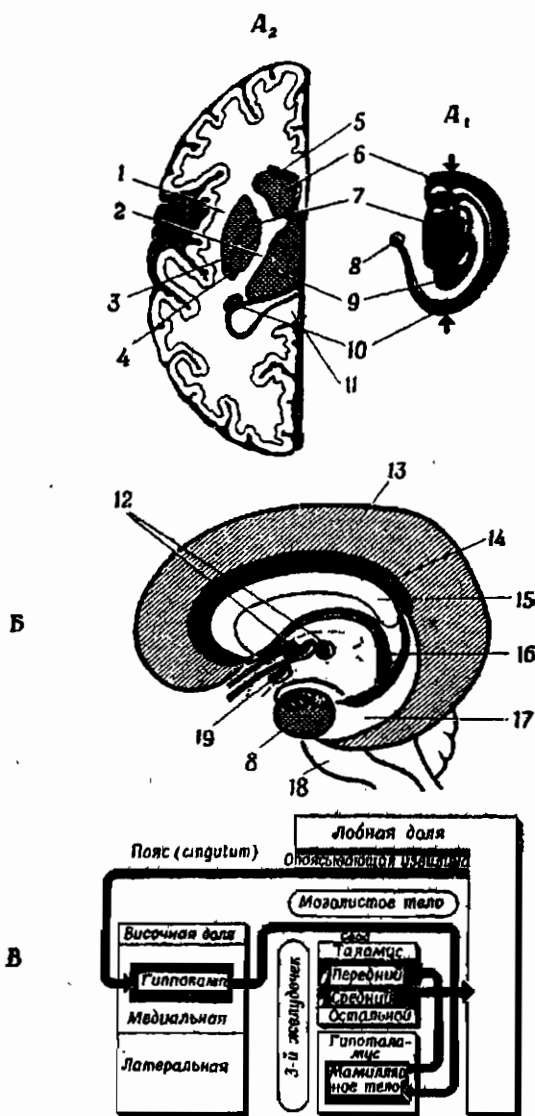


Рис. 87.

А. Левая половина мозга человека: А<sub>1</sub>—вид сбоку; А<sub>2</sub>—горизонтальный разрез на уровне, показанном на А<sub>1</sub> стрелками Б. Лимбическая система обезьяны. В. Схем. обобщающая взаимосвязи между структурами, более реалистично изображенными на А и Б.

1—наружная капсула; 2—внутренняя капсула; 3—скорлупа; 4—бледное ядро; 5—мозолистое тело; 6—головка хвостатого ядра; 7—чечевичное ядро; 8—миндалины; 9—таламус; 10—хвост хвостатого ядра; 11—валик мозолистого тела; 12—ядра таламуса; 13—новая кора; 14—поясная извилина; 15—мозолистое тело; 16—свод; 17—гиппокамп; 18—гипоталамус; 19—мамиллярные тела.

ствующая область коры головного мозга, и обеспечивает выход мозжечка в результате своих собственных расчетов, деталями которых управляет кора. Разница в функционировании областей 4 и 6 состоит в том, что палеocerebellum занимается информацией на уровне ретикулярных ядер и ниже, а неocerebellum получает более детализированную информацию из базальных ганглиев, гипоталамуса и красных ядер.

Рис. 86—88 дополняют эти схемы, показывая общее взаиморасположение всех упоминавшихся путей. На рис. 86, А представлена нервная система «обобщенного» млекопитающего; мы видим, как аксоны всех клеток сенсо-моторной зоны коры собираются вместе во внутренней капсуле, откуда начинаются волокна *кортико-спинального тракта*, идущие вниз и отдающие коллатерали в мозжечок при прохождении через варолиев мост. Затем (т. е. ниже) они попадают в перекрест пирамидных путей, где вся масса волокон переходит из одной половины тела в другую (рис. 86, А'). На рис. 86, Б и 86, Б' дана схема экстрапирамидной системы; можно видеть, что главную роль здесь играют подкорковые структуры переднего мозга, а именно *базальные ганглии*. География базальных ганглиев показана на рис. 87, на котором видно относительное расположение таламуса (блока предварительной переработки сенсорной информации на пути в кору), внутренней капсулы (каналов связи), базальных ганглиев (двигательных систем) и лимбической системы (центры голода, страха, ярости и полового удовлетворения) по мере движения наружу к новой коре. На рис. 87, А слева показан горизонтальный разрез одной половины мозга, а справа — соответствующий вид сбоку. Центральное положение здесь занимает таламус, по обе стороны которого расположены две подсистемы базальных ганглиев: чечевичные ядра и хвостатое ядро. Стрелками показана плоскость сечения, которая расположена достаточно высоко, так что мы не видим зубчика чечевичного ядра на головке хвостатого, но зато нам видна внутренняя капсула как участок белого вещества в форме буквы V, идущий между таламусом и чечевичным ядром и образованный аксонами различных сенсорных путей, а также волокнами различных моторных путей, нисходящими от моторной коры. Другие детали строения лимбической системы показаны на рис. 87, Б и В.

На рис. 88 изображена схема тактильных путей соматосенсорной и сенсо-моторной коры. Здесь мы еще раз убеждаемся в роли таламуса как «промежуточной станции» и видим, что пути, ведущие из таламуса в кору головного мозга, идут также через внутреннюю капсулу (рис. 88, Б). Соматические входные сигналы от головы попадают в таламус через ядро тройничного нерва, а от тела — непосредственно из спинного мозга через латеральный спино-таламический тракт. Наконец, сигналы от

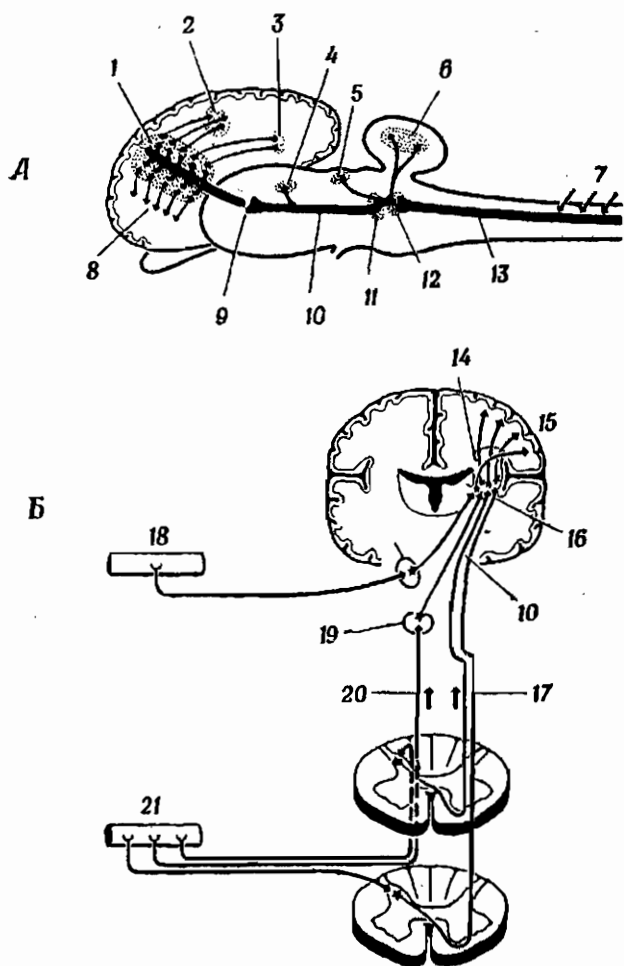


Рис. 88. Две схемы (А и Б) соматетических путей в кору, дополняющие схемы пирамидных и экстрапирамидных систем, показанных на рис. 86.

1—соматетическая область коры; 2—ассоциативные волокна теменной доли; 3—ассоциативные волокна височной доли; 4—Медвяное ядро таламуса; 5—верхнее двухолмье; 6—волокна к мозжечку; 7—спинномозговые ганглии; 8—волокна к моторной области; 9—вентролатеральное ядро таламуса; 10—медialная петля; 11—перекрест путей в продолговатом мозгу; 12—ядра тройничного и клиновидного нервов; 13—задний столб; 14—внутрикапсулярная ядра; 15—постцентральная извилина; 16—таламус; 17—передний спино-таламический тракт; 18—рецепторы головы; 19—ядра тройничного и клиновидного нервов; 20—задний столб; 21—рецепторы тела.

проприоцепторов, идущие по задним столбам, попадают в таламус через синапсы ядер нежного и клиновидного пучков. Рис. 88, А еще раз напоминает нам, что ствол мозга связан коллатеральными с мозжечком и верхним двухолмием и что в коре сигналы распространяются не только на соматосенсорные, но и на моторные поля и на различные «ассоциативные» области, расположенные в теменной и височной коре. Обратите внимание, что все сенсорные сигналы, за исключением обонятельных, попадают в кору через таламус, где они, по-видимому, подвергаются предварительной переработке, а моторная кора может «разговаривать» со спинным мозгом непосредственно. Однако кора все же посылает сигналы в таламус, и эти сигналы могут

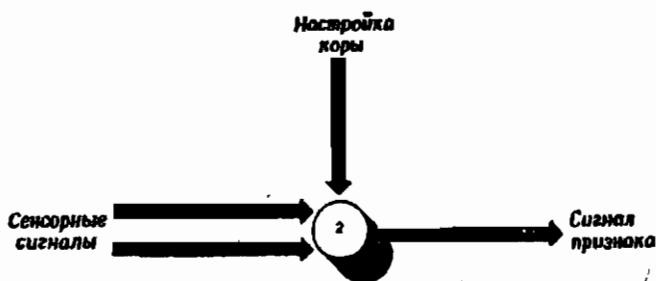


Рис. 89. Гипотетический нейрон, который в зависимости от сигнала настройки может служить как элементом И, так и элементом ИЛИ (ср. с рис. 1).

частично «настраивать» сенсорные пути, изменяя передаточные характеристики блоков предварительной переработки информации, расположенных в таламусе. Аналогичным образом существуют возвратные проекции и на двигательные ядра таламуса. На рис. 89 приведена чисто гипотетическая схема формального нейрона, функции которого могут изменяться сигналами настройки, приходящими из коры: вместо обнаружения совпадения нескольких сигналов он просто обнаруживает присутствие любого сигнала.

Заканчивая на этом наше краткое введение в географию мозга, мы хотим обратить внимание читателя на то, что при однодневной экскурсии по большому городу никогда нельзя успеть познакомиться со всеми его достопримечательностями, да и о том, что удалось увидеть, многое остается неизвестным. Однако, подобно тому как однодневная экскурсия поможет лучше оценить привлекательные черты города при последующих более длительных посещениях, так и наши два раздела, посвященные нейроанатомии, послужат отправной точкой для дальнейших путешествий по научной литературе.

## 5.3. ХОДЬБА

Лишь благодаря весьма совершенной «конструкции» нашей двигательной системы большинство из нас с самого раннего детства могут совершенно не заботиться о чисто физических компонентах ходьбы. Описываемый ниже «эксперимент» позволит нам получить некоторое представление о том, что же при этом происходит. (Если у вас нет возможности проделать этот «опыт» немедленно, постарайтесь провести его позже и сравните свои ощущения с тем, что здесь описано.)

*Пройдитесь сами и наблюдайте за ходьбой кого-нибудь другого*

- I — по ровному месту;
- II — по пересеченной местности;
  - а) с закрытыми глазами;
  - б) с открытыми глазами;
    - 1) в обычном состоянии;
    - 2) при головокружении;
    - 3) посидев с поджатыми под себя ногами достаточно долго, чтобы ноги онемели.

Попытайтесь описать перемещения центра тяжести тела и всех четырех конечностей в каждом из этих случаев. На основании этого попробуйте прийти к каким-то заключениям об относительной важности зрительной, соматической, кинестетической и вестибулярной информации. А как при этом воспринимаются расположенные поблизости предметы? Для того чтобы перепробовать все варианты, может потребоваться слишком много времени, но попытайтесь провести по крайней мере некоторые из них.

Это было первое задание по курсу, который я читал в Стэнфордском университете зимой 1969 г. Следующий абзац заимствован из ответов студентов.

«Я иду по ровному месту. Глазами ищу препятствия. Я чувствую (а точнее, ощущаю результаты) движение своих мышц, но не осознаю, что даю им команды двигаться. Я осознаю лишь свое желание идти. Я размахиваю руками примерно синхронно движению контралатеральной ноги. По-видимому, я слегка покачиваюсь из стороны в сторону, когда переношу вес тела с одной ноги на другую. И перемещаясь от одной точки опоры до другой, я ощущаю плавное движение, сопровождающееся автоматической работой мышц».

Усредненные ответы студентов сведены в табл. 1. Обратите внимание, что комбинацию «затекшие ноги» и «головокружение» было не только сложно создать, но в тех редких случаях, когда такое состояние удавалось вызвать, оно делало человека почти совершенно беспомощным.



Читатель, возможно, уже понял, что существует не только множество различных способов описывать ходьбу, но и много разных видов ходьбы. Для того чтобы упростить дело, примем, что существует некий основной набор рефлексов, которые можно вызывать и видоизменять в зависимости от конкретных условий. Наиболее важным из этих рефлексов является шагательный (рис. 90); он наблюдается даже у младенцев в первые месяцы их жизни. Этот рефлекс приводится в действие подсознательно всякий раз, когда проекция центра тяжести человека находится впереди границы опорного поля. А это позволяет нам рассматривать ходьбу по ровному месту как процесс перемещения центра тяжести тела вперед путем осуществления шагательного рефлекса одной ногой и повторения этого процесса



Рис. 90. Шагательный рефлекс.

Если девочку потянуть вперед так, что центр тяжести ее тела смещается и его проекция оказывается впереди ног (Б), то для восстановления равновесия она сделает шаг вперед, после чего проекция силы тяжести окажется между ступнями (В).

в зеркальном отображении. Такое описание ходьбы не должно означать, что мы недооцениваем сложность этого процесса; основная его идея состоит в том, что, хотя *связанная с ходьбой мышечная активность весьма сложна*, соответствующие расчеты, производимые на высшем уровне, вовсе не обязательно должны быть тоже сложными.

Нормальная ходьба представляет собой последовательность неустойчивых состояний, хотя в динамическом смысле эта система вполне устойчива. Попытаемся разобраться в этом с точки зрения теории управления (разд. 3.3). Будем рассматривать опорно-двигательный аппарат как объект управления, а работу мышц, нервных клеток и рефлексов — как управляющее устройство. Всякий, кто когда-либо испытал сильное головокружение, знает, что при этом тело без посторонней помощи может в лучшем случае находиться в состоянии неустойчивого равновесия, т. е. без известных мышечных усилий человек просто упадет. Таким образом, управляющее устройство должно либо компенсировать отклонение от состояния равновесия (например, путем стабилизации позы, если мы хотим стоять на месте), либо

ТАБЛИЦА 1  
ПО ПЕРЕСЕЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ

ПО РОВНОМУ МЕСТУ	ПО ПЕРЕСЕЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ		В НОРМАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ
<p>Нормальная походка. Не требует осознанных усилий. Руки размахиваются ритмически. Идти приятно</p>	<p>Поддержание равновесия не вызывает затруднений. Походка нормальная, если не считать того, что идти во прямой не удается</p>	<p>Осторожная ходьба. Чрезмерная забота о поддержании равновесия</p>	<p>Место для следующего шага выбирается зрительно. Возможна осторожная ходьба</p>
<p>Движения порывистые, но не доставляют особых затруднений. Информацию о положении ног с помощью зрения и, возможно, рук</p>	<p>Смещение центра тяжести вниз (сгибание коленей и т. п.). Походка виляющая. Наблюдается перерегулирование. Ощущение напряженности</p>	<p>Очень медленное передвижение</p>	<p>Осторожная ходьба затруднена, так как нет достаточной информации об опорных поверхностях</p>
<p>Спотыкающаяся походка. Трудно поддерживать равновесие. Движение с отклонением в одну сторону. Ощущение колебаний почвы</p>	<p>Непрерывная коррекция замеченной потери равновесия. Невозможность идти прямо вперед. Потеря ориентации</p>	<p>Движение практически невозможно и даже не выглядит целенаправленным. Колени подогнуты, руки разведены и хватаются за воздух</p>	<p>Ощущение невозможности поставить перекосную ногу туда, куда хоти. Значительные усилия на поддержание равновесия. Кажется, что земля сильно колеблется</p>

С ОТКРЫТЫМИ ГЛАЗАМИ

С ЗАКРЫТЫМИ ГЛАЗАМИ

С ОТКРЫТЫМИ ГЛАЗАМИ

использовать отклонение от равновесия для того, чтобы заставить тело перейти в новое состояние равновесия, совершив при этом необходимый перенос (например, создавая движение путем плавной последовательности изменений позы).

Этого, по-видимому, достаточно для краткого описания «нормальной» ходьбы на ровном месте при ярком дневном свете. Имеются и другие типы ходьбы, и среди них «осторожная ходьба», к которой прибегают, если надо идти в темноте по загромажденному препятствиями месту. Такая ходьба представляет собой как бы последовательность статистически сбалансированных положений. При этом даже тогда, когда переносная нога приподнята и вынесена вперед, центр тяжести не переносится и остается над опорной ногой. Это позволяет идущему не переносить вес тела на переносную ногу до тех пор, пока он не «проверит» опорную поверхность под ней, поворачивая стопу в голеностопном суставе и производя давление на пятку. Если опора кажется надежной, вес тела переносится на «ощупывающую» дорогу ногу, и описанный процесс повторяется, но только для другой ноги.

Здесь полезно отметить, что если при нормальной ходьбе мы широко и уверенно пользуемся имеющейся у нас моделью непосредственно окружающего нас мира и с ее помощью можем организовать управление упреждающего типа (т. е. мы надежно предсказываем, где найдет опору наша нога, не занимаясь в явном виде проверкой правильности этого прогноза), то при «осторожной» ходьбе каждый шаг зависит от полученной по каналам обратной связи информации о том, куда же на самом деле ступила нога. Читатель оценит реальность такого различия, вспомнив все неприятности, которые приходится испытать, когда положенный в основу «упреждающего управления» прогноз оказывается неверным (например, когда мы ошибаемся в числе ступенек на лестнице). В средние века этот психологический эффект учитывался при постройке замков: последняя верхняя ступенька лестницы отличалась от остальных по высоте; это увеличивало шансы на то, что ворвавшийся в замок рыцарь оступится и беспомощно растянется на лестнице во всех своих доспехах!

Если попробовать формализовать все эти соображения, построив соответствующую блок-схему, мы сразу почувствуем всю скудность этих нескольких прямоугольников, соединенных между собой линиями. Даже самые закоренелые сторонники использования теории управления не могут не почувствовать некоторую неловкость при виде блока с надписью «Зрение», из которого выходит всего одна линия; именно эту неловкость мы постараемся смягчить в следующем разделе. В том, что человек идет по прямой, видимо, играет роль вестибулярный аппарат

и зрение. Зрительный вход позволяет управлять нашими движениями с гораздо большей точностью, но при головокружении даже зрение не может помочь нам держаться прямо. На рис. 91 мы попытались отразить логику нашего поведения при ходьбе

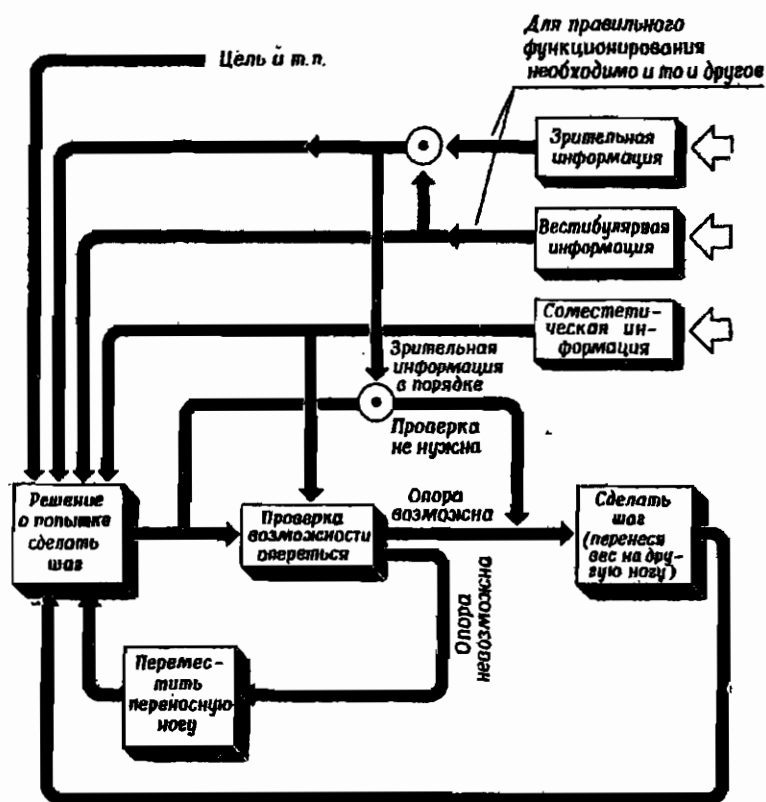


Рис. 91. Логическая схема «осторожной» ходьбы.

Мы уверенно шагнем вперед или осторожно пробираемся к цели в зависимости от того можем ли мы на основе зрительной информации быть уверены в том, что переносная нога найдет надежную опорную поверхность.

на ощупь. Читателю может быть интересно сравнить эту схему с построением системы управления из блоков ПВПВ (разд. 4.2).

Можно также попытаться представить себе, что человек пользуется какой-то внутренней моделью окружающего мира, позволяющей ему (в течение некоторого времени после того, как он закроет глаза) уверенно обходить препятствия. Наконец, создается впечатление, что объем необходимых вычислений и объем и роль осознанных действий значительно возрастают

по мере того, как мы «выводим из строя» различные блоки нашей системы. И если бы нам удалось придать этим впечатлениям количественный характер, мы смогли бы лучше разобраться в функциях различных рецептивных систем.

Несмотря на то что выше мы рассматривали лишь ходьбу, человек может передвигаться и другими аллюрами. Для того чтобы понять, как мало осознанного управления требуется для реализации весьма сложных движений, я рекомендую читателю попробовать пройтись «галопом» или «прыжками». Начать двигаться этими аллюрами немного затруднительно, но вскоре они кажутся совершенно естественными. Внутренняя организация нашей системы управления движениями рассчитана также и на передвижение «на всех четырех»; в этом нетрудно убедиться, попробовав ползать с разной скоростью, причем оказывается, что при разной скорости движения фазовый сдвиг между движениями рук и ног изменяется.

Приведенные выше соображения, естественно, не претендуют на то, чтобы рассматривать их как строгий анализ процессов передвижения на двух ногах (см., например, гл. III монографии Бернштейна [24]). Мы лишь хотели помочь читателю представить рассуждения о контурах обратной связи и иерархической структуре управления движением в правильном свете, четко объяснив, что человек не может сознательно управлять каждым мышечным волокном через импульсацию определенной структуры и что если какой-то из каналов обратной связи выходит из строя, его можно заменить другим (если нет возможности ощупать субстрат ног, можно посмотреть на него; если нельзя увидеть, можно слушать отражение звука (эхо) от больших объектов и т. п.). Наконец, управление высокого уровня, по-видимому, освобождено от прочих забот для того, чтобы иметь возможность решать широкие стратегические вопросы или руководить тонкими деталями действий, а плавность и согласованность нашей двигательной активности обеспечивают системы промежуточного уровня. Сопоставление этих общих соображений с анатомическими деталями, с которыми познакомились в разд. 5.2, остается открытой проблемой, привлекающей к себе в последнее время все больше внимания.

#### 5.4. ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

В предыдущих разделах этой главы мы выяснили, что системы связи спинного мозга играют центральную роль в формировании движений конечностей, и познакомились с проблемами координации этих движений, компенсации нерегулярностей внешних условий и обеспечения коррекций позы, позволяющих

животному сохранять равновесие при сложной двигательной активности. Однако в этом разделе, вместо того чтобы сконцентрировать внимание на детальном разборе реальных схем, мы хотим показать, что для ряда задач стратегическое планирование на достаточно высоком уровне не должно задавать детали выполнения этого плана на мышечном уровне.

Если мы хотим написать какое-то слово один раз карандашом на клочке бумаги, а другой раз — на стене длинной малярной кистью, которую приходится держать двумя руками, то очевидно, что в каждом случае используются совершенно разные группы мышц. Так чем же объяснить, что в обоих случаях проявляются характерные особенности нашего почерка, даже если кистью мы пишем впервые в жизни? Здесь, пожалуй, полезно вспомнить об интерпретирующих системах для вычислительных машин (разд. 3.2). Найдя целесообразным составлять программы не на машинном языке, т. е. не в терминах реальных операций, выполняемых схемами вычислительной машины, а на некотором языке более высокого уровня, мы можем снабдить машину управляющей программой, называемой *интерпретирующей системой* и позволяющей переводить каждую команду программы высокого уровня на язык машинных программ и выполнять их. Имея это в виду, мы воспользуемся нашей метафорой «человек — это машина» и представим себе, что, обучаясь в детстве письму, мы научились не только производить ряд нужных движений, чтобы водить карандашом, зажатым в руке, но и сформировали себе представление о механизме письма на языке более высокого уровня — в терминах пространственно-временной последовательности штрихов. Продолжая эту мысль (а читатель должен иметь в виду, что все эти соображения носят чисто гипотетический характер), мы можем предположить, что в мозгу накапливаются программы высокого уровня в терминах последовательностей, направленных в разные стороны движений и относительных положений, не уточняющие ни абсолютного положения, в котором должно осуществляться это движение, ни тех частей тела, которые его реализуют. Одновременно можно выдвинуть гипотезу, что в процессе обучения формируется внутри нас и интерпретирующая система для подобных программ высокого уровня, а точнее — по одной интерпретирующей системе на каждую из систем управления нашего тела. Поэтому при наличии той или иной программы высокого уровня любая такая система может осуществлять весьма сложные движения, хотя она никогда прежде их не выполняла. Это объяснение, по-видимому, достаточно хорошо подходит для нашего примера с надписью на стене. Конечно, многие вопросы остаются при этом открытыми; какие именно механизмы в мозгу вырабатывают программу высокого уровня из навыка,

приобретенного только одной системой, и строят интерпретирующие системы для разных систем? В какой мере оправданно вводить столь четкое разграничение между языком высокого уровня, интерпретирующей системой и машинным языком самих факторных систем?

Во всяком случае, предыдущие рассуждения позволяют рассматривать сложную двигательную активность как результат «срастания» в единое целое нескольких субструктур, каждая из которых имеет дело лишь с ограниченным числом аспектов общей проблемы. В связи с этим одной из важных задач теории мозга становится вычленение таких автономных субструктур моторного поведения и анализ способов их сочетания, приводя-

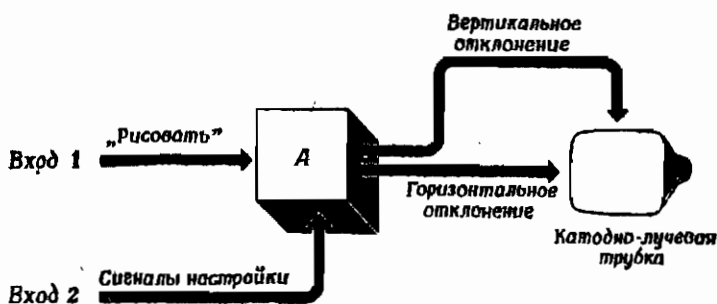


Рис. 92. Зрительный дисплей Дертоузоса.  
Объяснения в тексте.

щего к координированным действиям. Этой проблемой достаточно глубоко занимался Грини [86—89]. Чтобы в полной мере представить себе суть этой проблемы синтеза, мы можем, следуя Грини [88], рассмотреть зрительный дисплей, сконструированный Дертоузосом [56, 57]: этот дисплей дает возможность генерировать картинку, управляя лучом катодно-лучевой трубки. Очевидно, самый общий подход состоит в том, чтобы описывать картинку на экране, задавая яркость экрана в каждой его точке. Таким образом можно построить любое изображение. Однако в большинстве «интересных» случаев более эффективным оказывается другой подход, основанный на конструировании необходимого изображения из стандартных кривых, каждая из которых зависит к тому же от нескольких параметров. С некоторым подобием такого «синтетического» подхода мы уже познакомились в разд. 4.1, говоря о «кассетной» метафоре для оперативной памяти.

Дисплей Дертоузоса основан на втором подходе (рис. 92). Если сигнал на входе 2 равен нулю, то при сигнале «Рисовать» на входе 1 на экране дисплея луч вычерчивает диагональ. Регу-

лируя значения четырех параметров с помощью входа 2, мы получаем возможность в ответ на сигнал «Рисовать» на входе 1 вычертить на экране «практически любую» гладкую кривую (это напоминает универсальность лекала для чертежника). Следующий шаг состоит в том, чтобы создать подсистему, генерирующий необходимые сигналы настройки для параметризованного семейства примерно десяти стандартных кривых. Входами такого регулятора более высокого уровня будут названия соответствующих кривых, их ориентация, время появления на экране, начальная точка, размер и т. п. Подобным способом мы можем построить иерархическую систему на высшем уровне,

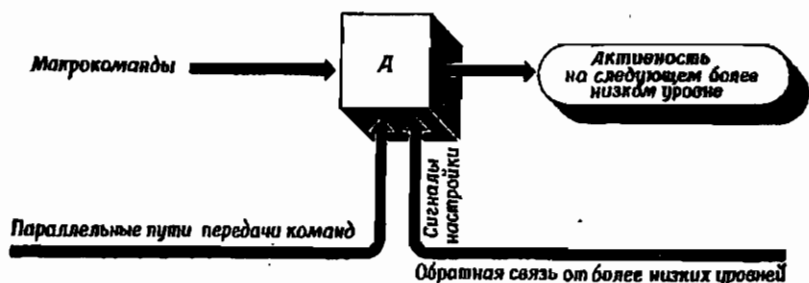


Рис. 93. Обобщение схемы, изображенной на рис. 92.

Тонкая настройка движения, вызванного макрокомандами, достигается при помощи как сигналов обратной связи от низших уровней моторной системы животного, так и параллельных каналов.

которой не придется заниматься нудной и кропотливой работой по вычислению сигналов, подаваемых на отклоняющую систему, для каждого момента времени.

При таком подходе мы не отказываемся ни от одной идеи обычной теории управления. В локальных регуляторах мы должны пользоваться обратной, а возможно, и упреждающей (т. е. использующей модель для предсказания того, что должно случиться; ср. разд. 3.4) связями. И хотя точный размер выигрыша нельзя оценить количественно, пока мы не разберемся лучше в теории сложности вычислений, цель наша состоит в том, чтобы сократить объем вычислений на высшем уровне за счет загрузки более локальных, менее универсальных, менее автономных и более простых регуляторов.

Возвращаясь к вопросу о двигательной системе животных, модифицируем рис. 92 в виде рис. 93. Здесь на любом иерархическом уровне предпринимаемые действия запускаются соответствующей макрокомандой и настраиваются в основном сигналами о местных условиях, но, возможно, также еще и сигналами с ближайшего верхнего уровня. От макрокоманды



требуется только, чтобы она давала действию «правильное направление», т. е. обеспечивала приближенную траекторию движения, которую можно было бы скорректировать, не выходя за пределы возможностей сигналов настройки. Хорошим примером такого положения вещей может служить понятие эталонной позы, относительно которой выполняются соответствующие движения. Контур обратной связи с помощью спинальных рефлексов может помешать животному упасть, несмотря на изменение условий опоры. Поэтому команды о начале движения не должны нести информации о том, что произойдет с центром тяжести после того, как будет поднята одна из ног. Сигналы «настройки» позы вызовут (если это будет необходимо) такое смещение центра тяжести, которое обеспечит сохранение устойчивости. Уточнение (необходимое, например, для управления движениями пальцев при игре на рояле) такой стабилизированной с помощью обратной связи макротраектории может осуществляться по нескольким параллельным каналам. (Конечно, в этом случае макрокоманды должны обеспечивать траекторию, близкую к устойчивой. Например, если команды высшего уровня заставляют животное перенести три ноги за край пропасти, трудно ожидать, что сигналы настройки помогут восстановить устойчивую стабильную ситуацию.)

Полезно отметить, что многие типы поведения, которые достаточно трудно моделировать на вычислительной машине, могут оказаться простейшими действиями нервной системы и тела. Наличие силы тяжести дает нам возможность опустить руку вниз, не производя никаких расчетов. Кроме того, на требования, предъявляемые к расчетам в нейронных сетях, оказывает влияние зависимость между формой конечностей и их функциями. Анатомы и особенно эволюционисты много работают над тем, чтобы выяснить корреляции между изменениями структуры скелета и изменениями функций организма. Очевидно, что есть много разных способов сборки суставов, в результате которой получится система, способная осуществлять определенные действия, но для некоторых из таких структур управлять этими действиями будет очень просто, а для других — весьма сложно. В теории автоматов доказаны теоремы о том, как изменение кодирования входных сигналов может привести к резкому изменению времени, необходимого автомату на вычисления. Для каждой функции существует, по-видимому, оптимальный способ кодирования информации, при котором система вычисляет эту функцию быстрее всего (ср. с нашими рассуждениями о предварительной обработке зрительных образов в разд. 2.4). Аналогично структурные свойства мускулатуры и скелета в значительной степени предопределяют объем вычислений, необходимых для того, чтобы гарантировать плавную работу суставов

и простоту взаимодействия организма с окружающим его внешним миром. В связи с этим особое значение для нас может приобрести такой «старомодный» раздел механики, как кинематика и теория машин и механизмов: добавляя кинематические соображения к информационным, мы можем научиться строить из брусков и стержней, соединяемых шарнирами, такие структуры, которые могли бы вычерчивать желаемую траекторию, воспроизводящую без чрезмерно сложных расчетов последовательные фазы предписанного движения. Таким образом, хотя наше внимание практически целиком сосредоточено на распараллеливании процессов переработки информации по всей активной сети, с тем чтобы обеспечить управление действием, комбинируя текущие входные сигналы с прошлым опытом, необходимо отдавать себе отчет и в том, что решаемые вычислительные задачи зависят не только от характера предварительной переработки входных сигналов, но и от структуры тех исполнительных «механизмов» на выходе, которые реализуют соответствующее действие на практике.

Завершим наши теоретические рассуждения кратким перечнем преимуществ и недостатков иерархической организации системы управления, в которой наибольшая эффективность высших уровней достигается за счет снижения сложности производимых на этих уровнях вычислений (ср. с разд. 4.1, где рассматривались преимущества и недостатки внутренних моделей). К преимуществам следует отнести: 1) увеличение времени на решение творческих задач (планирование), связанных с появлением новых ситуаций; 2) экономичность использования имеющегося объема памяти, связанную с отсутствием необходимости запоминать все мелкие детали; 3) увеличение скорости и простоты обучения эффективному поведению в новых (или аналогичных) ситуациях (если только они не слишком непривычны). Наличие локальных систем управления позволяет очень быстро организовать несложные специфические действия, вроде отдергивания руки от горячей печки. Еще одно преимущество заключается в том, что по сравнению со структурой с единственным уровнем управления в иерархической структуре переток информации гораздо меньше.

Но у иерархической системы есть и свои недостатки. Так, если бы нас интересовала лишь эффективность чисто моторной части движения (без учета вычислительной работы в высших центрах), то можно было бы найти лучшую структуру и лучшую последовательность возбуждения мышц при условии, что наши расчеты учитывали бы все подробности ситуации. И как уже можно было понять из примера с попыткой одновременно хлопнуть себя по голове и гладить по животу, иерархическая структура системы управления коренным образом сужает

репертуар возможных поведений животного. Это означает, что некоторые необычные изменения внешней обстановки могут поставить животное в условия, с которыми оно не справится. Более того, обучаться «необычным» задачам (например, новым «па» современных танцев) оказывается весьма сложно. Однако совершенно ясно, что как для животного, так и для робота большинство встречающихся задач допускает декомпозицию на знаковые подзадачи, а эта постепенная (уровень за уровнем) отработка поведения обычно гораздо более эффективна, чем любая попытка заменить команды высшего уровня некоторой последовательностью команд на машинном языке.

Занимаясь исследованиями эволюции нейронных систем, мы испытываем сильное искушение предположить, что на рис. 92 изображена система, способная извлечь все преимущества из иерархической организации управления, при которой различные контуры управления с обратной связью в спинном мозгу и выше обеспечивают тонкое управление позой, а схема на рис. 93 показывает, как устроен дополнительный механизм, позволяющий преодолеть один из недостатков иерархических систем, отмеченный выше, и открывающий возможность «прямого вмешательства сверху» как дополнительный источник тонкой подстройки, основанный на использовании опыта и результатов обучения.

Опыт, позволяющий выявить это различие и связать его с материалом о системах с обратной связью в спинном мозгу (разд. 5.1), был поставлен Навасом и Старком [180]. Однако, не вдаваясь в детали этого опыта, расскажем, что можно обнаружить, если исследовать ситуацию, изображенную на рис. 94. Возвращаясь к рис. 80, следовало бы ожидать, что в момент падения груза в протянутую руку мышечные веретена растянутся и это приведет к усилению возбуждения  $\alpha$ -мотонейронов, в результате чего угол в локтевом суставе практически вернется к прежнему значению. На самом же деле время реакции оказывается дольше, чем нужно для сгибательного рефлекса, и по крайней мере на первой фазе компенсаторного движения мышечные веретена в нем, по-видимому, не участвуют. Создается впечатление, что мы имеем дело с примером прекрасно отработанного двигательного акта: осознав наличие значительного возмущения, мы используем баллистическое движение, направленное на его компенсацию, а мышечные веретена включаются лишь в самом конце для тонкой регулировки конечного участка траектории и для восстановления системы тонкой компенсации незначительных возмущений.

Завершим этот раздел некоторыми данными о специфичности нейронных связей (прекрасный обзор по этому вопросу принадлежит Джекобсону [127]), которые должны еще раз напомнить нам, что «подстройка» двигательного поведения дей-

ствительно состоит из двух составляющих: 1) «локальной подстройки», осуществляемой с помощью контуров, проходящих по спинному мозгу и стволу мозга, и 2) «изменения стратегии» и «добавления мелких деталей», для реализации которых требуется, по-видимому, образование новых разделов мозга, подобно новой коре млекопитающих. Эксперименты по нервной специфичности показывают, что, хотя в «высших центрах» мозга

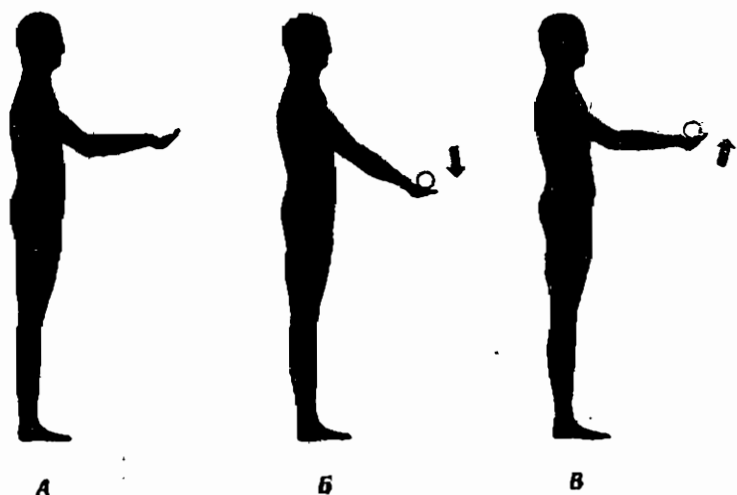


Рис. 94. Как нервная система могла бы реагировать на неожиданное изменение нагрузки.

Рука находится в требуемом положении (А), затем под действием груза она опускается вниз (Б), после чего вычисляется сигнал баллистического управления, вызывающий обратное движение руки к требуемому положению, причем окончательная его «доводка» (В) обеспечивается следящей системой.

и возможно обучение, «низшие центры» ствола и спинного мозга имеют генетически predeterminedную структуру, обеспечивающую основу для нормальной функции; если в процессе регенерации поврежденных нервов эта структура нарушается, то восстановление ее нормальной функции возможно лишь при условии образования другой, пусть измененной, но «удачной» структуры, функция которой может компенсироваться под влиянием высших центров и при условии существования соответствующих высших центров.

Для того чтобы оценить опыты Вейсса [252], показывающие, что нервные связи не есть результат обучения — и что они могут не измениться, даже если становятся неадаптивными, — полезно вернуться к рис. 37, где изображена весьма упрощенная схема управления ногой с четырьмя мышцами (рис. 36); возбуждение

единственного оп-нейрона «высшими центрами» запускает ритмическое движение, которое мы назовем «двигательным отсчетом (\*)». Для наших нынешних целей нам требуется отметить одну важнейшую особенность *любой* схемы, способной воспроизвести «двигательный отсчет (\*)»: если мотонейрон Ad подключить к мышце Ab, а мотонейрон Ab — к мышце Ad, то активация схемы вызовет «двигательный отсчет» в *обратном* направлении.

Рассмотрим ситуацию, изображенную на рис. 95, где передние ноги тритона поменяли местами, так что они обращены назад. Тритон обладает достаточной способностью к регенерации, поэтому пересаженные конечности приживляются и в них

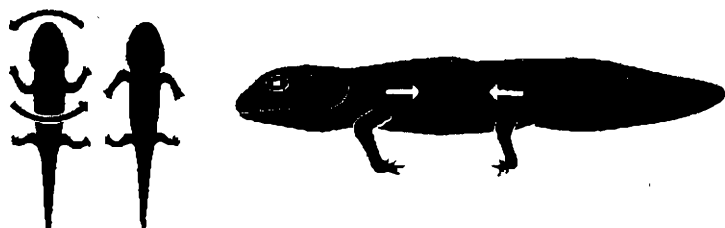


Рис. 95. Неприятные последствия пересадки правой передней конечности на место левой и наоборот для движения тритона.

прорастают спинномозговые нервы. Можно было бы ожидать, что возникающие при этом взаимосвязи между нервами и мышцами окажутся совершенно случайными и животное либо вовсе не сможет управлять своими передними конечностями, либо после соответствующей «сортировки связей» научится в конце концов пользоваться ими, хотя и несколько неуклюже из-за их необычного расположения. Однако на практике получается обратное: животное начинает выполнять передними конечностями движения, которые совершенно не соответствуют их новому расположению, отвращая его от пищи и, напротив, подталкивая по направлению к неприятным стимулам. Вейс [252] по этому поводу писал: «Подлинное движение в обратную сторону происходит только тогда, когда другие органы передвижения, например хвост и задние конечности, парализованы или удалены. При наличии задних конечностей суммарный эффект сводится к непрерывному противоборству между передними и задними конечностями, причем первые толкают тело назад, а вторые — вперед с одинаковой силой. В результате животное раскачивается взад и вперед, не будучи в состоянии сдвинуться с места. Животные были совершенно беспомощны, и хотя некоторые из них жили более года, т. е. в течение еще довольно

долгого времени после метаморфозы, их поведение ничуть не изменялось».

Учитывая наши рассуждения о нейронных схемах, реализующих «двигательный отсчет (\*)», эти результаты позволяют предположить, что в опыте Вейсса отводящая мышца оказалась соединенной с мотонейронным пулом приводящей мышцы и наоборот, хотя изменение роли этих мышц после того, как правую и левую конечности поменяли местами, требовало переключения нервных связей. (Такой анализ может показаться слишком прямолинейным, но пока нам этого вполне достаточно.)

Возможно, что читатель давно уже задает себе недоуменный вопрос: «Но разве тритон не мог заметить, что он движется не в ту сторону, и принять необходимые меры?» Поскольку эксперимент отвечает на этот вопрос отрицательно, полезно попытаться найти источник высказанного недоверия. В самом деле, если воспользоваться простейшим примером и предположить, что человек едет на машине, у которой обычное положение передачи соответствует заднему ходу и наоборот, то, вероятнее всего, ему в конце концов надоеет удаляться от цели и он обучится переключать передачу по-новому. При этом он не только поймет, что всякий раз, когда хочется двигаться вперед, нужно переключить передачу на обратную, но и должен будет: 1) осознать, что прямая и обратная передачи соответствуют строго противоположным направлениям движения; 2) догадаться, что прямой передаче соответствует движение назад; 3) выдвинуть и проверить гипотезу о том, что для движения вперед нужно включить обратную передачу, и, наконец, после того как эта гипотеза подтвердится, 4) запомнить это и 5) суметь использовать вытекающие выводы. И даже принимая во внимание, что задачи 1 и 3 можно отбросить, поскольку на использование обратной передачи можно натолкнуться случайно в процессе проб и ошибок (что, впрочем, требует, чтобы время от времени мы отходили от установленных процедур), все же остается совершенно ясным, что действие, казавшееся простым проявлением здравого смысла, на самом деле предполагает последовательное решение ряда задач, а у нас нет никаких априорных оснований предполагать, что мозг любого животного пригоден для их решения.

В качестве последней и весьма яркой иллюстрации необоснованности подобных ожиданий предположим, что в вычислительной машине перепутались коды команд сложения и вычитания. И даже если мы станем бить по машине ногой всякий раз, как она ошибается, это не поможет ей переписать программу. Нам придется признать, что для того, чтобы такие воздействия приводили к цели, необходимо снабдить машину специальными датчиками и предусмотреть, чтобы наше негодование

учитывалось во время вычислений, но — что еще более важно — нам придется ввести в машину весьма сложную управляющую программу (и надеяться, что перестановка кодов не вывела ее из строя), которая в ответ на удар ногой начнет испытывать различные способы коррекции программ нижнего уровня до тех пор, пока удары не прекратятся.

Опыты Вейсса показывают, что у тритона просто нет такого механизма высокого уровня. Его эволюция происходила в среде, где нет биолога-экспериментатора, и поэтому для того, чтобы выжить, он не нуждается в способности к столь сложным процессам адаптации. Тритон — животное с раз и навсегда «запаянной» программой: поставьте перед ним пищу, и его мозг «скомандует» спинному мозгу «вперед», но если такая команда вызывает движение в обратном направлении, приспособиться к этому он уже не может. Подобные наблюдения заставляют скорректировать наивные представления о поведении как реакции на стимулы (тесно связанные, между прочим, с теорией случайных соединений нейронов), согласно которой любое поведение формируется в результате обучения тому, что на часто повторяющийся стимул нужно отвечать определенной реакцией. Необходимо ясно отдавать себе отчет в том, что многое в нашем поведении «запаяно» (а соотношение между тем, что «запаяно», и тем, что является результатом обучения, зависит от «уровня» животного), а также в том, что плюс к обучению реакциям на стандартные стимулы обучение на других уровнях организовано гораздо сложнее; поэтому, когда человек пишет эссе, его генетическое наследие дает ему лишь субстрат, рефлексы помогают водить ручкой по бумаге или стучать пальцами по клавишам пишущей машинки, а собственно содержание его произведения возникает лишь на самых верхних уровнях организации его мыслительных процессов.

#### 5.5. РАСПРЕДЕЛЕННОЕ (DISTRIBUTED) ДВИГАТЕЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Для того чтобы продвинуть наше понимание того, как теория мозга подходит к проблеме управления движениями, рассмотрим теперь вопрос о том, как распределить по целой пространственно распределенной системе нейронов функции следящей схемы Питтса и Мак-Каллока (воспроизведенной еще раз на рис. 96), которая для каждого  $\phi$  генерирует преобразование  $T_\phi$ , приводящее  $\phi$  к стандартному виду.

Как мы показали в разд. 3.3, генератор преобразований не требует памяти: входной образ  $\phi$  и преобразование  $T$  на его входах непосредственно пересчитываются в преобразованный образ  $T_\phi$ . Не требует памяти и блок вычисления ошибки: в ответ

на образ на входе блока на выходе сразу выдается значение ошибки. Генератор же преобразований представляет собой последовательный автомат: если в момент времени  $t$  его состоянию соответствовало преобразование  $T$ , а на его вход поступил вектор ошибки  $e$ , то его новому состоянию в момент времени  $t + 1$ , а также его выходу будет соответствовать преобразование  $W(E) \cdot T$ .

Самое трудное в такой схеме состоит в том, чтобы подобрать подходящую меру ошибки  $E$  и соответствующее преобразование

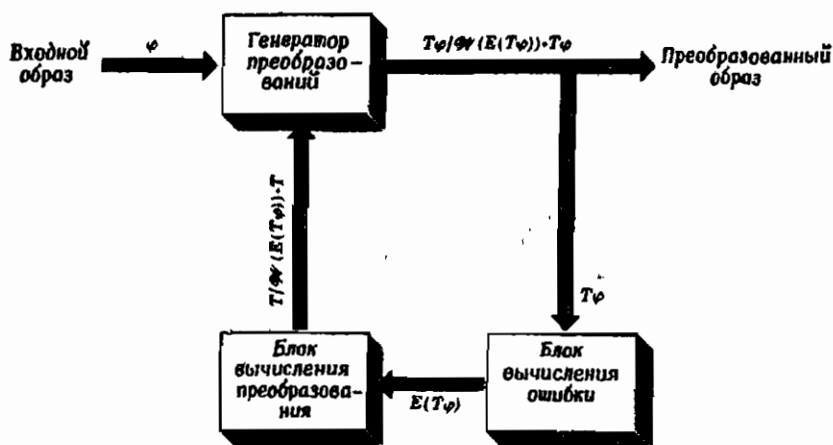


Рис. 96. Обобщенная схема Питтса — Мак-Каллока для преобразования образа к стандартному виду.

$W$ , гарантирующее, что с помощью обратной связи по этой ошибке нам всегда удастся в конце концов привести вход к стандартному виду. Любая теория эволюции и обучения должна рано или поздно столкнуться с задачей формирования таких  $E$  и  $W$ , которые наилучшим образом отвечают целевой среде системы (мы уже вкратце говорили об этом в разд. 4.2, критикуя ОРЗ).

Для того чтобы связать все это с теорией соматотопически организованных сетей, познакомимся с тем, как Питтс и Мак-Каллок применили свою общую схему к анализу рефлекторной дуги, обеспечивающей такое движение глаз, при котором точка фиксации попадает на центр тяжести распределения яркости зрительного входа. Как известно, эта рефлекторная дуга идет от глаза через верхнее двухолмие к ядрам глазодвигательного нерва, а оттуда в соответствующие мышцы. (Заметим, что на нашем нынешнем уровне знаний относительно системы предварительной переработки зрительной информации в сетчатке мы



имеем право заменить слово «яркость» в описании рефлекса словами «общая контурная информация» или «признак».)

Аптер [3, 4] показала, что каждая половина поля зрения кошки (соответствующая назальной половине одного и височной половине другого глаза) топографически проецируется на контралатеральное верхнее двухолмие. Кроме такой «сенсорной» проекции, Аптер изучала и «двигательную», для чего подвергала обработке стрихнином отдельные точки на поверхности двухолмия и давала на сетчатку вспышки света, наблюдая, какую точку зрительного поля фиксировал изменившийся в результате этого взгляд. При этом выяснилось, что «двигательные» и «сенсорные» проекции практически идентичны (см. врезку на рис. 97).

Воспользовавшись этими данными, Питтс и Мак-Каллок построили схему, показанную на рис. 97 и контролирующую направление взгляда. Они обратили внимание на то, что возбуждение некоторой точки левого бугорка соответствует возбуждению, приходящему из правой половины поля зрения, и, следовательно, должно вызывать движение глаза вправо. А в центр взгляд будет направлен тогда, когда возбуждение, приходящее слева, точно уравнивается возбуждением справа. Поэтому Питтс и Мак-Каллок построили свою модель так, что, например, на каждый мотонейрон, управляющий мышечными волокнами левой внутренней и правой наружной прямых мышц, сокращение которых вызывает движение соответственно левого и правого глазного яблока вправо, поступает суммарное возбуждение клеток, расположенных в тонкой поперечной полоске в составе левого бугорка. Это обеспечивает необходимое возбуждение правой наружной и левой внутренней прямых мышц, а соответствующие мышцы поворачивают глаза вправо. Реципрокное торможение через коллатерали аксонов от ядер мышц-антагонистов, возбуждаемых аналогичным образом клетками другого бугорка, создает суммарное возбуждение, вычитаемое из первого. Вычисление вертикальной координаты подобного квазицентра тяжести осуществляется аналогичным образом. Конечно, такие вычисления могут выполняться и при участии волокон комиссур, соединяющих аналогичные точки контралатеральных тектальных отделов, а не ядер глазодвигательного нерва. Движение глаз в такой схеме прекращается тогда и только тогда, когда точка фиксации совпадает с центром тяжести.

Необходимо подчеркнуть, что рефлекс, для которого мы только что построили весьма грубую, но полезную модель, при нормальном функционировании управляется еще и «вышшими центрами». Например, выбор участка зрительного поля, на который направлен взгляд, может диктоваться «интересом», а реф-

лекс при этом определяет лишь выбор точки фиксации в данном участке (ср. с системой автоподстройки в радиоприемнике); взгляд может оставаться фиксированным на некоторой точке

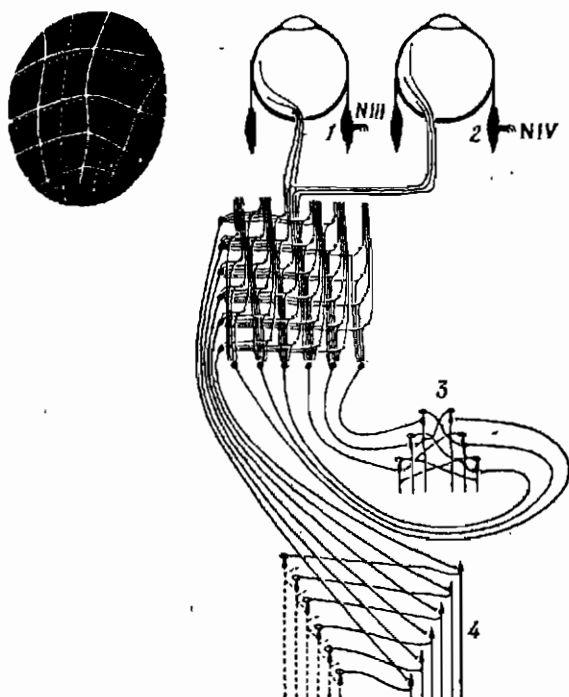


Рис. 97. Схема Питтса — Мак-Каллока для объяснения рефлекторного контроля движений глаз.

Глаз остается неподвижным только тогда, когда активность в обоих бугорках верхнего двухолмия сбалансирована.

1—внутренняя прямая мышца левого глаза; 2—наружная прямая мышца правого глаза; 3—мотонейроны, управляющие вертикальным движением; 4—мотонейроны (N III, N VI), управляющие левой внутренней и правой наружной прямыми мышцами глаза. Слева вверху показана сенсорная (пунктирная линия) и моторная (сплошная линия) проекции Апер на правой бугорок верхнего двухолмия кошки.

до тех пор, пока она не будет «достаточно» изучена. Напротив, неожиданная яркая вспышка может подавить все остальные компоненты операции усреднения и на короткое время взять верх над рефлекторным контролем, вынуждая организм оказать хотя бы мимолетное внимание новой ситуации.

Хотелось бы отметить, что даже если включить в уравнения, описывающие схему Питтса — Мак-Каллока, демпфирующие

члены, препятствующие возникновению незатухающих колебаний глазных яблок относительно их положения равновесия, у этой схемы все равно останется один серьезный недостаток: она по самой своей сути следающая, тогда как рефлекторная «переброска» взгляда в направлении вспышки света существенно баллистическая. На самом деле движения глаз человека могут управляться как по баллистической, так и по следающей схемам. Обычно человек, рассматривающий некоторую сцену, сначала фиксирует взгляд на одной точке зрительного поля, а затем его глаза совершают саккадические (термин для баллистического движения глаз) движения, фиксируя взглядом другую точку, и так до тех пор, пока не будет просмотрено достаточное число точек для того, чтобы составить себе представление о внешней обстановке. Однако в других ситуациях, например наблюдая за проезжающим мимо автомобилем, прежде чем перейти улицу, человек фиксирует взгляд на этом объекте и следит за ним. У приматов различные области коры могут модулировать активность верхнего двухолмия, и Биззи удалось выяснить, что в одной из них, в так называемом фронтальном зрительном поле, находящемся в лобной доле коры, имеются три типа клеток: клетки типа I работают при баллистических движениях глаз, типа II — при следающем режиме этого движения, а остальные клетки занимаются не столько движениями глаз, сколько движениями головы. Возможно, что при более тщательном исследовании подобная ситуация будет обнаружена и в верхнем двухолмии. В любом случае создается впечатление, что схема Питтса — Мак-Каллока больше подходит для описания следающего, чем баллистического режима.

Чтобы исправить это, перейдем к изучению другой модели, предложенной Брайтенбергом и Онесто [31], которая описывает баллистические движения, управляемые вычислительной машиной с распределенными функциями. (Следует сказать, что Брайтенберг и Онесто придумали свою модель для описания работы мозжечка. Однако впоследствии было получено так много новых данных о мозжечке, что сохранить эту модель для коры мозжечка без коренной переработки оказалось невозможным. Критику различных моделей мозжечка можно найти в работе Бойлза и Арбиба [30], а здесь вряд ли следует вдаваться во все подробности. Я не стремлюсь к тому, чтобы создать модель функционирования той или иной подсистемы мозга. Скорее мне хотелось бы показать некий плодотворный способ моделирования функций мозга. Руководствуясь этим, я рассказываю здесь о моделях, содержащих новые принципы организации, надеюсь стимулировать дальнейшие исследования по выяснению биологических механизмов, воплощающих эти принципы в нервной

системе, или возможностей их использования в конструкции систем управления для роботов.)

При стрельбе основную роль играют две силы: взрывная сила заряда, толкающая снаряд к цели, и сила торможения, возникающая в момент, когда снаряд попадает в цель (если бы цель отошла в сторону, снаряд не смог бы остановиться в той точке, в которую целились). Баллистические движения животных также основаны на подобном «релейном» принципе управления. Опыты с быстрым сгибанием и разгибанием конечности в *суставах* показали, что по времени активация мышц составляет лишь небольшую часть движения и что продолжительность таких периодов активации, по-видимому, не зависит от продолжительности движения. Вначале возникает короткая вспышка активности, во время которой мышца-агонист активно сокращается, а мышца-антагонист расслабляется, и в результате соответствующая конечность приобретает ускорение; затем наступает период покоя, после чего происходит новая вспышка активности, вызывающая сокращение мышцы-антагониста и торможение движения.

Эксперименты Биззи с движениями глаз выявили систему, в которой в «пусковой момент» возникает возбуждение мышцы-агониста при полной пассивности мышцы-антагониста, и так продолжается вплоть до «финального момента», когда обе мышцы возвращаются на фоновый уровень возбуждения, соответствующего новой схеме. Создается впечатление, будто одновременно включается вспышка активности агониста и сигнал управления следящей системой, выводимой на новый уровень, причем первый из видов активности преобладает над вторым вплоть до его отключения. Во всяком случае, и в той, и в другой ситуации продолжительность движения определяется, по-видимому, в основном временем подачи сигнала «стоп» относительно сигнала «пуск», которое диктуется мозгом, а не внешней средой, как при полете снаряда. Таким образом, Брайтенберг и Онесто предложили схему преобразования пространства во время, поскольку в ней положение входного сигнала (в котором закодировано положение искомой цели) определяет момент выхода (проявляющийся в том, что мы «ударяем по тормозам»). В их схеме (рис. 98) имеется линейная цепочка выходных клеток, выходные каналы которых организованы таким образом, что возбуждение любой из этих клеток вызывает возбуждение мышцы-антагониста и тормозит баллистическое движение. Входные волокна этих клеток распадаются на две группы, образующие две одинаковые линейные цепочки, причем их расположение на прямой соответствует различным значениям суставного угла. Каждое волокно первой группы — С-волокна — соединяется с единственной выходной клеткой. Волокна

же второй группы — М-волокна — ветвятся так, что каждое из них оказывается соединенным со всеми выходными клетками. Скорость распространения возбуждения по этим параллельным волокнам такова, что время, необходимое на передачу возбуждения от одной выходной клетки к другой, равно времени, затрачиваемому суставом на соответствующее изменение сустав-

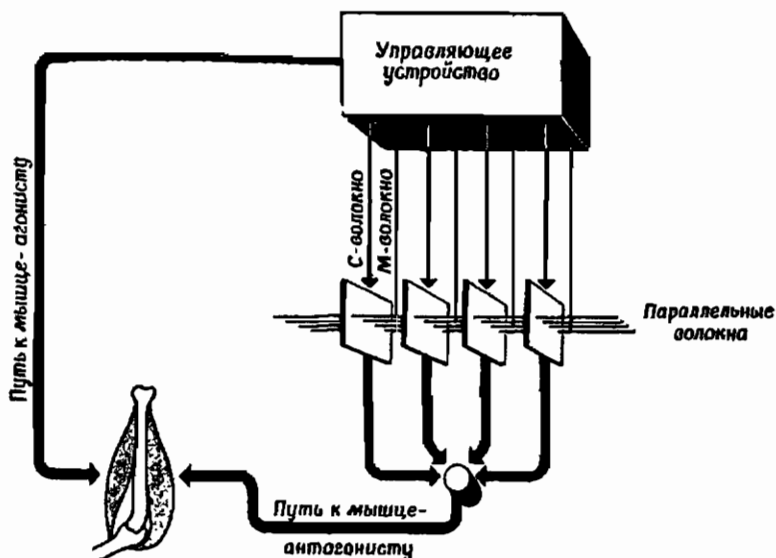


Рис. 98. Схема Брайтенберга — Онесто для управления баллистическим движением.

В ней пространственное разделение возбужденных С-волокон и М-волокон преобразуется в разделение возбуждения мышц-агониста и антагониста во времени.

ного угла, предполагая постоянство угловой скорости движения в этом суставе.

Регулятор описываемой системы запускает баллистическое движение, генерируя три сигнала. Если говорить лишь о движениях в суставе, то первый из этих сигналов возбуждает мышцу-агониста, что и приводит к началу движения. Другой сигнал по С-волокну поступает на выходную клетку, соответствующую исходному положению сустава, а третий — по М-волокну на выходную клетку желаемого положения. (Читателю предлагается самому придумать необходимую систему связей для управления саккадическими движениями глаз.) Если предположить, что выходная клетка может реагировать на сигнал, пришедший по параллельным волокнам, только при условии, что она получила до этого сигнал по С-волокну, то понятно,

что из всех выходных клеток может возбудиться только та, которая соответствует возбужденному С-волокну, а время ее возбуждения будет соответствовать ее расстоянию до клетки, возбужденной М-волоком. Такая схема вызовет торможение движения за счет возбуждения мышцы-антагониста как раз в нужный момент времени.

Заметьте, что в этой схеме мы освобождаем регулятор от необходимости «знать», в каком положении находится сустав,

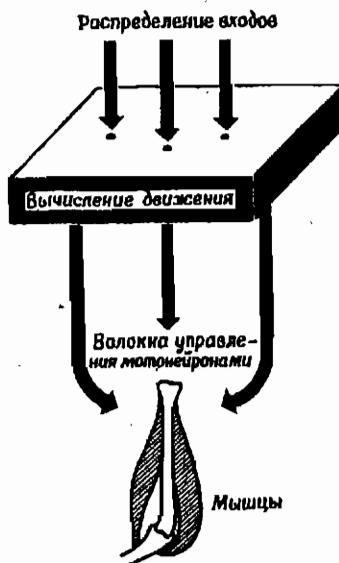


Рис. 99. Схема распределенной системы управления движением, реализующей механизмы типа показанных на рис. 97 и 98.

Пространственно закодированное положение цели преобразуется в соответствующую последовательность команд, а весь набор входов вызывает движение к «центру» закодированных целей.

организовав контур обратной связи таким образом, что он осуществляет непрерывный контроль за этим состоянием и обеспечивает возбуждение именно того С-волокна, какое нужно.

Конечно, мы не утверждаем, что предложенная здесь модель точно соответствует тому, как на самом деле нервная система управляет движениями. Мы лишь продемонстрировали некую правдоподобную схему (рис. 99), возможно соответствующую организации одной из подсистем нервной системы позвоночных; на этой схеме выбор места ввода входного сигнала на поверхности управляющих элементов может кодировать задание для мышц. Более того, можно ожидать, что (по аналогии с результатами объединения схем Питтса — Мак-Каллока и Брайтенберга — Онесто) при возбуждении целого множества точек на такой поверхности система перейдет в состояние, соответствующее «центру тяжести» этого множества.

Необходимо отметить, что, доведя эту схему до ее логического конца, мы пришли бы к иерархической системе. Например,

при фиксации новой точки в пространстве увеличение угла отклонения от среднего положения потребует сначала соответствующего движения одних только глаз, затем головы и глаз вместе, а затем глаз, головы и всего туловища. Поэтому выходной сигнал вычислительного устройства, управляющего такими движениями, должен управлять не каким-то одним суставом, а целой иерархией регуляторов более низкого уровня, поведение которых, естественно, в свою очередь должно зависеть и от регуляторов позы низшего уровня, о которых говорилось в предыдущем разделе. Заметим, что эта схема должна также контролировать скорость движения и т. п. В качестве первого грубого приближения можно предположить, что подобный подход выработался в процессе эволюции в результате совершенствования «схем», управляющих следящими движениями изнутри, а не с помощью сенсорных каналов.

Как мы подробнее выясним в разд. 6.3, поведение любого организма зависит главным образом от того, в какой мере он способен установить правильные взаимоотношения с теми частями внешней среды, с которыми он собирается взаимодействовать. В разд. 4.4 мы уже видели, что при движении организм должен корректировать свою внутреннюю модель, чтобы она могла служить прочной основой для планирования его будущих взаимодействий со средой. Чтобы связать эти соображения со структурами, показанными на рис. 96, для которых целью или «стандартной формой» служит «объект, расположенный в месте, удобном для взаимодействия», рассмотрим животное, в зрительное поле которого попал какой-то объект, а остальное зрительное поле затянуто туманом. Тогда две различные ситуации:

1) животное приблизилось к объекту на 1 м,

2) объект приблизился к животному на 1 м

вызовут одинаковую стимуляцию сетчатки. Но несмотря на такое совпадение стимуляции, во «враждебной» среде (а именно в такой среде протекала наша собственная эволюция) лишь в ситуации 2 объект важен для животного и требует внимания, ориентации в его сторону и идентификации источника возбуждения. Точно так же, если объект «не отстает» от животного, оно должно обратить на него внимание, хотя у организма и нет зрительной обратной связи, сообщающей ему о его собственном движении или о движении объекта. Это подводит нас к одному важному понятию: хотя воспринимающая система получает информацию в виде изменений стимуляции, изменения, вызванные собственными движениями животного, необходимо «исключить» из числа наблюдаемых изменений; в противном случае они могли бы замаскировать важные перемены во внешней среде.

Изящное экспериментальное доказательство существования такого «исключения» можно найти в работе фон Хольста и Миттельшtedта [173]. Оно подтверждает гипотезу, согласно которой восприятие зависит не только от сенсорных входов как таковых, но в не меньшей степени от разницы между изменениями, произведенными собственными движениями организма, и изменениями на его рецепторных поверхностях. Фон Хольст и Миттельшtedт проводили свои эксперименты на мухах, но после

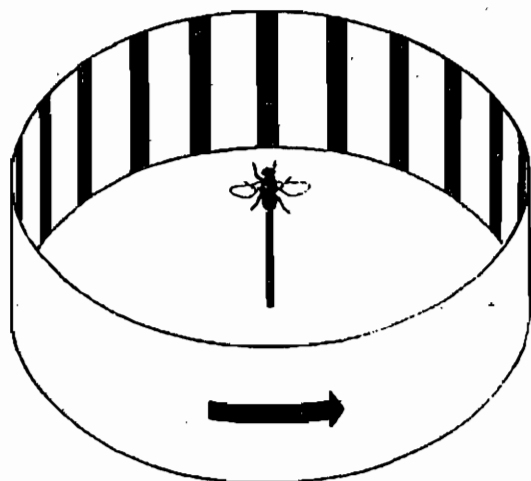


Рис. 100. Экспериментальная установка, которая демонстрирует, что муха чувствует разницу между собственным движением и изменениями, вызванными движением вонне.

описания их исследований мы приведем и подтверждающие данные, относящиеся к человеку.

Если ограничить подвижность мухи так, чтобы она могла лишь поворачиваться относительно некоторой неподвижной точки, а затем поместить ее во вращающийся барабан, на стенках которого нарисованы вертикальные полосы, позволяющие отчетливо видеть вращение (рис. 100), то муха будет поворачиваться в сторону вращения, как бы «отслеживая» его. Если затем остановить барабан и поместить по одну сторону от мухи источник соблазнительного для нее запаха, то она повернется к этому источнику. Однако при этом ее повороте происходит такое же смещение полосок относительно сетчатки ее глаз, как если бы барабан вращали в обратном направлении. Тем не менее муха не изменяет в связи с этим направления своего вращения, как следовало бы ожидать, если бы мы предположили, что ее реакция на сенсорную стимуляцию не зависит от ее



собственного движения. Для такой способности мухи «игнорировать» вращение в противоположном направлении можно предположить по крайней мере два удовлетворительных объяснения. Одно из них состоит в том, что во время собственного движения муха просто «блокирует» все зрительные входные сигналы, а, согласно другому объяснению, она действительно «вычитает» свое собственное движение из наблюдаемого движения внешней среды. Фон Хольст и Миттельштедт изящно исключили возможность первой гипотезы, повернув голозу мухи относительно ее туловища на  $180^\circ$ , что можно сделать, не нарушая нервных связей между глазами и телом. Такая муха, раз начав вращаться, продолжает делать это до тех пор, пока не падает от изнеможения; это наводит на мысль, что вместо того, чтобы «блокировать» зрительные входы, она действительно вычитает планируемое движение из наблюдаемого (которое теперь из-за неестественного положения головы оказывается строго противоположным планируемому) и реагирует на образующееся несоответствие так, как если бы это и было истинным движением внешней среды.

Данные о человеке подтверждают этот вывод. Когда человек впервые надевает инвертирующие призмы, при каждом движении головы окружающий его мир начинает «прыгать» в глазах. И здесь, как и в предыдущем случае, инверсия приводит к изменению направления возбуждения сетчатки; оно становится противоположным тому, которое обычно связывают с этим движением. Занятно, однако, что человек может в конце концов адаптироваться к такому обращению, а муха не может. Читателю предлагается предсказать, что ощущает человек с недавно возникшим параличом глазных мышц, когда он «хочет» перевести взгляд с одного предмета на другой.

Познакомившись с экспериментальными подтверждениями способности животных в восприятии какого-либо одного параметра учитывать эффект своих собственных движений, мы должны заметить, что у млекопитающих с их сложно регулируемые рецепторами, осуществляющими многомерную связь со столь же сложными эффекторами, возникают еще более тонкие проблемы. Мы считаем, что им необходимы механизмы, построенные по тому же принципу, что и схема на рис. 101.

На рис. 101 входной набор данных готов поступить на «поверхность хранения», где он вскоре заменит предыдущий подобный вход. Новый входной набор поступает одновременно в механизм, где происходит сравнение некоторых признаков этой структуры с соответствующими признаками «прогнозируемой новой сцены». Этот прогноз составляется путем коррекции предыдущей входной сцены (записанной на «поверхности хранения»), с учетом как собственных движений системы в текущий



была впервые замечена Мак-Кеем, который впоследствии опубликовал обзор своих работ [157].) Связи, идущие от тех участков новой сцены, которые не соответствуют прогнозу, не тормозятся на пути к «поверхности анализа», а именно на этих участках система должна сосредоточить свое внимание. Надо подчеркнуть, что схема на рис. 101 — не более чем предварительный набросок и что блок «преобразования» и экстраполятор — это устройства с высокой степенью распараллеливания функций, способные по-разному преобразовывать различные части набора входных данных. Более того, мне совершенно не ясно, сколь важную роль в подобных процессах играет прямое эфферентное управление на первых этапах входных путей, и в какой мере сами выходные комплексы «поверхности анализа» через посредство обратной связи влияют на работу блока «преобразования» и экстраполятора.

Для Питтса и Мак-Каллока в их модели двухолмия самым главным было то, что она служила примером реализации предложенной ими схемы, согласующимся с нейрофизиологическими данными. А нам хочется сделать главный упор на то, что эта модель демонстрирует возможность существования *соматотопически организованных сетей, в которых нет «руководящего нейрона», предписывающего поведение системы в целом, а вместо этого динамические системы эффлекторов с помощью связывающих их взаимодействий нейронов извлекают выходную траекторию из популяции нейронов, каждый из которых располагает лишь локальной информацией о том, как должна вести себя система.* И главная мысль настоящей книги состоит в том, что центральным элементом теории мозга должно стать изучение именно таких сетей. Развитию этого подхода и посвящена следующая глава.

## Глава 6

### МНОГОСЛОЙНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПАМЯТИ И ВОСПРИЯТИЯ

В настоящей главе мы разовьем тезис, уже сформулированный в разд. 5.5, а именно, что вычисления в мозгу организованы по принципу четко выраженного пространственного распределения, а не управляются централизованно каким-то одним руководящим органом. Сначала мы согласуем этот принцип с другими принципами, развивавшимися в этой книге, для чего обратимся к неопубликованному «Введению в трактат по философии нейрофизиологии» Уоренна Мак-Каллока. В разд. 6.2 мы познакомимся с понятием комплекса выходных признаков как естественным деенарправленным дополнением к сенсорным признакам, рассмотренным в разд. 2.4, и свяжем все это с нашими соображениями о кратковременной памяти (гл. 4). В разд. 6.3 мы обсудим, как может происходить непрерывная трансформация содержащихся в памяти наборов таких комплексов, обеспечивая адекватную связь организма с внешним миром; здесь мы особо подчеркнем роль переднего и среднего мозга в получении ответов соответственно на вопросы типа «что?» и «где?» в процессе зрительного восприятия. И в завершение мы оценим, в какой степени голография может служить источником полезных метафор, позволяющих представить себе устройство памяти для вычислительной машины с той высокой степенью распределения функций, которую мы считаем характерной для работы мозга.

#### 6.1. ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ

Для того чтобы понять, как «работает» нервная система, необходимо иметь правдоподобные представления о том, как она устроена. Конечно, мы в состоянии регистрировать активность отдельных клеток, но если бы мы предприняли измерение активности почти всех клеток мозга, это дало бы нам, с одной стороны, слишком много, а с другой — слишком мало. Слишком много потому, что мы потонули бы в этой невообразимой массе данных, а слишком мало — потому что мы не

смогли бы разглядеть в них важных закономерностей. Поэтому в этом разделе мы постараемся сформулировать некоторые «принципы» организации, которые могли бы помочь нам преодолеть это препятствие и сделать задачу экспериментатора по сбору данных более обозримой.

В начале шестидесятых годов Мак-Каллок собирался написать «Трактат по философии нейрофизиологии». Он написал к нему введение, которое мы здесь воспроизводим, чтобы показать, какое огромное влияние его взгляды на нейрофизиологию оказали на нашу теорию мозга. К сожалению, остальные главы книги Мак-Каллока так и остались ненаписанными. Однако многие из его идей читатель сможет найти в труде «Материализация мозга», в котором собраны работы Мак-Каллока.

Уоррен Мак-Каллок

## ВВЕДЕНИЕ В ТРАКТАТ ПО ФИЛОСОФИИ НЕЙРОФИЗИОЛОГИИ

0.0. Человек начал разбираться в своем поведении, в своей психологии за две тысячи лет до того, как он перестал считать, что мозг существует лишь затем, чтобы охлаждать кровь, и за четыре тысячи лет до того, как выяснил, что мозг — это не студенистое вещество, из которого в результате конденсации образуются нервные волокна. Понимание устройства мозга может оказаться полезным для изучения поведения человека, поскольку оно объясняет нам самого человека, но оно не в состоянии учесть то, на что направлено это поведение. Поэтому нейрофизиология не достигает уровня психологии, когда речь идет об отношениях между тремя объектами, например следующего типа: «А ведет себя так, как если бы В казалось ему С». Мы не собираемся предлагать никакого исчисления таких триадических отношений и вообще какой бы то ни было логики психологии.

0.10. Нам хотелось бы лишь предложить логику, пригодную для нейрофизиологии как науки о нервной системе. Нервная система имеется только у многоклеточных животных и образована из клеток, называемых нейронами. Гистологически нейроны обнаруживаются благодаря своему родству с некоторым красителям. Морфологически они образуют единую систему, единую сеть, поскольку в этой системе каждый нейрон связан со всеми остальными. Электрически нейроны отличаются тем, что они проводят электрические импульсы. Нейроны образуют единую систему и с физиологической точки зрения, поскольку появление импульсов в одном нейроне влияет на аналогичные процессы в нейронах, с которыми он связан, и зависит в свою очередь от появления импульсов в других соседних нейронах. Эта сеть устроена таким образом, что на каждый эфферентный периферический нейрон (т. е. каждый нейрон, управляющий эффектором, будь то мышца или железа) может косвенно, по разным путям, проходящим через сеть, влиять любой периферический афферентный нейрон (т. е. каждый нейрон, на который непосредственно действует какой-то рецептор, будь то сенсорная клетка или какой-то другой датчик). При этом через каждый нейрон проходит по крайней мере один такой путь.

0.11. Место соединения нейронов — синапс, где один из них оказывает влияние на другой, — функционирует в основном только в одном направлении. Поэтому распространение влияний по любому пути происходит лишь в этом направлении. Однако в сети имеется также много контуров, т. е. ва-

мкнутых путей, и даже в периферических афферентных нейронах характер возбуждения и передачи импульсов обычно зависит от поведения других нейронов. Более того, сами рецепторы испытывают влияние эфферторов, управляемых эфферентными периферическими нейронами. От контуров, замыкающихся через рецепторы и поддерживающих в них возбуждение, зависит наша жизнь: благодаря им мы дышим. Аналогичные контуры в недрах системы обеспечивают контакт с внешним миром: благодаря им мы воспринимаем то, что происходит вокруг. Те контуры, выходящий сигнал которых одновременно поступает и на вход с обратным знаком, т. е. наши рефлексы, и другие отрицательные обратные связи в мозгу, обеспечивают стабильность системы, возвращая ее к тому состоянию, из которого ее вывело возмущение. Возвращение к исходному состоянию — вот функция каждого такого контура, его цель. Установленное таким образом состояние определяет финал и конечную цель работы такого контура, его энтелехию.

0.12. Наши рецепторы чрезвычайно чувствительны к малейшим изменениям интенсивности специфических форм энергии или концентраций некоторых веществ. Поэтому такие изменения обычно вызывают последовательность импульсов в замыкающих афферентных периферических нейронах, состояния которых определяются нервной системой в целом в зависимости от того, где находится нейрон и о каком времени идет речь. Таким образом, последовательности импульсов в любом и каждом афферентном периферическом нейроне сообщают нервной системе о происходящих вокруг событиях. Поэтому генерируемые последовательности импульсов играют для нервной системы роль полезных сигналов при условии адекватности внешних стимулов и состоянии воспринимающих эти стимулы нейронов. Последовательности импульсов, вызванные любыми другими причинами, составляют то, что инженеры называют шумами. Полезные сигналы и шумы, которые непременно должны различать как инженеры, так и нейрофизиологи, описываются (но не различаются) физиками на языке изменения материи и энергии. Они различаются функционально — в зависимости от того, помогают или не помогают нервной системе решить стоящие перед ней задачи.

0.13. Поскольку происходящие в окружающем нас мире события довольно однородны, а наши рецепторы расположены в довольно тесной близости друг к другу, практически любой адекватный стимул воздействует одновременно на целый комплекс однотипных датчиков. А так как каждый датчик может влиять на несколько афферентных периферических нейронов, испытывая в свою очередь влияние нескольких других датчиков из данного комплекса, сигналы, генерируемые многими из этих нейронов, сильно коррелируют между собой. Именно благодаря такой избыточности мы и распознаем объекты восприятия и такие их свойства, как «голубой», «сладкий», «твердый» и «пронзительный».

0.132. Любой внутренне связанный источник адекватной стимуляции, движущийся относительно какой-то поверхности, например сетчатки или кожи, последовательно воздействует на соседние рецепторы. Это вызывает возбуждение соседних, перекрывающихся групп афферентных периферических нейронов, у которых вызванные этим стимулом изменения последовательности импульсов продолжаются дольше, чем вызвавший их эффект. Благодаря подобной корреляции одновременных сигналов мы воспринимаем конкретные объекты, характеризующиеся наличием траектории, например летящую искру, оцарапавшую нас веточку или гудок промчавшего мимо поезда. На любой афферентный периферический нейрон соматической сенсорной системы или любую биполярную клетку сетчатки и воздействуют датчики более чем одного типа, хотя воздействие, оказываемое на последовательность импульсов в этом нейроне, может меняться в зависимости от типа датчика. Поэтому изменения свойств движущегося объекта, если только они не слишком велики или не слишком неожиданны, не мешают нам идентифицировать его на основании его траектории.

0.133. Если бы не отмеченная выше избыточность, трудно было бы представить себе, каким образом животному удается находить своих родителей, добывать пищу, обходить препятствия, защищаться от врагов, находить себе брачного партнера или заботиться о своем потомстве. Она позволяет нам идентифицировать и классифицировать объекты, несмотря на то что мы воспринимаем их на фоне несущественных адекватных стимулов из внешнего мира и шумов, вызванных несовершенством работы датчиков. Эти вопросы нас здесь не интересуют, но, решая все эти проблемы, природа наградила нас нервной системой с сильно коррелированными входами, и поэтому мы должны рассматривать сигналы в афферентных периферических нейронах как результат кодирования с высокой избыточностью. И забывать об этом нельзя.

0.141. Более того, центральные окончания этих нейронов таковы, что они обеспечивают эффективную проекцию окрестности рецепторов в окрестность центральных нейронов-реципиентов и соответствующие окрестности пересекаются между собой. Центральное расположение наших афферентных периферических нейронов также образует аналогичную топологию эффекторов, и возникающие при этом отображения тоже избыточны.

0.142. Простейшая рефлекторная дуга образуется рецептором растяжения, воздействующим на афферентный периферический нейрон растянутой мышцы и вызывающим ее сокращение. Но это не единственный контур пространства возбуждения. Другой контур, проходящий через те же афферентные нейроны, подключает к работе нейроны, управляющие мышцами-антагонистами для растянутой мышцы в одном или нескольких суставах, и вызывает в них уменьшение напряжения. Все другие последовательные дуги из большего числа последовательно соединенных нейронов содержат некоторые промежуточные связи, которые часто называют вставочными нейронами.

0.143. По аналогичному принципу устроены и дистантные рецепторы, расположенные в голове. Так, фоторецепторы топологически проецируются на биполярные клетки, а те в свою очередь — на ганглиозные клетки глаза. Сигналы этих клеток идут в верхние бугорки четверохолмия и через него в кору головного мозга. Они попадают также и в латеральное колленчатое тело и через него снова в кору головного мозга. Все эти пути топологически связаны один с другим. И если бы не такая многоканальность связи на всем протяжении пути от рецепторов к эффекторам, нам пришлось бы передавать с помощью какой-то последовательности сигналов и информацию о расположении места восприятия, с тем чтобы именно в это место была направлена соответствующая реакция. А это — «локальный адрес» Лотце<sup>1</sup> — составляет в случае зрения 20 бит информации на каждую из миллиона ганглиозных клеток.

0.145. Многоканальность связи позволяет сохранить этот локальный адрес всюду, кроме тех частей мозга, в которых сигналы из многих или даже всех участков организма собираются воедино: либо для того, чтобы принять решение, касающееся поведения всего организма в целом (как, например, в ретикулярной формации), либо для того, чтобы распознать объект, воспринимаемый с помощью нескольких сенсорных модальностей, либо, наконец, для того, чтобы выработать навыки или суждения, зависящие от такого целостного восприятия, как это имеет место в коре головного мозга.

Опираясь на эти идеи Мак-Каллока и материал первых пяти глав этой книги, мы попробуем вкратце сформулировать несколько принципов, которыми будем руководствоваться при попытке построить теорию мозга.

<sup>1</sup> См., например, R. H. Lotze «Medizinische Psychologie oder Physiologie der Seele», Leipzig, 1852.

I. Мы пытались, в частности в разд. 2.1 и 4.1, разобраться в основных функциональных свойствах, которыми, по-видимому, должна обладать любая система, способная приспособиться к сложной внешней среде, будь то робот или животное. В этом смысле мы, возможно, идем дальше Мак-Каллока и не отрекаемся, как он это делает в пункте 0.10, от всяких попыток построить логику, пригодную не только для нейрофизиологии. Пытаясь понять, почему животным удается целенаправленно и эффективно передвигаться в постоянно меняющемся внешнем мире, важно отметить, что изменения этого внешнего мира все же не выходят за известные пределы. Поэтому животному (или роботу) нет необходимости уметь пользоваться своими эффекторами в каждой из необозримого множества возможных комбинаций. Оно может решать многие задачи на подсознательном, полурефлекторном уровне, пользуясь хорошо отработанным репертуаром взаимодействий. Быть может, понятие внутренней модели даст нам возможность подступиться к отношениям типа «*A* ведет себя так, как если бы *B* казалось ему *C*», о которых говорит Мак-Каллок в пункте 0.0, хотя, конечно, мы ни в коей мере не готовы предложить общую логику триадических отношений.

По сути дела, наше понимание функций организма основано на представлении, согласно которому восприятие всегда нацелено на действие. При этом предполагается, что система, которая собирается взаимодействовать с переменной окружающей средой новым и адаптивным образом, должна построить и постоянно корректировать свою внутреннюю модель взаимодействий с миром; поэтому восприятие в значительной мере зависит от этой модели и направлено на ее совершенствование — а тем самым и на совершенствование будущих действий — в той же степени, в какой оно определяет текущее действие.

Изучая последствия такой направленности восприятия на действие и на построение моделей, мы выяснили, что среди всех соотношений между организмом и окружающим миром особую роль должны играть пространственные отношения. Мы обнаружили также, что восприятие именно в силу того, что оно открывает системе различные возможности действия, одновременно и создает для него дополнительные трудности, связанные с необходимостью устранения избыточности потенциальных команд, или, иначе говоря, с необходимостью выбрать не более одного из целого множества доступных организму действий.

II. Мы выделили несколько аспектов, по которым мозг существенно отличается от машин, созданных человеком. Один из таких аспектов связан с элементной базой: мы спрашиваем, что следует из того, что мозг представляет собой сеть нейронов.



Мы добавляем к этому, что мозг — это живая система и вместе с остальными частями организма развился из одного яйца. Многие свойства мозга легче понять, исходя из требований биологического развития, а не из функции взрослой особи. Другое отличие имеет исторический характер: мы не можем не делать различия между мозгом человека, возникшего из мозга других животных в процессе эволюции, одним из последних достижений которой было развитие речи, и управляющими устройствами робота, который даже в простейшем случае умеет в полном смысле слова манипулировать символьной информацией.

Слишком часто вследствие переоценки роли языка мы считаем, что любое наше взаимодействие с внешним миром требует языкового опосредования приблизительно следующего вида:

- 1) увидев объект, назови его,
- 2) по названию объекта назови подходящее действие,
- 3) *действуй* согласно этому названию.

Эта простейшая схема усложняется, однако, учетом таких соображений, как необходимость взвешивания альтернатив. Но так или иначе такой подход приводит к структурам типа показанной на рис. 102, А. Многие специалисты по искусственному интеллекту идут именно по такому пути, изыскивая алгоритмы, рассчитанные на обычные «последовательные» ЭВМ и основанные на преобразованиях цепочек символов, а не пытаются понять механизмы мозга, лежащие в основе человеческого разума.

Центральная (и, как мне кажется, ошибочная) идея, заложенная в схеме 102, А, состоит в том, что все входные сигналы можно свести к различным сочетаниям нескольких удачно выбранных слов, которые можно преобразовывать с помощью некоторого централизованного руководящего органа в команды, управляющие нашими мышцами. И хотя, добавив к этому несколько подходящих контуров обратной связи, можно получить модели, позволяющие анализировать многие аспекты человеческого поведения, нам хотелось бы подчеркнуть, что существуют весьма совершенные стратегии обеспечения сенсомоторных отношений, не требующие такого суперрегулятора; поэтому может оказаться весьма полезным рассматривать вербальное опосредование лишь как еще один уровень нерархической структуры (рис. 102, Б). Здесь вербальное опосредование может непосредственно управлять выходом системы, но во многих аспектах разумного поведения, не носящих явно языкового характера, без него можно вполне обойтись. Это достигается либо путем передачи управления низшим центрам, либо путем перестройки лежащих в основе такого поведения сенсомоторных механизмов, которые, вообще говоря, при вычислении действий не пользуются в явном виде вербальными кодами.

В этой книге мы обычно игнорируем «лингвистический уровень» и вместо этого опираемся на мысль, что «смысл» входа для организма определяется теми взаимодействиями, в которые он может вступить с объектом, представляемым этим входом,

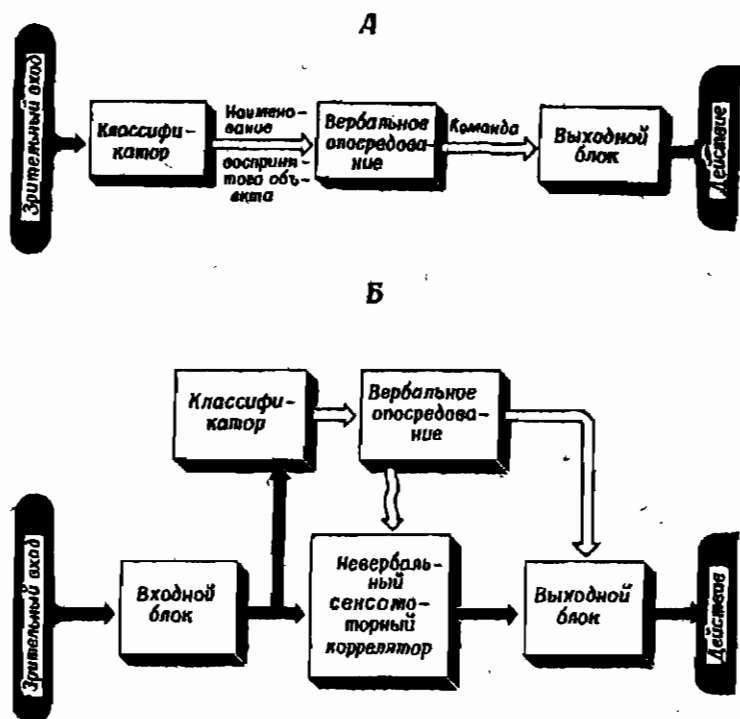


Рис. 102. Ошибочный подход к восприятию и действиям, основанный на вербальном опосредовании (А), которому мы противопоставляем более реалистическую схему (Б).

Хотя по схеме Б вербальное опосредование и может оказывать прямое влияние на выход, в большинстве случаев это не обязательно для разумного поведения, поскольку эту задачу берут на себя низшие центры или же ее выполнение обеспечивается просто путем перестройки сенсомоторного аппарата.

а эти действия зависят не только от того, что это за объект, но и от того, где он находится.

Система, представленная на рис. 102, Б, анархична в том смысле, что в ней нет головы или центра, который единовластно руководил бы ее вычислениями. Это распределенная вычислительная машина с высокой степенью распараллеливания действий. В связи с этим необходимо понять, как можно производить вычисления в сложной сети динамически взаимодействующих подсистем с высокой степенью распараллеливания. Поняв

это, нам будет легче оценить, как различные повреждения мозга могут отразиться на поведении. В 1929 г. Лешли [146] писал, что снижение эффективности поведения крыс в лабиринте, вызванное удалением различных участков коры, по-видимому, не зависит от того, какой именно участок был удален, а определяется лишь количеством удаленной коры. Это позволило ему сформулировать два «закона»: *закон массы*, согласно которому снижение эффективности зависит от массы удаленного участка, и *закон эквипотенциальности*, утверждающий, что каждый участок мозга может вносить одинаковый вклад в процесс решения задач. Все эти данные казались несовместимыми со взглядом на мозг как на вычислительную схему со строго распределенными функциями в раз и навсегда сформированной структуре. Однако их, быть может, удастся совместить, представив себе вычислительную схему, основанную на координации многих подпрограмм, работающих одновременно и параллельно. Ведь нередко для вычислений требуется лишь часть подпрограмм. И хотя в общем случае исключение одной из подпрограмм должно понизить эффективность системы, для некоторых задач недостающая подпрограмма может быть несущественна, а значит, ее устранение может лишь спасти систему от ненужных затрат времени на ее отработку в момент, когда нужно заниматься другими делами. Р. Уайт (личное сообщение) повторил опыты Лешли, но вместо того, чтобы оценивать снижение эффективности поведения крыс по одному-единственному параметру, он пытался выяснить источник такой деградации. Одна крыса может деградировать из-за того, что у нее появляется тенденция все время поворачивать влево, другая легко отвлекается, третья может сидеть неподвижно почти все время, но без всякого труда находит путь через лабиринт всякий раз, когда она «соизволит» попробовать. Таким образом, закон эквипотенциальности действует лишь тогда, когда мы оцениваем изменения в поведении довольно грубо; в самом деле, удаление различных подсистем может вносить совершенно различный вклад в нормальный уровень поведения.

III. Поэтому стоит заняться исследованием основной архитектуры таких систем, что, по нашему мнению, может оказаться полезным для поиска методов компактного описания вычислений, распределенных по сети из 10 миллиардов нейронов. Основное свойство такой структуры отмечено Мак-Каллоком в пункте 0.143, где он пишет, что в мозгу имеется много путей, каждый из которых топологически связан с другими. Мы будем формулировать это, говоря, что «мозг есть многослойная соматотопическая вычислительная машина», и посвятим остаток данного раздела обсуждению этого принципа; при этом следует отметить, что в соответствии с пунктом 0.145 Мак-Каллока этот

принцип, как бы полезен он ни был, применим не во всех случаях.

В разд. 3.3 мы высказали предположение, что, хотя нам, может быть, и удалось бы сконструировать робот, «мозг» которого был бы организован как централизованный преобразователь ( $\theta_{\alpha\theta}$ ) —  $\theta$  в соответствии с рис. 43, целесообразность централизованного процессора начинает казаться сомнительной, если представить себе, что его выход нужно «разыгрывать» на целой системе мотонейронов, как это имеет место в биологических системах. Красота схемы Питтса — Мак-Каллока для верхних бугорков четверохолмия (разд. 5.5) заключена в той простоте, с которой она демонстрирует (по крайней мере в рассматривавшемся случае), что без централизованного процессора вполне можно обойтись и что все вычисления можно осуществить распределенным образом на одном или нескольких слоях, разделяющих структуры входных и выходных элементов.

Как мы уже знаем из разд. 2.4, Летвин, Матурана, Мак-Каллок и Питтс [150] выяснили, что большинство ганглиозных клеток сетчатки лягушки можно отнести к одному из четырех классов, например к классу «детекторов границы» или к классу «детекторов движущегося закругленного края». Здесь же нам хотелось бы подчеркнуть, каким образом информация, поступающая из детекторов четырех типов, распределяется в области тектума. Окончания этих детекторов образуют четыре разных слоя, расположенных один над другим и обладающих следующими свойствами: 1) различным слоям соответствуют детекторы разных типов, 2) в каждом слое сохраняются пространственные соотношения между исходными клетками (т. е. определенное направление по слою соответствует определенному движению относительно сетчатки), 3) окончания, лежащие в этих четырех слоях друг над другом, относятся к ганглиозным клеткам, рецептивные поля которых перекрываются. Это еще один яркий пример нейронной специфичности, которая создает структурную основу для функций мозга. Следует отметить, что в подобных взаимосвязях между двумя слоями могут соблюдаться грубые пространственные соотношения (вверх и вниз, но не поперек), но нарушаются соотношения размеров. Например, в одном слое человеческого мозга, получающем информацию от рецепторов прикосновения, рецепторам пальца может отводиться больше места, чем рецепторам всего туловища, поскольку для того, чтобы управлять тонкими манипуляциями, мозгу необходима подробная сенсорная информация из пальцев. Такая взаимосвязь между двумя слоями клеток называется *соматотопической* (от греч. *сома* — тело и *топос* — место), так как она сохраняет информацию об участке тела, где возникло возбуждение, по мере движения от рецепторов в центральную

нервную систему. Чем дальше мы отходим от периферии, тем менее выраженной становится такая взаимосвязь, но мы по-прежнему можем основывать свои исследования на предположении, что в двух соседних слоях такие соотношения сохраняются. Этим мы хотим сказать, что один из полезных способов структурного описания кажущегося хаоса многих частей мозга состоит в том, чтобы описывать эти части как совокупность взаимосвязанных слоев, в которых положение на слое является основным индикатором функционального содержания активности данной клетки, а анализ одной полоски такого слоя может обеспечить понимание функции слоя в целом.

Рассматривая соматотопические связи между слоями в таком распределенном вычислительном устройстве, читатель должен иметь в виду, что мы употребляем здесь термин «соматотопический» в чрезвычайно широком смысле. Для входных путей зрительной системы расположение на слое служит кодом расположения в зрительном поле относительно глаза, но (и для нас это имеет принципиальное значение) эта кодировка соотнесена к системе координат нашего тела как результат сформированных в процессе индивидуального развития связей между сетчаткой и мозгом. В слуховой системе положением на слое кодируется частота стимуляции вблизи периферии, в тактильной системе — положение на теле; в последнем случае термин «соматотопическая связь» приобретает свой буквальный смысл. И хотя термины «ретинотопическая связь» или «топотопическая связь» точнее бы соответствовали другим ситуациям на периферии, нам кажется, что по мере движения в центральную нервную систему кодирование должно отражать соотношения между организмом и внешним миром в более общей форме. Что же касается выходных путей, то положение в слое кодирует там, возможно, расположение цели какого-либо движения. Можно ожидать, что по мере перехода от периферии к слоям мозга, весьма удаленным от преобладающего влияния какой-то одной сенсорной модальности или какого-то одного вида действий, положение в слое будет весьма мало зависеть от расположения в теле. Однако мы полагаем, что и при этом положение в слое все еще кодирует какие-то основные параметры функции клетки. И именно в этом, возможно чрезмерно широком, смысле позиционного кода мы будем говорить о соматотопии даже для весьма глубоких слоев, далеких от периферии. Более того, в мозгу имеются структуры, и, возможно, ретикулярная формация одна из них, где представления о многослойности неприменимы.

Мы не собираемся фанатически отстаивать справедливость утверждения: «Мозг есть соматотопически организованное многослойное вычислительное устройство». Мы просто хотим вос-

пользоваться им как удобным девизом, напоминающим нам о том, что настало время в полную силу использовать в наших теориях мозга понятие соматотопичности, уже давно играющее важную роль в анатомии и физиологии. Даже в тех структурах, которые не являются слоистыми, положение нейронов может играть роль, которой нельзя пренебречь при моделировании его вклада в общую функцию данной структуры.

Именно это мы имели в виду, когда в конце гл. 1 выражали надежду, что нам удастся убедить читателя в жизнеспособности исследований, направленных на создание моделей «распределенных децентрализованных вычислений в многослойных соматотопически организованных машинах».

## 6.2. КОМПЛЕКСЫ ВЫХОДНЫХ ПРИЗНАКОВ

Ранее (особенно в гл. 5) мы уже отмечали, что спинной мозг организован таким образом, что обычные наборы стимулов, которые он получает из высших центров (например, из ствола мозга и мотосенсорной коры), вызывают не подергивания отдельных мышц, а координированное движение, в которое может быть вовлечено несколько мышц, как станет ясным, если попытаться пошевелить только одним средним пальцем ноги. Сенсорные признаки, о которых уже говорилось в разд. 2.4, дополняют двигательные признаки, экономно описывающие объекты в терминах наших возможных взаимодействий с ними. Мы отмечали также (например, говоря о вычислительном устройстве для управления движением в разд. 5.5); что каждая мышца состоит из целой популяции мышечных волокон; поэтому в крупномасштабных движениях (в отличие, например, от тонких движений пальцев у человека) участвует целая популяция мотонейронов. Тогда в соответствии с нашими представлениями о децентрализованности восприятия мы можем предположить, что распознавание текущей обстановки предполагает такое возбуждение коры (это утверждение остается пока спекулятивным), которое, если бы оно передалось спинномозговым центрам, привело бы к целому ряду попыток взаимодействия организма с окружающей средой, причем каждая из этих попыток более или менее соответствовала бы данной среде. Поэтому одна из центральных задач «синтеза» нервной системы — устранение избыточности потенциальных команд, обеспечивающее в случае взаимной несовместимости конкурентных структур поведения проявление в каждый момент времени лишь одной из них и притом той, которая больше всего подходит к создавшейся для организма ситуации. В гл. 7 мы познакоимся с двумя возможными механизмами устранения такой избыточности.

Мы договорились выше рассматривать многие уровни мозга как многослойное вычислительное устройство, в котором положение на слое определяет пространственное расположение источника стимуляции, способного возбудить клетки в этом участке слоя. Предположим поэтому, что и в «выходных структурах» мозга положение на слое определяет, в какой точке пространства произошло бы взаимодействие, если бы спинальные центры могли «реализовать» поведение, управляемое данным участком. Заметим, что, поскольку одно и то же движение может быть вызвано сенсорной стимуляцией многих различных типов, у некоторых клеток «двигательных слоев» могут быть широчайшие «рецептивные поля», если классифицировать их по типу входов, способных воздействовать на их активность. Поэтому мы различаем (рис. 103<sup>1</sup>): 1) «сенсорные слои», в которых состояние внешней среды закодировано в виде совокупности определенных признаков и координат той части пространства, к которой они относятся, а дешифровка информации осуществляется с помощью нескольких слоев предварительной обработки (см. разд. 2.4) картины возбуждения рецепторов под влиянием внешних стимулов и 2) «двигательные слои», в которых состояние внешней среды закодировано в виде совокупности определенных «выходных признаков» или «двигательных подпрограмм» и координат той части пространства, в которой они подвергнутся преобразованию, а дешифровка информации и ее преобразование в координированные движения мышц происходят путем их обработки в одном-двух слоях нейронов мотосенсорной коры и спинного мозга. Что касается областей, лежащих между «сенсорными» и «двигательными слоями», то очевидно, что необходимость многосторонней интеграции данных в процессе планирования и других подобных операций исключает возможность столь строгой соматотопичности. Однако неизбежная диффузность проекций еще не означает их неупорядоченности (само вычислительное устройство и не соматотопично, и не хаотично), даже если на сегодня мы не располагаем знаниями, которые бы дали возможность разглядеть законо-

<sup>1</sup> Отметим четыре возможности уточнить эту схему: 1) включить в нее контуры обратной связи, в результате чего, например, механизмы устранения избыточности потенциальных команд смогут заставлять рецепторы добывать нужные данные; 2) попытаться показать, как некоторые функции, разделенные на этой схеме, могут переплетаться в различных структурах мозга; 3) включить в нее систему поощрений, первоначально управляемую генетически «запамятными» механизмами, которая может влиять на поведение и на выбор; 4) внести дополнительные контуры, показывающие, как ретикулярная формация может (согласно гипотезе, изложенной в разд. 7.1) воздействовать на общее направление выбора вида действий, закладывая тем самым фундамент для функционирования более тонких механизмов устранения избыточности потенциальных команд, намеченных в настоящей схеме.

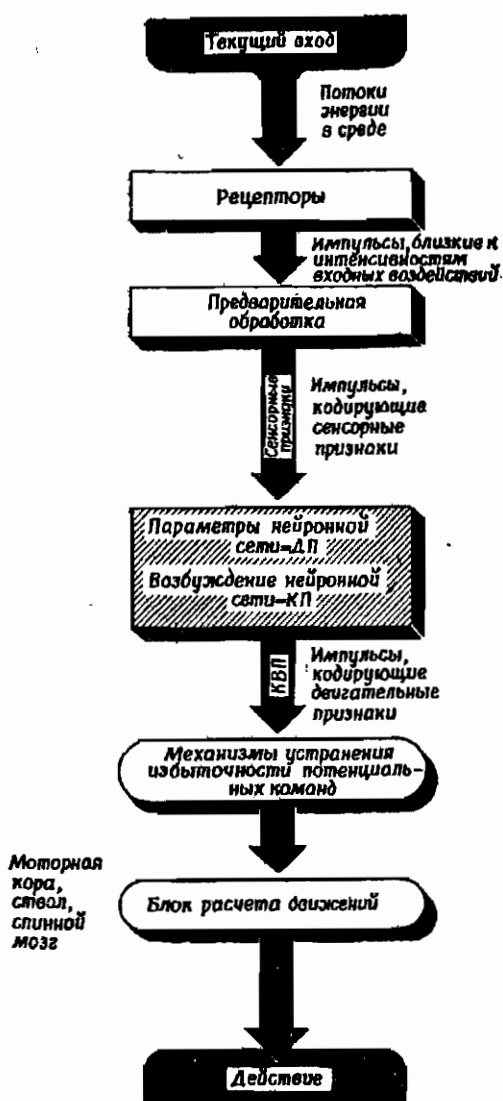


Рис. 103. Грубая блок-схема, напоминающая нам о функциях, участвующих в установлении взаимосвязи между прошлыми и настоящими входами, с одной стороны, и настоящим выходом — с другой (ср. с фиг. 109 и 117).



мерные структуры во взаимосвязях, скажем, лобной коры или миндалины.

Мир состоит из разного рода объектов, и именно с объектами (или с их поведенческими признаками, или с группами объектов) нам приходится иметь дело. Поэтому, если мы хотим выжить в мире, в котором мы движемся относительно объектов, а объекты движутся относительно нас (см. разд. 5.5), наш мозг должен быть устроен таким образом, чтобы признаки, активированные стимулами от данного объекта, не только сохраняли активность до тех пор, пока этот объект остается важной частью среды, но и изменялись в соответствии с движением объекта относительно либо тех эффекторов, с помощью которых мы собираемся с ним взаимодействовать, либо тех рецепторов, с помощью которых мы регистрируем результаты этого взаимодействия.

Последнее замечание станет более понятным, если мы сравним один из способов представления объектов в вычислительной машине с тем, как на основании опытов по исследованию реакции человека на вид вращающихся предметов можно представить себе характер аналогичного кодирования в биологических системах.

Прежде всего рассмотрим вкратце программу для вычислительной машины, предназначенную для ответов на вопросы, и противопоставим ей другой, по-видимому, более естественный с биологической точки зрения, гипотетический подход. Итак, как составить программу для вычислительной машины, которая могла бы отвечать на вопросы типа «Мужчина ли президент Смит?», если в ее память введены различные кодированные высказывания о политической жизни США, и в частности о президенте Смите. Одно из таких высказываний может прямо утверждать: «Президент Смит — мужчина», и тогда машине остается лишь отыскать это утверждение, перебрав содержание своей памяти, после чего она сможет выпечатать: «Да, президент Смит — мужчина». Если же в памяти машины не содержится такого высказывания, то для получения ответа ей придется скомбинировать ответ из нескольких фактов, хранящихся в памяти. Например, там может найтись высказывание «Смит — президент» и «Все президенты были мужчинами». Найдя эти утверждения, машина сможет чисто формальным образом построить из них необходимый вывод: «И следовательно, президент Смит — мужчина», напечатав после этого ответ «Да».

В противовес такому чисто формальному подходу, который на сегодняшний день преобладает в работах по искусственному интеллекту, можно было бы сконструировать машину, которая использует вопрос «Мужчина ли президент Смит?» не для того, чтобы отыскивать фразы, относящиеся к политике и к прези-

денту Смигу, и, комбинируя их, получать ответ, а использует имя «Президент Смит» для того, чтобы извлечь из памяти его фотографию, а затем найти программу распознавания образов, способную отличать фотографии мужчин от фотографий женщин, и поставить перед ней вопрос «Мужчина ли это?» Первый из намеченных подходов является синтаксическим, а второй — семантическим. И, по-видимому, человек, решая подобные задачи, использует оба эти подхода, а также много других.

Вводить в память картинку в виде двумерной матрицы слов, где каждое слово определяет интенсивность освещения соответствующей точки на картинке, а затем обрабатывать ее на нынешних вычислительных машинах, умеющих одновременно оперировать лишь с небольшим числом слов, — такой подход к задаче получения ответов на вопросы с помощью ЭВМ может оказаться весьма неэффективным. Однако, обратившись к мозгу, мы найдем в нем систему нейронов с практически трехмерным распределением функций, реагирующую на зрительное возбуждение. И так как в мозгу все клетки все время активны (в отличие от современных машин, в которых большая часть памяти совершенно пассивна), представляется вероятным, что мозг человека действительно может отвечать на такие вопросы, восстанавливая некоторое подобие пространственной нейронной структуры с высокой степенью распараллеливания на достаточно высоких уровнях нервной системы между входными путями и нейронами, несущими команды к мышцам, а затем уж обрабатывает эту возбужденную структуру точно так же, как если бы она была вызвана зрительным стимулом. Впрочем, я хотел бы подчеркнуть, что такая возбужденная структура содержит входную информацию в закодированном виде, а никак не в виде простой «реставрации» зрительного входа. К этому замечанию мы еще вернемся в разд. 6.4, обсуждая голографическую метафору.

Серия опытов Шепарда и Метцлера дает нам некоторые сведения о том, каким образом человек различает разные виды внутренних представлений. Шепард предъявлял испытуемым объемные изображения объектов, которые можно сложить из кубиков (рис. 104). Испытуемому каждый раз показывали два объекта, которые были либо одинаковыми, либо представляли собой зеркальные отображения один другого. Если обе картинки изображали один и тот же объект, то одну из них получали из другой, как бы вращая объект либо в плоскости рисунка, либо вокруг оси, перпендикулярной этой плоскости. От испытуемого требовалось нажать одну из двух кнопок в зависимости от того, считал ли он, что на рисунках изображен один и тот же предмет, или нет.

Если подойти к этой задаче с позиций обработки вербальных описаний образов, то нам придется сначала генерировать описания типа «Здесь кубик, от него под таким-то углом отходит еще один, затем два прямых угла...» и затем снабдить каждое такое описание данными, указывающими на ориентацию описываемого объекта в пространстве. Если показать такой системе две картинки, то она проанализирует их, получит в результате

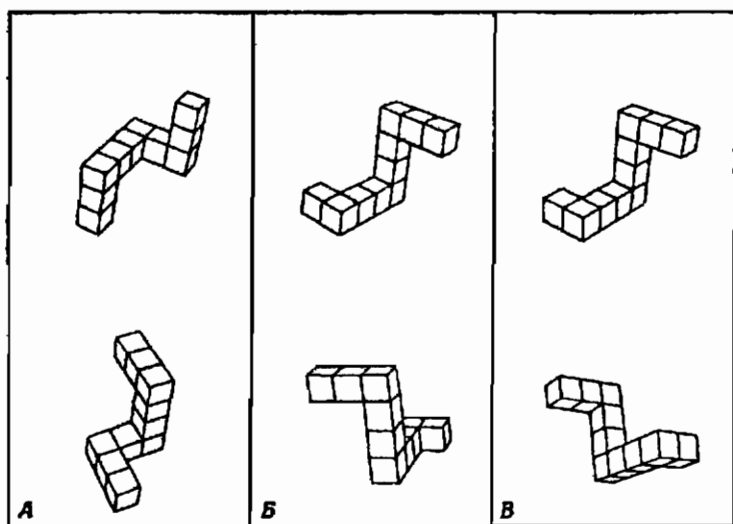


Рис. 104. Три примера (А — В) стимулов, использованных Шепардом в своих опытах.

Каждый объект изображен в двух видах, причем второе изображение получено в результате вращения либо самого объекта, либо его зеркального отображения.

такое описание, отбросит указания об ориентации и сразу приступит к проверке того, одинаковы эти описания или нет.

Другой подход состоит в том, чтобы, воспользовавшись двумерными картинками, создать в мозгу такую же картину возбуждения нейронов, какая получилась бы при разглядывании трехмерного объекта. В процессе реальных взаимодействий с трехмерными объектами мы привыкли поворачивать их, получая при этом их различные двумерные проекции. И можно предположить, что, поглядев на одну из таких двумерных проекций и восстановив «в уме» нейронное представление трехмерного объекта, мы окажемся в состоянии обеспечить нейронный эквивалент вращения объекта. (Не следует представлять весь этот процесс, хотя избежать этого трудно, слишком упрощенно и считать, что в мозгу строится объект из маленьких кубиков,

который затем вращается, ведь мы говорим сейчас не о строго геометрических, а о функциональных соотношениях. Мы лишь хотим сказать, что в результате внутренних процессов в мозгу происходит преобразование картины возбуждения нейронов, родственное тому, которое было бы вызвано поворачиванием находящегося перед нами реального объекта. Мы уже допускали возможность таких операций, когда говорили о следящей составляющей в схеме на рис. 98.) Таким образом, мы можем представить себе, что испытуемый Шепарда вращает образ одного из показанных ему объектов и, накладывая полученный «мысленный образ» на образ другой картинки, решает, согласуются ли эти образы между собой или нет.

Испытуемые утверждают, что они действуют именно таким образом. При первых попытках они стараются проделать это слишком быстро и говорят, что к тому времени, когда они мысленно повернули объект, он «разваливается», они забывают, как он был устроен «на дальнем конце», и его приходится поворачивать снова. Но стоит им почувствовать, что они обучились делать это «с нужной скоростью», т. е. не забывают структуру объекта во время мысленного его вращения, как они начинают решать поставленную задачу безошибочно. Однако такой интроспективный подход уже не раз приводил к ошибочным результатам. Где же гарантия, что на этот раз он окажется надежным? В ответ на такое возражение Шепард решил измерять время реакции. Он рассуждал следующим образом. Если используется вербальный подход, то угловое смещение одного изображения относительно другого не должно сказываться на времени, нужном испытуемому для ответа. Если же испытуемый мысленно вращает картинку, то каждые новые  $10^\circ$  поворота должны добавлять какую-то определенную величину к суммарной задержке между моментом показа двух проекций и ответом испытуемого. Выяснилось, что между необходимым углом поворота изображения и числом секунд, затраченных испытуемым на обдумывание ответа, действительно имеется строго линейная зависимость, а это, по-видимому, подтверждает реальность «мысленного вращения изображения». Шепард установил, например, что он сам может поворачивать мысленный образ со скоростью  $62,6^\circ$  в секунду.

Описанный опыт служит примером интересных попыток разобраться в том, каким представляется нам внешний мир в нашем мозгу. Эволюция человека не готовила его к существованию в статичном двумерном мире. Мы перемещаемся в нашем мире, мы передвигаем и поворачиваем различные объекты, мы подходим к ним с разных сторон. И для того чтобы функционировать надлежащим образом, нам нужно уметь не только классифицировать объекты, но и соотносить их с собой,

определять, где они расположены, понимать, как нам нужно передвинуть их или переместиться самим, чтобы надлежащим образом привязать эти объекты к эталонной системе координат, детерминированной нашим собственным телом. Именно поэтому столь важна мысль о том, что в мозгу имеются возможности не только для классификации или вербального описания, но и для воображаемого перемещения объектов относительно нашего тела или перемещения нас самих относительно этих объектов. Если же добавить к этому, что мозг тесно связан со всеми мышцами, в определенном смысле накладывающими на нас естественную систему координат, то мы увидим, что для определения поворота недостаточно, чтобы где-то в мозгу было записано соответствующее число. Это число должно быть, так сказать, всегда наготове, чтобы в любой момент привести в действие необходимые мышцы. Гвоздь опыта Шепарда заключается в том, что, измеряя время реакции испытуемых, он получил информацию, которую нельзя было получить лишь на основании того, верно или неверно они отвечали на вопросы. Обнаружив изящную линейную зависимость между необходимым углом вращения изображения и временем, затрачиваемым на выяснение разницы между объектами, Шепард позволил нам увидеть, на каких принципах основано хранение информации в мозгу. И одна из главных целей нашей теории мозга состоит в том, чтобы заставить морфологов и физиологов серьезно заняться поиском нейронных механизмов, обеспечивающих возможность подобного хранения.

Займемся еще одной группой данных, касающихся стимуляции мозга больных эпилепсией и указывающих на то, что сама организация мозга обеспечивает содержательное взаимодействие с внешним миром.

Приступая к операциям на мозге у больного эпилепсией, хирург должен представлять себе расположение различных областей мозга, с тем чтобы при удалении очага раздражения, вызывающего приступы эпилепсии, не повредить какую-либо жизненно важную структуру. Он раздражает электрическим током небольшие участки мозга и наблюдает реакции больного с целью выяснить, связан ли данный участок с управлением движениями руки, или маленького пальца ноги, или речи, или с чем-либо еще. Ведь если, например, в результате операции больной начнет слегка прихрамывать на левую ногу, то он, возможно, с радостью пойдет на такой компромисс; если же он рискует потерять речь, то вряд ли он согласится на операцию. Некоторые больные рассказывают, что при раздражении мозга они вновь «переживают» те или иные яркие эпизоды своей жизни. К сожалению, некоторые ученые считают это доказательством того, что в нашем мозгу хранится память обо всем, про-

исходившем с нами в прошлом, и что к любому такому событию можно найти доступ, если достаточно постараться. Однако это предположение нелепо по многим причинам. Во-первых, в большинстве случаев мы не можем быть уверены, что больной говорит о действительных воспоминаниях. Ведь если его мозг создает какую-то конструкцию из «ингредиентов» прошлого опыта, то эта конструкция покажется ему похожей на что-то, что с ним уже случалось, хотя именно данной комбинации в прошлом могло и не быть. Во-вторых, нет никаких оснований рассматривать результат этих опытов как свидетельство в пользу «фотографической гипотезы», т. е. считать, что больной видит точно такую сцену, какую он видел в первый раз; вполне возможно, что конструкция, образовавшаяся в мозгу в результате раздражения, относится к достаточно высокому уровню нейронной активности, весьма далекой от реального зрительного входа. Наконец, подобные явления отмечались только у больных эпилепсией. Следует, однако, отметить, что, по их утверждению, такое «переживание» коренным образом отличается от «обычного воспоминания». Поэтому описанные факты свидетельствуют скорее о таком устройстве мозга, которое, в случае, если нам удастся проникнуть в достаточно высоколежащие центры и вызвать там искусственное раздражение, позволяет получить не группу необработанных фактов, поступивших на зрительный вход (скажем, не случайное сочетание света и тени), а нечто вроде осознанного восприятия объектов. Вводя электрод в мозг наугад и раздражая мозг электрическим током, мы вызываем в одной из нейронных сетей временную активность. И нет ничего удивительного в том, что такая временная активность часто приводит к тому, для чего эта сеть и предназначена, а именно к осознанному восприятию, а не к появлению на зрительном поле случайного рисунка световых пятен. (Быть может, это происходит не только у эпилептиков?) Нам кажется, что именно благодаря способности мозга освобождаться от избыточности потенциальных команд случайный набор выходных признаков преобразуется в комплекс активности, связанной с ярким и более или менее реальным субъективным переживанием.

Итак, одним из центральных понятий нашей модели становится комплекс выходных признаков (КВП), или кодовое описание возможностей взаимодействия с объектом, содержащее набор признаков, необходимых организму для осуществления этого взаимодействия. (КВП представляет собой попытку воплотить понятие «диапозитив» из разд. 4.1 в несколько менее метафорической форме.) В то время как у низших животных взаимосвязь между сенсорными и двигательными признаками может быть в основном прямой и врожденной (ср. с функциями

области тектума лягушки, разд. 7.2), у многих других форм существует дополнительный механизм, позволяющий совершенствовать эту взаимосвязь с учетом прошлого опыта животного. Таким образом, пока мы не делаем различия между *генетически детерминированными* механизмами и теми, которые образуются в процессе *обучения*, поскольку в процессе восприятия участвуют как те, так и другие, *совместно* создавая у животного долгосрочную модель окружающего мира.

Тем самым мы хотим подчеркнуть, что мы рассматриваем восприятие как представление окружающей обстановки в терминах открывающихся перед нами двигательных возможностей, а не в виде «маленькой копии мира», подобной фотографии.

Итак, мы выдвигаем гипотезу о том, что ДП (долговременная память) находится в нейронной сети, расположенной между сенсорными и двигательными слоями. Она сосредоточена в значенных параметрах этой сети, позволяющей осуществлять размещение комплекса сенсорных признаков на элементы и преобразовывать их в набор КВП с данными о местоположении каждого объекта, что позволяет организовать взаимодействие с объектами, описываемыми теми сенсорными признаками, из которых были получены эти КВП.

Повторим еще раз, что такая система КВП, активированная в любой момент времени, очень часто содержит гораздо больше подпрограмм деятельности, чем организм может реализовать в этом момент; поэтому значительная часть нейронных механизмов должна заниматься тем, чтобы в каждый момент времени сосредоточить усилия организма лишь на одном наборе совместимых действий.

Кроме того, мы предполагаем, что КП (кратковременная память) системы *охватывает всю текущую активность КВП*. ДП обеспечивает организму возможность генерировать КВП по неполной (а возможно, и неоднозначной) сенсорной информации об объектах, тогда как КП обеспечивает сохранение соответствующих КВП в активном состоянии (хотя они и могут содержать лишь достаточно неопределенный контекст, на фоне которого происходит восприятие новых объектов), а не поставляет другие КВП, соответствующие лишь воспринимаемому в данный момент объекту. В разд. 4.4 мы уже высказали предположение (косвенно подтверждающееся данными Шепарда), что мозг располагает возможностью непрерывно *переадресовывать* или *видоизменять* КВП, с тем чтобы их расположение все время соответствовало представляемым ими объектам, даже если такая переадресовка относительна и связана с изменением направления входных (сенсорных) и выходных (двигательных) путей. Так, если мы кружимся вокруг стола, движения руки, необхо-

димые для того, чтобы взять лежащий на столе карандаш, непрерывно меняются, а если мы отойдем от стола, то к выходным признакам карандаша добавятся еще и такие «фоновые признаки», как необходимость вернуться к столу для того, чтобы получить возможность добраться до карандаша. «Конечно» (вот слово, вызывающее обычно тысячи вопросов!), в сознание взрослого человека такие ориентированные на действие признаки попадают лишь в вербальной форме (например: «Это находится в двух метрах от меня»). Поэтому нервная сеть должна быть устроена таким образом, чтобы в общем случае было легче обнаружить согласованность возбужденного КВП и комплекса сенсорных признаков, несмотря на несоответствие в расположении («А вы переместились»), и переадресовать КВП

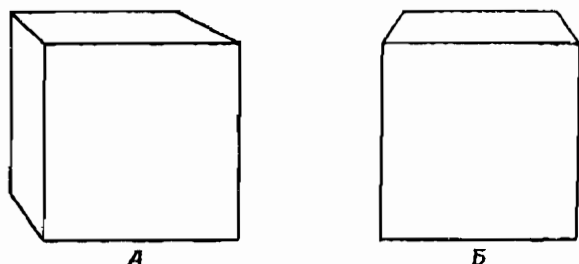


Рис. 105. Два изображения, которые нельзя перевести друг в друга движениями в плоскости.

У одного 7 вершин и 9 ребер (А), а у другого 6 вершин и 7 ребер (Б). Однако это расхождение по сенсорным признакам отбрасывается, как только мы распознаем, что и то и другое — куб.

нужным образом, чем с помощью ДП заново генерировать весь КВП («Кто вы?»), не имеющий прямого отношения к текущим входным признакам. Иными словами, КП и внимание «переплетены» друг с другом: мы обращаем внимание лишь на то, что меняется (или на то, для чего мы считаем изменение неизбежным и важным), и это отражается на всех слоях нервной системы и на всех процессах обработки сенсорной информации.

Подчеркнем поэтому еще раз, что КВП — это картина нейронного возбуждения, отвечающая некоему объекту с точки зрения одного или нескольких возможных взаимодействий организма с этим объектом. (Один и тот же объект может вызывать различные КВП в разных ситуациях. Так, кошка может вызвать выходной признак «гладить» в одном случае и «прогнать» — в другом. Можно сказать, что преобразование от объекта через посредство сенсорных признаков к КВП приводит к политетической классификации.) Статус КП как совокупности данных о том, что можно делать с окружающей сре-



дой, можно считать эквивалентным внутренней модели среды, близкой нам с точки зрения пространства, времени и значимости для нас. Очевидно, что она гораздо полезнее для организма, чем простое копирование текущей сенсорной стимуляции.

Таким образом, КВП — это не просто копия в (случае зрительного восприятия) некоторой двумерной картинки. Например, на рис. 105 показаны два изображения куба, создающие различные наборы сенсорных признаков, но которые могут тем не менее вызывать одни и те же КВП, связанные, например (может быть, наряду со многим другим), с возможностью взять этот куб в руку, с точностью до различий в параметрах, отражающих разницу в величине угла между большим пальцем и ладонью при попытке взять в руку настоящий куб, который бы соответствовал одной из этих двумерных проекций.

Опираясь на все эти рассуждения, мы можем теперь перейти к описанию схемы, позволяющей преобразовывать как сенсорную входную информацию, так и моторный выход уже после КВП, с тем чтобы обеспечить плавное взаимодействие организма с окружающим его миром.

### 6.3. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И СОМАТОТОПИЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ

Теперь наша основная задача состоит в том, чтобы в схему на рис. 103 «ввести» соматотопию, привязав ее к нашим соображениям о распределенной системе управления движением (разд. 5.5) и показав, где могут производиться некоторые преобразования комплексов сенсорных признаков и наборов КВП, прошедших предварительную переработку, с тем чтобы обеспечить надежное взаимодействие организма с окружающим миром.

Прежде всего следует подчеркнуть, что имеется достаточно оснований допустить наличие у млекопитающих двух (в высшей степени независимых) зрительных систем, из которых одна связана с корой, а другая — со средним мозгом. Различие между этими системами становится понятным, если вспомнить опыты Шнейдера [227] на хомяках: когда у хомяка разрушают зрительную кору, не затрагивая верхнее двухолмие, то он теряет способность различать даже простейшие зрительные образы, например не отличает квадрат от креста, хотя по-прежнему может ориентироваться на звук или на движущийся предмет. Другими словами (ср. противопоставление кошки и лягушки в разд. 2.4), создается впечатление, что хомяк без зрительной коры все еще может реагировать на простейшие локальные признаки, особенно если они связаны с движением, но не способен интегрировать их в глобальные детерминанты КВП. И наоборот, если у хомяка удалить верхнее двухолмие, не затрагивая зритель-

ной коры, то он различает образы, но не в состоянии использовать обнаруженные различия для ориентации. На основании этого последнего наблюдения многие исследователи делали вывод, что хомяки с ненарушенной зрительной корой и удаленным верхним двухолмием просто слепы: когда такого хомяка помещают в установку, изображенную на рис. 106, то он вроде

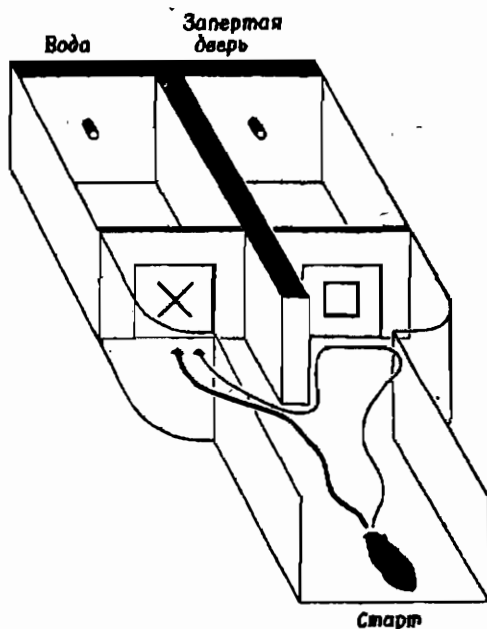


Рис. 106. Интактный хомяк (траектория его движения показана жирной линией) может ориентироваться по зрительным стимулам.

После удаления верхнего двухолмия хомяк, по-видимому, не может использовать зрительные признаки для ориентации, но по-прежнему способен различать их; об этом свидетельствует траектория его движения (тонкая линия), показывая, что животное руководствуется тактильным ощущением, но толкает только ту дверь, на которой имеется знак, ассоциирующийся у него с вознаграждением.

бы с равной вероятностью направляется как в тот отсек, где за дверью (помеченной квадратом) его не ждет никакого вознаграждения, так и в тот отсек, где за дверью (помеченной крестом) он получит вознаграждение (воду). Однако Шнейдер обратил внимание на то, что, хотя животное и может войти в «не тот» отсек, оно научается *не входить* в «не те» двери и, дойдя до них, поворачивает назад. (Шнейдер исключил возможность близорукости животных, поставив стеклянные двери и поместив опознавательные знаки на некотором расстоянии за ними. Это не мешало животному научиться распознавать их.) Полученные данные свидетельствуют о том, что животное

с интактной корой, но без верхнего двуххолмия способно различать образы, но не в состоянии «привязать» их к месту. Оказалось, что такое животное не умеет ориентироваться и по «локальным признакам»: если ему предъявляют звук или движущийся предмет, оно «застывает» на месте, а не поворачивается к источнику стимуляции, как это сделало бы животное, не лишенное верхнего двуххолмия.

С учетом всех этих соображений перейдем к рис. 107, где приведена грубая блок-схема системы, содержащей многие аспекты «стратегий млекопитающих», и в частности все только что высказанные соображения и многое другое, о чем мы еще поговорим ниже, рассматривая эту схему во всех ее подробностях. Конечно, эти же самые функции могут быть реализованы и многими другими структурами. Кроме того, мы увидим, что, несмотря на многочисленность разных блоков в нашей системе, она тем не менее отражает организацию деенправленного восприятия лишь в самом первом приближении. Мы надеемся, однако, что, изучая эту схему, мы сможем вплотную подойти к следующему, более совершенному уровню рассмотрения восприятия и, возможно, выдвинем новые гипотезы, которые помогут нам связать отдельные функции восприятия с соответствующими структурами мозга.

Можно считать, что объекты реального мира (1) оказывают влияние на потоки энергии в окружающей среде. Различные системы рецепторов животного (2) регистрируют проекции этих потоков на различные сенсорные модальности и различные участки пространства. Зрительные рецепторы, тактильные рецепторы рук и т. п. можно перемещать относительно остальных частей тела, и эти перемещения частично соответствуют влиянию, которое оказывает на эффекторы блок 4 (см. ниже). Входные сигналы, полученные с помощью рецепторов, проецируются в две основные системы: одну в среднем мозгу (3) и другую — в коре полушарий (5). Попадая в средний мозг, эти сигналы подвергаются локальной (поточечной) предварительной переработке и попадают в механизм того же типа, что и показанный на рис. 101. Области, получающие стимуляцию, которая не совпадает с ожидаемой, вызывают движения ориентации, для чего в работу включаются моторные структуры (4). Питтс и Мак-Каллок [202], описавшие эту схему, считают, что именно таким образом глаз приводит рассматриваемый объект в «стандартное положение» на зрительной коре, где осуществляется распознавание, и таким образом действует через эффекторы, обеспечивая правильное расположение в пространстве входного сигнала, поступающего в кору.

Переходя на кортикальные пути, сенсорные сигналы попадают в другой механизм типа показанного на рис. 101 (5);

этот механизм пропускает в селектор КВП (блок распознавания образов, генератор гипотез об объекте, б), занимающийся пространственным анализом картины возбуждения, лишь те участки входного образа, которые подвержены изменениям во времени, сильно отклоняющим их от прогноза, основанного на учете собственного движения организма или подмеченного движения объектов. Эта схема работает потому, что те же области непредвиденных изменений (с помощью механизмов ориентации 3 и 4) заставляют, как уже отмечалось выше, рецепторную поверхность поворачиваться поочередно к каждому из этих источников новой информации. Селектор КВП получает также сведения о том, к чему приводят текущие собственные движения, получая их из блока 7, в результате чего выбор КВП согласуется с текущей активностью. Решения, принимаемые с оглядкой на «цели организма» (увы, «флогистон» наших нынешних рассуждений), позволяют выбрать один из потенциальных КВП, генерируемых блоком б. Блок вычисления стратегий (8) реализует затем выбранный КВП, а управление тонкими движениями, накладываемыми на макродвижения, осуществляется в рамках естественной системы координат, детерминируемой нашим телом и поддерживаемой средним мозгом.

Приняв такую схему, мы можем истолковать результаты опытов Шнейдера с хомяками как свидетельство того, что при разрушении зрительной коры (что соответствует отключению блока 5 нашей схемы) животное сохраняет способность ориентироваться в пространстве (способность локализации), но не способно к распознаванию образов, а при разрушении верхнего двухолмия (блок 3 на нашей схеме) животное способно распознавать образы, если его взгляд случайно упадет на объект именно так, как это необходимо для получения стандартного возбуждения КВП, но не способно к необходимым ориентирующим движениям.

Представьте себе, что человеку показывают проекцию диапозитива незнакомой ему сцены, причем диапозитив вставлен в проектор, скажем, «вверх ногами». В этом случае испытуемому придется провести весьма трудоемкий анализ картины. Прежде всего ему нужно понять, что все, что он видит, перевернуто «вверх ногами». Затем ему придется либо изменить положение своих рецепторов (2), например встав на голову, либо произвести сдвиг в выходной моторной проекции (4); это будет осуществлено преобразователем (7), который перестроит параметры селектора КВП (6). Затем придется осуществить и другие преобразования, направленные на то, чтобы привести изображение к стандартной форме. Все это вызовет такое изменение положения рецепторов, моторных проекций (и, возможно, положения эффекторов) и функций предварительной

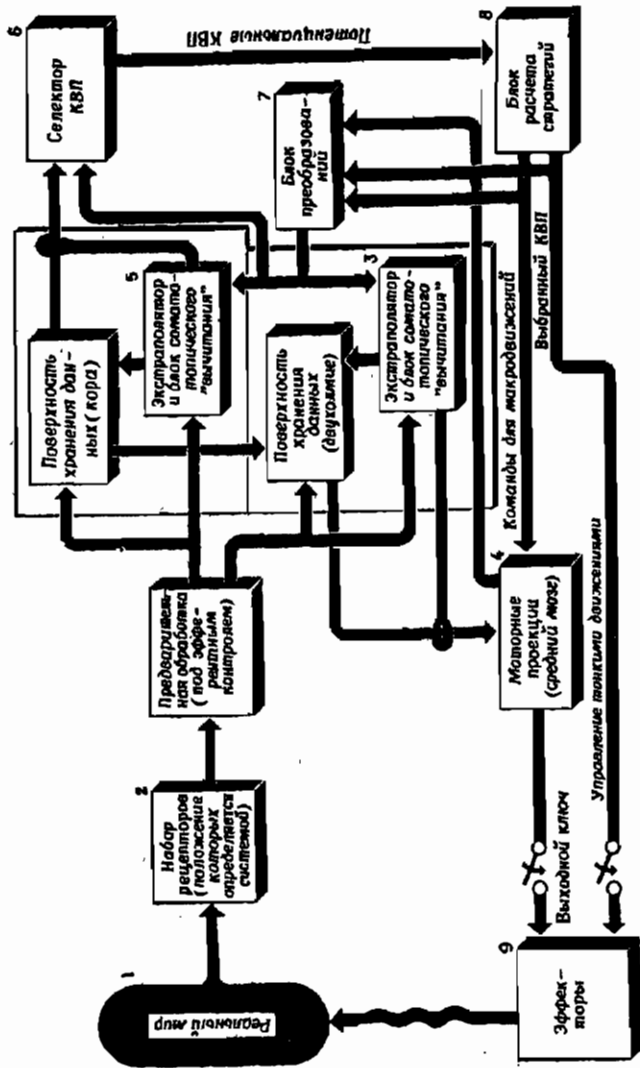


Рис. 107. Предположительная блок-схема взаимодействия «двух зрительных систем» среднего мозга (8) и коры головного мозга (5), обеспечивающая сохранение правильных взаимосвязей между организмом и внешним миром.



переработки, что система восприятия «подстроится» к той гипотезе о КВП, которая проверяется в настоящее время. А это значит, что блоки, которые мы столь легкомысленно окрестили «селектором КВП» (6) и «блоком вычисления стратегий» (8), должны быть весьма сложны и тесно связаны с другими частями системы.

Сосредоточим теперь наше внимание на том аспекте восприятия, который за недостатком места не включен в рис. 107. Для этого мы обратимся к рис. 108, на котором приведена схема, обобщающая схему Питтса — Мак-Каллока [202] (рис. 96).

Для того чтобы облегчить переход от рис. 107 к рис. 108, заметим, что для простоты блок 5 на рис. 108 опущен и что блоки 3 и 4, а также преобразователь (7) считаются блоком вычисления ошибки, а их воздействие на селектор КВП показано линией, соединяющей на рис. 108 блок вычисления моторных преобразований (12) с блоком вычисления ошибки (3, 4, 7). На схеме 108 появился еще и блок супраспинального управления (11), соответствующий многоэтапным преобразованиям КВП в сигналы управления отдельными мышечными волокнами.

Другими словами, на схеме 108 мы осуществили декомпозицию механизмов формирования и выбора КВП на подсистемы, в явном виде участвующих в поиске соответствующих преобразований и в управлении движением с помощью параметризации КВП, отделив их от остальных блоков схемы. Одновременно мы замаскировали на этой схеме анатомическую обособленность двух различных путей, показанных на рис. 107. Рассматривая схему 108, нужно иметь в виду следующее. Схема 107 в неявном виде предполагает, что система всегда как бы воспринимает изображение в том смысле, что КВП, вызывающий решение типа «Обойдем-ка вокруг этого предмета, и, возможно, нам удастся понять, что же это такое», можно расценивать как восприятие объекта, как чего-то такого, вокруг чего можно ходить. На рис. 108 эти первые поисковые фазы настройки движения и восприятия выделены и в явном виде объясняется, как эти процессы приводят к более «полному» восприятию объекта («Ах, это же вверх ногами, это фотография памятника Вашингтону»), позволяющего назвать его.

Реакцию ориентации не следует при этом рассматривать как один из входных признаков объекта, хотя она и оказывает влияние на пространственное расположение КВП относительно соматотопической системы координат КП. Ориентация *делает возможным* формирование тонких признаков КВП и, следовательно, предшествует такому формированию или по крайней мере его уточнению. Для животных с фовеальным зрением,

т. е. для тех, в глазу которых имеется центральная ямка (fovea), происходящее в коре «распознавание образов» можно считать организованным по принципу «распределения времени» (если вновь прибегнуть к метафоре, заимствованной из вычислительной техники); механизмы ориентации и необходимая экстраполяция, осуществляемая в коре, определяют местоположение блоков «распознавания образов», как если бы выяснение того, что же здесь имеется, требовало более сложной «обработки», чем обнаружение несоответствия с ожиданием. Таким образом, человек оказывается где-то посредине между лягушкой, у которой совсем нет центральной ямки и обработка зрительного входа осуществляется равномерно и в относительно ограниченных масштабах, и неким «сверхчеловеком», у которого весь глаз — сплошная центральная ямка и который обрабатывает равномерно и весьма совершенным образом огромное зрительное поле.

Положение и ориентация объекта относительно рецепторных поверхностей организма частично определяют, какие потоки энергии из внешней среды достигнут этих поверхностей. Назовем некоторое положение объекта стандартным и обозначим его через  $x$ . В любой момент времени  $t$  его положение в абсолютном пространстве может рассматриваться как результат его переноса из  $x$  и соответствующего вращения. Если обозначить суммарный эффект преобразований через  $S_e(t)$ , то возникшее распределение вещества в пространстве можно будет описать выражением  $S_e(t) \cdot x$ . Положение рецепторных поверхностей в момент времени  $t$  обеспечит проецирование этого распределения, которое можно описать оператором  $S_r(t)$ , так что нейронное представление объекта можно будет рассматривать как некоторую функцию

$$f[S_r(t) \cdot S_e(t) \cdot x]$$

двумерного образа. (Мы говорим сейчас исключительно о зрительных рецепторах, однако с небольшими изменениями все это приложимо и к другим модальностям.)

Конечно, взрослый человек способен мыслить в абстрактных категориях или планировать свои движения «извне», как бы представляя, что он передвигается по карте. Но нам хотелось бы здесь ограничиться рассмотрением основной «эгоцентрической» формы восприятия, при которой организм представляет объекты не в терминах какой-то абсолютной системы пространственных координат, а в зависимости от их положения относительно того, кто их воспринимает, т. е. в терминах системы координат, определяемой тем, насколько далеко может достать его рука, в какую сторону он повернулся лицом, числом шагов



до объекта и т. п. В этом случае размеры объекта будут восприниматься в зависимости от масштаба движений, необходимых для желаемого взаимодействия с объектом, ориентация — от того, насколько нужно повернуть голову для того, чтобы сфокусировать взгляд на объекте, и т. п. Например, можно утверждать, что мы воспринимаем линейки на листе линованной бумаги не только в той мере, в какой мы можем попасть на них кончиком карандаша, но и в той, в какой нам удастся приспособить свой почерк к расстоянию между линейками. Иначе говоря, наша теория должна учитывать еще и преобразование  $S_m(t)$ , приводящее мышечную деятельность к масштабу, соответствующему решаемой задаче.

Учитывая важнейшую роль, которую играет в нашей теории порождение преобразований, обеспечивающих согласование моторного выхода и сенсорного входа, мы в состоянии теперь оценить, насколько важно для нас описанное выше обобщение (см. рис. 96) «принципа однородности конструирования рефлекторных механизмов, обеспечивающих инвариантность относительно произвольной группы  $G$  преобразований входных воздействий», впервые предложенного Питтсом и Мак-Каллоком [202]. Однако если в исходной модели рассматривается лишь возможность преобразования сенсорных признаков (например, возможность вращения зрительной перспективы в плоскости), направленного, скажем, на то, чтобы центрировать сенсорный стимул на зрительном поле, то нас интересуют и преобразования выходных признаков, соответствующие всевозможным перемещениям объекта в пространстве; ведь организму необходимы данные (хотя, как выяснится впоследствии, не все они обязательно должны быть закодированы в нейронной сети) об относительном расположении объектов, если только он собирается взаимодействовать с ними. (Питтс и Мак-Каллок рассматривали случай, когда такое преобразование реализуется движением глаз, но мы допускаем и возможность внутренней «переадресации» возбуждения.) Мы хотели бы, чтобы двигательные возможности организма позволяли осуществлять преобразования, приводящие к такому изменению параметров КВП, в результате которого наши пальцы будут смыкаться вокруг объекта, а не хватать воздух рядом с ним.

Так или иначе, напомним, что в исходной схеме с каждым образом  $\varphi$  связывался некоторый  $n$ -мерный «вектор ошибки»  $E(\varphi)$ , обладавший тем свойством (ниже мы сможем существенно ослабить это требование), что  $E(\varphi) = 0$  тогда и только тогда, когда  $\varphi$  приведено к стандартной форме, и некоторое, зависящее от выбранной меры ошибки  $E(\varphi)$  преобразование  $W$ , позволяющее эту ошибку уменьшить. Другими словами, мы

выбирали для этой схемы такое  $W: R^n \rightarrow G$ , что для всех образцов  $\varphi$

$$\|E[W(E(\varphi)) \cdot \varphi]\| \leq \|E(\varphi)\|,$$

причем это неравенство заменяется на равенство тогда и только тогда, когда  $\varphi$  приведено к стандартной форме.

Мы уже имели случай отметить сходство этой схемы с методом операторов из ОРЗ (общего решателя задач) Ньюэлла, Шоу и Саймона [184] и два важных различия между ними: 1) в ОРЗ предполагается, что число разных «векторов ошибки» или «различий» конечно, 2) оператор  $W_D$ , соответствующий различию  $D$ , не обязательно должен уменьшать это различие. В связи с последним свойством ОРЗ возникает потребность в особой процедуре, известной как эвристический поиск (разд. 4.2); смысл ее состоит в том, чтобы найти последовательность операторов (среди множества по внешнему виду подходящих последовательностей), которая действительно устранит исходное различие. Именно эту, далеко не идеальную, но гораздо более реалистическую ситуацию мы будем иметь в виду, когда прибегнем ниже к эвристическому поиску. Изменение  $W_e(t)$  расположения объекта может быть вызвано как его автономным движением ( $I$ ), так и воздействиями на него моторного аппарата ( $9B$ ). Изменение  $W_r(t)$  расположения набора рецепторов осуществляется связанными с входом эффекторами ( $9A$ ), которые действуют как и в схеме Питтса — Мак-Каллока, на основе вектора ошибок, вычисляемого в соответствующем блоке (3, 4, 7). Аналогично блок вычисления моторных преобразований (12) вырабатывает задания для блока супраспинального управления (11), основываясь на тех же данных блока вычисления ошибки.

Однако, обсуждая работу блока (6), мы наталкиваемся на дополнительные тонкости, в связи с чем возникает своего рода дилемма «курицы и яйца». Трудность здесь состоит в том, что мы не можем решить, какая форма входного образа является стандартной, пока не знаем, что же представляет собой воспринимаемый объект, а в то же время привести воспринимаемый образ к стандартному виду необходимо именно для идентификации этого объекта. Выше мы выдвинули гипотезу о том, что распознавание объекта системой равносильно появлению у нее подходящих (с точки зрения целей организма, определяемых блоком расчета стратегий) КВП, обеспечивающих возможность взаимодействия с объектом. С каждым из таких КВП мы связываем какой-то критерий ошибки: каждый КВП считается пригодным для взаимодействия с объектом, лежащим за данным входным возбуждением, только тогда, когда этот входной образ приведен к такому виду, при котором некоторая

фиксированная компонента  $E^1$  ( в этом и состоит ослабление требований для схемы Питтса — Мак-Каллока, которое мы обещали выше) вектора ошибки достаточно близка к нулю, в этом случае остальные компоненты  $E^2$  вектора ошибки служат параметрами для выполнения соответствующей программы. Таким образом, критерий ошибки должен определяться как текущими целями системы, так и имеющимися у нее оценками того класса объектов, к которому принадлежит правильно распознанный объект.

Селектор КВП (6) выполняет нечто подобное эвристическому поиску, хотя, впрочем, речь здесь идет скорее о поиске критерия ошибки, чем об уменьшении ошибки. Выдвинув гипотезу о том, что адекватный КВП для управления взаимодействием с объектом — это  $P_\alpha$ , этот блок должен сообщить блоку вычисления ошибки (3, 4, 7) критерий точности  $E_\alpha$ ; а последний блок должен сообщить блокам (9A) и (12) значения вектора  $E_\alpha(x, t)$ , используемые в них для коррекции расположения рецепторов  $S_r(t)$  и моторного преобразования  $S_m(t)$ . При этом блок (6) следит за вызванной этим изменением ошибкой и решает, насколько удачен или неудачен текущий выбор  $P_\alpha$ . Предположим, что выбор  $P_\alpha$  по отношению к имеющейся внешней среде достаточно оправдан и что в результате контрольная компонента  $E_\alpha^1(x, t)$  становится достаточно близкой к нулю, что свидетельствует о возможности применения предлагаемой программы  $P_\alpha$ . Понятно, что, как и в процедурах эвристического поиска, нам придется предположить существование некоторого правила, позволяющего судить, в какой момент невозможность свести  $E_\alpha^1$  к нулю должна указать на необходимость поиска новой гипотезы.

Блок расчета стратегий разрешает выполнение некоторого двигательного действия только в том случае, если  $E_\alpha^1(x, t)$  достаточно мало. В этом случае он запускает «интерпретирующую» подпрограмму, определяемую текущим выбором программы  $P_\alpha$  и значениями параметров, задаваемыми остальными компонентами  $E_\alpha^2(x, t)$  вектора ошибки. Основываясь на этой подпрограмме и информации, заключенной в векторе ошибки, блок моторных преобразований (12) определяет необходимую информацию о масштабах  $S_m(t)$ , причем ее адекватность выясняется с помощью контура обратной связи, замыкающегося в блоке вычисления ошибки, и проявляется в сведении  $E_\alpha^1(x, t)$  к нулю. Наконец, блок супраспинального управления (11) интерпретирует «подпрограмму», выбранную для него блоком расчета стратегий (8), используя при этом информацию  $S_m(t)$ , поступающую в него из блока моторных преобразований (12).

Отметим, что описанная схема не требует хранения в нервной системе всей информации о преобразовании  $T$ , как это необходимо для того варианта схемы Питтса — Мак-Каллока, который показан на рис. 96, и допускает движения моторного аппарата, вызывающие изменения относительной проекции входного образа, в связи с чем любые абсолютные преобразования теряют смысл. Например, поворачивая голову так, чтобы все время смотреть на мышь, кошка одновременно настраивает свой моторный аппарат на прыжок. И главное здесь в том, что мозг *не должен* хранить данные о всех возможных абстрактных преобразованиях, а вместо этого выполняет операции, которые обеспечивают взаимосвязи между организмом и объектом, необходимые для их возможного взаимодействия.

#### 6.4. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ МЕТАФОРА

Пытаясь понять, какой структурой должна обладать память, чтобы в ней могли создаваться схемы, подобные рассмотренным в двух последних разделах, мы убедимся в потенциальной полезности голографической метафоры, согласно которой память распределена по всей структуре, а не записана в виде отдельных слов в отдельных ячейках, как в вычислительных машинах. Рассмотрение этой метафоры мы начнем с того, что примем несколько утверждений относительно человеческой памяти.

1. Наша память динамична и соотносена с естественной и определяемой потенциальными действиями системой пространственных координат. Именно благодаря этому мы вспоминаем обстановку в комнате как нечто единое, а не как последовательность несвязанных двумерных перспектив.

2. При некоторых тяжелых поражениях мозга не наблюдается потери памяти (по крайней мере судя по результатам весьма грубых тестов). В то же время локальные повреждения других участков мозга могут иметь весьма серьезные последствия; например, при повреждении гиппокампа человек теряет способность добавлять новую информацию к своей долговременной памяти.

3. В одной и той же области мозга могут фиксироваться сведения о многих разных событиях. (Последнее утверждение кажется правдоподобным, но как проверить его экспериментально?)

На основании всего этого у многих авторов, и в том числе у Прибрама [203], возникла мысль, что этими же свойствами (мы еще раз напоминаем, что для нас это не более чем *метафора*) обладают и *голограммы* — фотографии особого рода, обладающие рядом интересных свойств.

1. Изображение, получаемое с помощью голограмм, трехмерно, и его можно наблюдать с различных сторон.

2. Любая часть голограммы позволяет воспроизвести практически всю картину в отличие от обычной фотографии, на которой изображение строго локализовано, но чем меньше эта часть, тем ниже и разрешающая способность воспроизведения.

3. На одну и ту же голограмму можно записать несколько изображений, а затем воспроизводить их по отдельности.

Для того чтобы понять первые два свойства, представим себе, что мы смотрим через окно на какой-то предмет, находящийся в комнате. Голограмму можно представить как результират «замораживания» световых волн, идущих от этого предмета, в момент, когда они попали в плоскость окна. Мы можем рассматривать предмет под разными углами зрения с тем лишь ограничением, что мы должны находиться за окном. Если часть окна занавесить, то мы по-прежнему сможем видеть через него весь предмет в целом, хотя для того, чтобы сделать это, нам придется двигать глазами, причем тем больше, чем большая часть окна занавешена.

Для того чтобы понять третье свойство, нам понадобится дополнительная информация о технике «замораживания», используемой в голографии. В голографии в качестве освещения используется излучение лазера, а на фотопластинке фиксируется интерференционная картина взаимодействия двух лучей: 1) «эталонного» и 2) отраженного от фотографируемого предмета. После проявления зафиксированное изображение — голограмму — можно «воспроизвести», осветив ее эталонным лучом лазера, который как бы вновь вызывает к жизни световые волны оригинала. Главная же особенность третьего свойства голограмм состоит в том, что если сфотографировать на одну пластинку несколько голограмм, пользуясь для каждой из них разными эталонными лучами, то при освещении этой пластинки одним из таких лучей мы вызовем к жизни только соответствующий фронт волны и, следовательно, воспроизведем только то изображение, которое снималось при освещении этим эталонным лучем, а другие интерференционные картины не проявятся.

Если у нас два объекта, 1 и 2, и мы зафиксировали картину интерференции двух волн, пришедших от одного и от другого, то отраженная волна от каждого из них может служить эталонным лучем для другого. В этом случае отражение от одного предмета может использоваться для освещения голограммы и «воспроизведения» другого объекта, что эквивалентно примитивной ассоциативной памяти: если два объекта фотографировались вместе, то появление одного из них позволяет «вспомнить» другой. (А если воспользоваться так называемыми голо-

граммами Фурье, то первый объект не обязательно располагать точно так, как при съемке. При этом второй объект будет всегда воспроизводиться в одном и том же положении относительно первого. Это свойство голограмм может оказаться очень важным для информационно-поисковых систем. Предположим, что первый объект — это появление какого-то интересующего нас слова, например слова «автомат», а второй объект — это просто световое пятнышко, так что освещение голограммы со словом «автомат» вызывает появление на нем определенным образом расположенного светового пятнышка. Тогда, если осветить голограмму, на которой отображена целая страница текста, световые метки укажут нам, в каких местах текста встречается слово «автомат».)

Сходство трех свойств памяти и трех свойств голограмм наводит на мысль, что подобный подход к изучению мозга, побуждающий нас рассматривать его работу как распространение волны нейронной активности, а не как последовательные вычисления, осуществляемые отдельными нейронами, позволяет далее выдвинуть гипотезу о «замораживании» фронтов волны нейронного возбуждения в «нейронных голограммах», дающих возможность восстановить эту активность каждый раз, когда требуется припомнить соответствующий опыт. «Теневые изображения», вызываемые лучками, близкими к эталонным, могли бы при этом служить чем-то вроде ассоциативной памяти.

Прибрам считает, что нейронные голограммы действительно существуют, и, следовательно, относится к изложенным аналогиям не как к метафоре. Он предполагает, что подобные голограммы возникают в результате интерференции на нейронах картины возбуждения, образовавшейся непосредственно (т. е. в результате возбуждения ближайших участков дендритов), и картины возбуждения, несколько сдвинутой во времени (образовавшейся в результате возбуждения дальних участков дендритов). Прибрам предлагает проверить эту гипотезу, проанализировав математические правила преобразования импульсов в непрерывные потенциалы и наоборот, и выяснив, являются ли эти преобразования голографическими (и, в частности, обратимыми). Он, по-видимому, считает также, что всякое осознанное мышление эквивалентно воспроизведению некоторой голограммы, а это по сути своей еще одна теория о гомункулусе, поскольку если память восстанавливает зрительный вход, то мы вновь вернулись к «объяснению» восприятия в терминах существования маленького человечка, сидящего у пульта управления в голове человека и следящего по приборам за нейронными сообщениями, приходящими с периферии, тем самым мы начнем бесконечную регрессию ко все меньшим и меньшим гомункулусам.

Однако для специалиста по теории мозга в первом свойстве голографии подлинный интерес представляет не трехмерность изображения как таковая, но то, что голография позволяет фиксировать фронт волны, а не статическое сечение, как в обычной фотографии. Второе свойство голографии не должно нас особенно воодушевлять, поскольку аналогичное свойство мозга можно было предвидеть из-за информационной избыточности, обусловленной конвергенцией и дивергенцией нервных путей. В самом деле, как показывает рассмотрение рецептивных полей (разд. 2.4), по мере центростремительного движения по системе входов каждая клетка контролирует все более широкий диапазон входов. При этом поток информации сначала разветвляется, а затем сходится вновь, в результате чего каждая периферическая точка оказывает влияние на активность многих центральных клеток и в то же время каждая центральная клетка контролирует работу многих рецепторов. Другими словами, входная информация оказывается одновременно и распределенной, и избыточной. И даже при отключении значительных участков центральных путей сохраняется по крайней мере частичная информация почти со всех участков периферии. Более того, наша способность перемещать рецепторы, например сканируя зрительную картину или проводя рукой по исследуемой поверхности, позволяет нам получать « мозаичное » представление обо всей исследуемой сцене даже тогда, когда рецептивные поля, связанные с данным нейронным путем, ограничены. Возможно, наиболее плодотворной окажется аналогия с голограммой по ее третьему свойству, а именно способности хранить в одном месте много различных данных. Во всяком случае, необходимо еще раз подчеркнуть, что *любая метафора оказывается полезной только тогда, когда мы понимаем ее не слишком буквально.*

Не следует ожидать, что у нейронных голограмм преобразования сцены в воспоминание по своим математическим свойствам будут такими же, как и у обычных голограмм. Обычная голограмма — это по сути дела пространственный образ Фурье, в каждой точке которого записаны частоты для всего оригинала в целом, и притом таким образом, что этот образ можно *инвертировать*, восстановив по нему весь фронт волны. Однако создается впечатление, что для организма важно не столько иметь возможность воспроизвести весь зрительный вход как таковой, сколько уметь вспомнить жизненно важные *черты* прошлого опыта. В разд. 2.4 мы убедились в том, что на нижних уровнях переработки информации организмом основная задача как раз и состоит в извлечении из входного образа признаков, существенных для восприятия. Поэтому адекватным понятием для нейронных голограмм может быть не обратимое

преобразование Фурье, а такое принципиально необратимое преобразование, при котором пространственное распределение интенсивностей заменяется пространственно распределенным набором признаков (следует подчеркнуть, что это относится к восприятию всех модальностей, а не только к зрению). Заметим, что при этом каждой точке в «пространстве признаков» может соответствовать обширное сенсорное поле, и поля, соответствующие разным точкам, могут в значительной мере перекрываться. Поэтому по ограниченному участку пространства признаков можно восстановить значительно более широкую картину оригинала; правда, некоторые детали, определяемые отброшенными признаками, в ней будут отсутствовать, хотя некоторые другие будут воспроизведены с исключительной точностью. И совершенно в духе разд. 4.1 и 6.1, где было высказано предположение, что одна из основных функций памяти состоит в пополнении текущего сенсорного входа недостающей информацией, необходимой для действия, нам кажется целесообразным, говоря о нейронных голограммах, заменять частотный спектр обычных голограмм *спектром действий*; таким образом, рассмотренные выше признаки — это те признаки, которые дают возможность организму реагировать на внешнее воздействие оперативно и адекватным образом. Мы считаем, что животное пользуется не каким-то обратимым способом представления информации, позволяющим однозначно восстановить первичный стимул, а редуцированным необратимым ее представлением, достаточным для того, чтобы сконструировать соответствующую реакцию.

Для того чтобы применить методы голографии к конструированию нейронных сетей, реализующих некоторые схемы из разд. 6.2, необходимо, чтобы и аналог эталонного пучка соответствовал воспоминаниям, которые он вызывает. Мы уже знаем, что различные эталонные пучки могут вызывать различные образы, но в обычных голограммах эти пучки выбираются произвольно. Нам кажется, что в нейронном аналоге голограммы (если таковой существует) роль эталонного пучка должна играть текущая нейронная активность, как периферическая (чтобы животное могло вспомнить, что происходило в аналогичной ситуации в прошлом), так и центральная (чтобы оно могло вспомнить о мыслях, связанных с его текущими мыслями).

При этом гипотеза Прибрама, согласно которой эталонным пучком служит просто несколько более ранний вариант текущего входа, объясняет частный случай наших общих представлений. Контур подобного рода позволяет идеально объяснить способность человека воспроизводить события в правильной временной последовательности, когда каждая новая порция



информации следует за предыдущей во время запоминания, а каждое новое действие вызывается к жизни предыдущим во время воспоминания.

Хотелось бы также подчеркнуть, что запоминать всю информацию совсем не обязательно. Система эфферентного контроля может служить фильтром для поступающей информации; другими словами, эталонный пучок может обеспечивать не только сохранение информации, но и ее отсев. (Отметим еще, что в процессе приобретения навыков «входной» информацией для нейронной голограммы может быть как активность центральной нервной системы — «память на идеи», — так и активность проприоцепторов — «память на ощущения».) Активность нейронов может вызвать целый «спектр» воспоминаний и заставить организм заняться обобщениями, т. е. данный стимул может активизировать весь опыт, относящийся к определенным видам деятельности организма. И наоборот, если какой-то опыт относится к разряду «ординарных», то он сохранится при помощи такого эталонного пучка, что впоследствии будет воспроизводиться лишь в виде шума, а поведение организма будет определять текущий вход. (Но зачем вообще запоминать ординарное? Возможно, просто потому, что «запоминать» так, чтобы потом нельзя было вспомнить, проще, чем каждый раз проводить тщательные расчеты и определять, что следует запомнить, а что нет.)

Одно из представлений о нейронной голограмме, которое может служить полезной метафорой, способной направлять некоторые исследования деятельности мозга, схематически представлено на рис. 109. К этой схеме следует относиться как к рабочей гипотезе, а не как к завершенной научной теории, что станет ясным из ее беглого рассмотрения. Обратная связь играет для этой схемы исключительно важную роль, поскольку пробудившиеся воспоминания помогают сформировать эталонный пучок, создавая возможность систематического обследования памяти и сохранения в КП той информации, которая не связана непосредственно с управлениями, непрерывно генерируемыми в ответ на текущую последовательность входных воздействий. С таких позиций сны — это особая форма активности, почти полностью зависящая от воспоминаний, уже извлеченных из памяти, она совершенно свободна от диктата «реальности» и все же обладает локальной связностью. Во время бодрствования слишком большое рассогласование между входными воздействиями и текущим содержанием кратковременной памяти приводит к решительной переоценке ситуации, механизм которой бездействует во время сна.

Системы ввода информации извлекают важные для предполагаемых действий признаки внешней ситуации и под действием

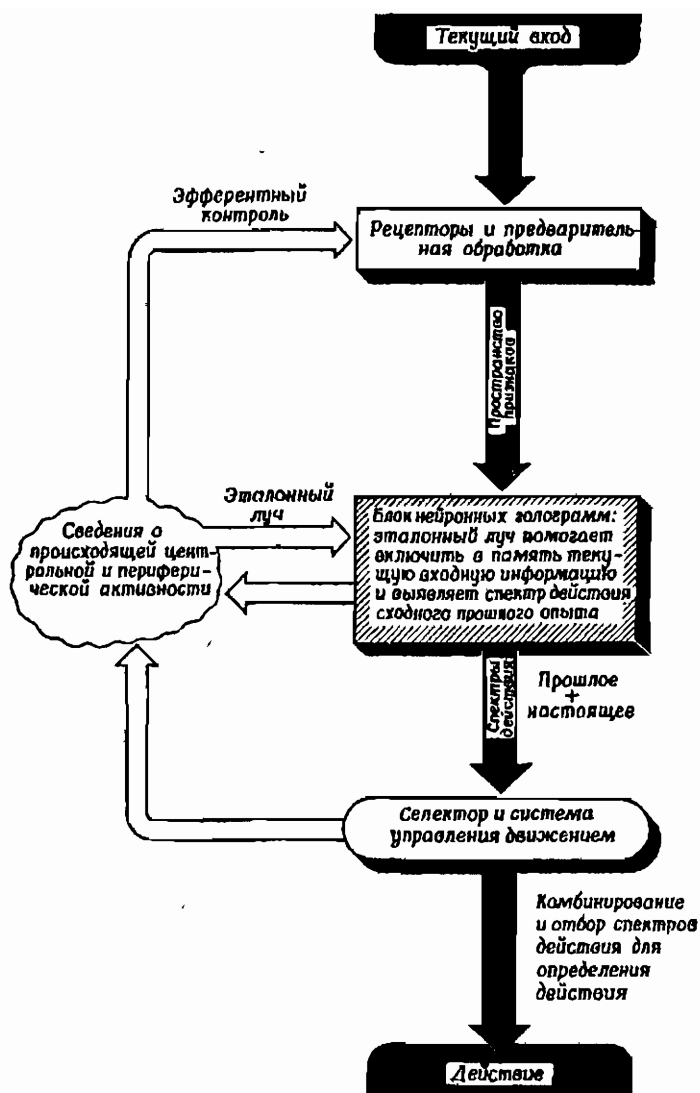


Рис. 109. Модификация схемы 103 на основе голографической метафоры с целью показать, как можно использовать долговременную память для ассоциативной корректировки кратковременной модели.

эфферентного контроля занимаются получением данных, необходимых для нашего текущего хода мыслей. Среди прочего эти данные могут использоваться для обращения к той информации, которая необходима для уменьшения рассогласования между содержимым кратковременной памяти и тем, что нужно для взаимодействия с окружающей нас в данный момент средой. Что же касается эталонных пучков, то они могут служить как для извлечения из памяти необходимой информации, так и для запоминания новой.

Наши представления о концентрировании внимания или о попытках сосредоточиться для того, чтобы вспомнить что-то, находят свое отражение в нижнем блоке на рис. 109, который в состоянии при формировании эталонного луча предусмотреть у него несколько специфических черт, способствующих получению новой информации. Таким образом, мы попадаем в круг все более и более «пристрастного допроса» и в конце концов получаем нужную информацию. В простейшем случае контур формирования эталонного пучка — это просто временная задержка, позволяющая вспоминать события в их правильной временной последовательности, поскольку в этом случае события, происходившие в момент времени  $n$ , использовались для кодирования событий в момент времени  $n + 1$  и т. д.

С точки зрения намеченной схемы кратковременная память может соответствовать текущей активности в таких контурах, тогда как долговременная память соответствует изменению взаимосвязей в блоке нейронной голограммы. При некоторых повреждениях гиппокампа люди не способны переводить информацию из кратковременной памяти в долговременную; возможно, что гиппокамп занимается «установкой выдержки» для блока нейронных голограмм. Однако, поскольку математика комплексных волн, необходимая для объяснения оптической голографии, существенно отличается от математики, необходимой для описания последовательностей нейронных спайков, вероятно, нам будет далеко не просто описать даже интерференцию волн таких последовательностей, не говоря уже о моделировании процессов, аналогичных проявлению фотопленки.

Независимо от тех предположений, которые мы можем сделать относительно функциональной схемы для человеческой памяти, нейронная голография будет служить полезной метафорой при условии, конечно, что мы не поддадимся соблазну и не будем понимать ее слишком буквально (например, в смысле воспроизведения зрительного входа), а постараемся использовать идею о возможности восстановить весь фронт волны по ограниченному ее участку, объясняя возможность хранения разнотипной информации в одном и том же участке мозговой ткани.

существованием различных волновых «паролей». Эти идеи должны служить антиподом тех основанных на пословном запоминании представлений о памяти, которые навеяны нам цифровыми вычислительными машинами или лингвистическими возможностями человека. Они должны помочь нам найти адекватные понятия, позволяющие моделировать процессы адаптивных модификаций деенаправленных пространственно распределенных вычислений в многослойном соматотопически организованном вычислительном устройстве.

## Глава 7

### УСТРАНЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ КОМАНД

Кошка пожирает мышь. Появляется собака. Что делать? Продолжать *еду*, вступить в *драку* с собакой или, памятуя о том,

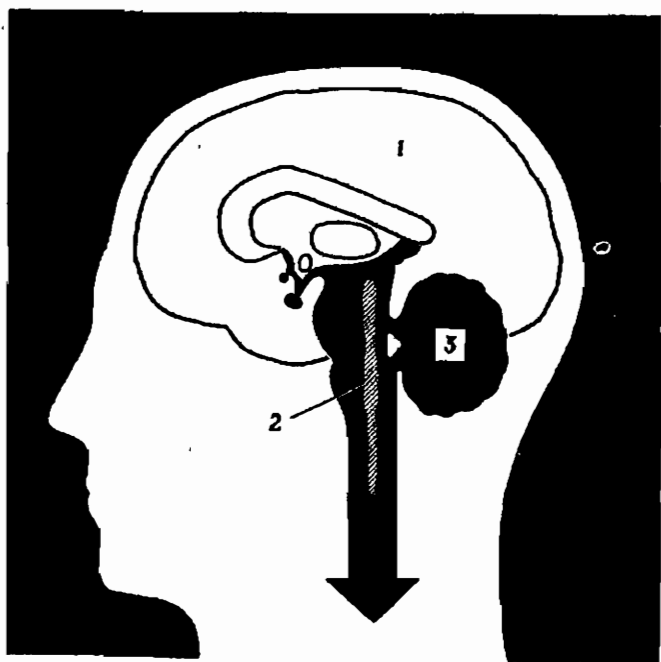


Рис. 110. Схема человеческого мозга, на которой ретикулярная формация (РФ) показана штриховкой.

1 — кора; 2 — РФ; 3 — мозжечок;

что осторожность — наивысшая из добродетелей, обратиться в бегство и избежать тем самым неприятностей? Есть, бежать или драться — это пример трех различных и взаимоисключающих

типов поведения, на которые может решиться животное. Как показывает приведенный пример, животное нередко оказывается в таких положениях, когда возможны разные типы поведения, следовательно, его нервная система должна быть устроена таким образом, чтобы противоречия между потребностями разных типов поведения быстро устранялись и животное могло сосредоточиться на поведении одного типа. По мнению Мак-Каллока, основная часть мозга, ответственная за подобные решения, — это ретикулярная формация (РФ) ствола, показанная на рис. 110. Этой гипотезой мы и займемся в разд. 7.1, познакомившись с соответствующей машинной моделью, предложенной Килмером и Мак-Каллоком [137, 138].

Выбор типа поведения — это лишь один пример устранения избыточности потенциальных команд, операции, которая играет важную роль во внутренних расчетах системы децентрализованного восприятия (разд. 2.1). И чтобы не создавалось впечатления, что модель РФ пригодна для всех случаев, разд. 7.2 посвящен рассмотрению модели другой системы устранения избыточности потенциальных команд, позволяющей лягушке выбрать для нападения одну из двух мух, оказавшихся в поле ее зрения. И в том и в другом примере максимальное время, отпущенное на устранение избыточности, существенно ограничено. Кошке необходимо решить, бежать ей или драться, до того как на нее нападет собака. Лягушке нужно принять решение, какую муху ловить, до того как обе они улетят слишком далеко. В разд. 7.3, основываясь на «сравнительном изучении» моделей для этих двух примеров, мы попытаемся понять, как это происходит.

### 7.1. МОДЕЛЬ РЕТИКУЛЯРНОЙ ФОРМАЦИИ

В этом разделе мы рассмотрим модель, предложенную Килмером и Мак-Каллоком, которые пытались объяснить, каким образом РФ может управлять выбором типа поведения организма. Однако сначала мы познакомимся с некоторыми данными по анатомии нервной системы, на основе которых Килмер и Мак-Каллок строили свою модель. М. Шейбл и А. Шейбл, изучая срезы ствола головного мозга десятидневных крыс, подобные показанным на рис. 111, А, заметили, что коллатерали, идущие как от ретикулярных аксонов клеток РФ (верхняя часть схемы), так и от пирамидного пути (рис. 111, Б), располагаются в основном в плоскостях, примерно перпендикулярных главной оси ствола. Дендриты клеток РФ также, по-видимому, распределены по таким плоскостям, чем они резко отличаются, например, от дендритов ядер подъязычного нерва (рис. 111, В). В связи с этим указанные авторы выдвинули гипотезу, согласно которой ретикулярную формацию можно рассматривать как

стопку «фишек» — «сегментов» нейропиля (например, нейронного «войлока»), как это показано на рис. 111, Б.

Соответственно Килмер и Мак-Каллок положили в основу своей модели представление о «модуле» — некотором формализованном участке нейропиля, что позволило им избежать одновременно обеих крайних позиций — представления об РФ как о чем-то едином и неплодотворных попыток изучать функцию РФ прямо на нейронном уровне. Следует подчеркнуть, что раз-

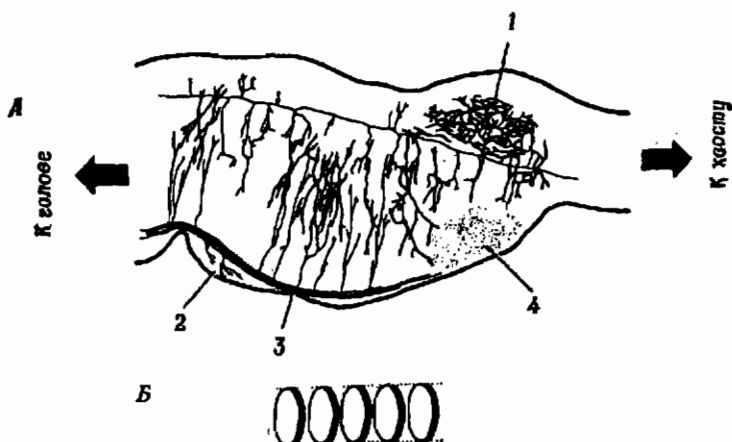


Рис. 111. Схема строения ствола мозга.

У типичного нейрона ретикулярной формации аксоны направлены как каудально, так и краниально, а дендриты ветвятся по поперечным плоскостям (А). Это навело на мысль (см., например, [223]) о том, что РФ можно упрощенно представить себе в виде стопки игральными фишками (Б).

1—ядро языкоглоточного нерва; 2—ядра моста; 3—пирамидный тракт; 4—ядро нижней оливы.

бнение РФ на такие модули достаточно произвольно, хотя изменение комбинаций сенсорных модальностей по мере продвижения от головного конца к хвостовому и согласуется с идеей подобной сегментации.

Как афферентный восходящий спино-ретикулярный тракт, так и эфферентный нисходящий пирамидный тракт проходят через сегменты нейропиля (фишки) в перпендикулярном направлении, отдавая коллатерали в эти сегменты. В каждом сегменте имеются нейроны, дендритные поля которых в значительной мере перекрываются. Входные воздействия для каждого конкретного сегмента не специфичны в отношении сенсорной модальности, т. е. на любую клетку РФ оказывает влияние широкий диапазон афферентных стимулов. Выходные аксоны клеток РФ идут как вверх, так и вниз по стволу на весьма большие расстояния, отдавая многочисленные коллатерали. Создается

впечатление, что каждый модуль в этом наборе образует разветвленные связи с другими модулями и оказывает весьма сложное выходное воздействие на многие отделы нервной системы.

Перейдем теперь к рассмотрению структуры, приведенной на рис. 112; она состоит из ряда модулей, каждый из которых соединен с несколькими соседними модулями и получает разные входные воздействия; хотя входы соседних модулей могут иметь и много общего. Допустим, что каждый из этих модулей,

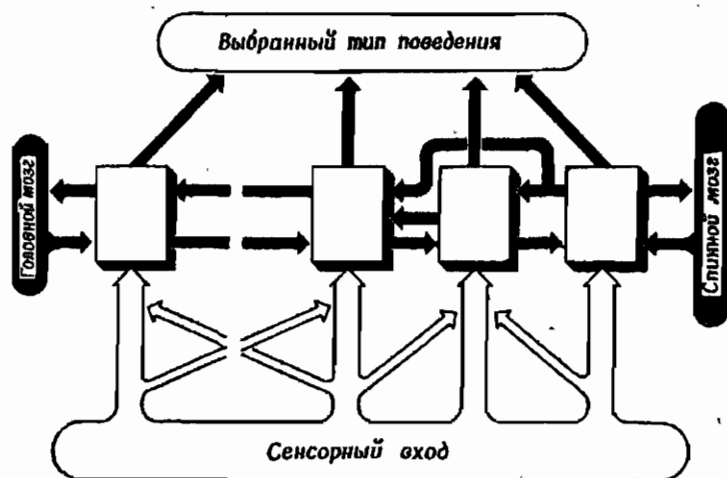


Рис. 112. Развитие идеи о стопке фишек (рис. 111).

Теперь мы моделируем РФ как набор модулей. Задача состоит в том, чтобы найти такую конструкцию этой модульной системы, которая давала бы возможность организму выбирать единое согласованное поведение, несмотря на то что все модули получают различную входную сенсорную информацию.

основываясь на только что полученной информации, может принимать предварительные решения об относительной пригодности того или иного типа поведения. После этого мы можем поставить основной вопрос.

Вопрос о согласовании локальных решений. Как должно быть организовано взаимодействие между модулями, чтобы при наличии разных входных воздействий на разные модули, обуславливающих вначале выбор разных типов поведения, в конечном итоге достигалось некое согласованное решение, определяющее единый тип поведения для системы в целом?

Все дальнейшее следует, по-видимому, рассматривать как важную, хотя и чисто спекулятивную попытку ответить на этот вопрос. Другими словами, воспользовавшись биологическими данными, указавшими нам на важную роль РФ в выборе типа поведения, и анатомическими данными, позволяющими считать



схему на рис. 112 адекватной основой для нашей модели, мы теперь забудем о данных нейрофизиологии и используем все что можно, чтобы заполнить блоки на этой схеме и получить конструктивный ответ на вопрос о согласовании локальных решений. Мы увидим, что Килмеру и Мак-Каллоку действительно удалось найти ответ на этот вопрос, но нам придется вновь заняться экспериментированием, чтобы выяснить, соответствует ли принятая ими детализация функций модуля тому, что можно обнаружить в ограниченном сегменте нейропиля настоящей РФ, а затем произвести теоретические исследования, с тем чтобы объяснить, как реальные нейронные сети могут реализовать эти функции модулей, постулированные на основе как теоретических, так и экспериментальных соображений. Поэтому повторим еще раз, что, хотя описываемая ниже схема и дает возможность согласовывать локальные решения, вопрос о том, в какой степени она соответствует процессам, происходящим в стволе головного мозга реально существующих животных, остается открытым.

Для простоты изложения предположим, что мы хотим построить блок выбора, подобный схеме 112, всего из четырех модулей, так что выбирать приходится всего из четырех типов поведения. Опишем состояние каждого модуля вектором  $\vec{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4)$ , где каждое  $p_j \geq 0$ , а  $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1$  и каждое  $p_j (j = 1, 2, 3, 4)$  описывает вес (например, адекватность), который этот модуль в настоящий момент приписывает  $j$ -му типу поведения. Будем считать, что локальные решения согласованы, если более 50% модулей приписывают одному и тому же типу поведения вес, превышающий  $1/2$ , и именно в такое поведение и оказывается вовлеченной система. К сожалению, Килмер и Мак-Каллок не уделили никакого внимания ни поискам правдоподобной нейронной системы обнаружения самого факта достижения согласия, ни тому, как должны быть устроены системы управления движением, с тем чтобы они могли реагировать на указания о выбранном типе поведения. В качестве первого шага к решению первой из этих проблем отметим, что, как показывает машинное моделирование, всякий раз, когда процесс сходится, на выходе очень скоро возникает ситуация, при которой не менее 70% модулей приписывают доминирующему типу поведения вес не ниже 0,65. В связи с этим для каждого типа поведения можно предусмотреть свой собственный блок порогового сравнения, срабатывающий лишь тогда, когда входное воздействие достигнет по крайней мере 50% своего максимума, и не опускается ниже этого уровня на протяжении некоторого времени. Это гарантирует, что в любой момент времени проявит активность лишь один регулятор типа поведения и, следовательно, организм будет отрабатывать поведение

только одного типа. Такой детектор согласования использовался в процессе машинного моделирования, однако вопрос о том, в какой форме эта операция может реализовываться в нервной системе, остается нерешенным.

Стратегию, воплощенную в схеме Килмера и Мак-Каллока, можно сравнить с обменом мнениями между врачами, собравшимися на консилиум, чтобы поставить диагноз. Каждый из участвующих в консилиуме врачей — специалист в определенной области, но достаточно хорошо знаком и с медициной в целом. Кардиолог может основывать свой диагноз главным образом на характере электрокардиограммы, но не может не обратить внимания на бледность больного и на его одышку. Осматривая пациента впервые, врачи (наши модули) «глобально независимы» и каждый самостоятельно ставит первоначальный диагноз. Но затем начинается дискуссия с целью выработать единое мнение. В процессе этого обмена могут возникать и ситуации «локальной автономии» мнений; если один из врачей неожиданно почувствует уверенность в том, что диагноз должен быть совершенно иной, нежели тот, который он отстаивал ранее, то в течение определенного периода времени остальные врачи будут уделять особое внимание причинам, побудившим первого врача изменить свое мнение.

Основываясь на подобных соображениях, Килмер, Мак-Каллок и Блум [137] создали машинную модель, названную ими S-ретической. Это была модульная система, предназначенная для выбора типа поведения и работавшая по следующей схеме:

1. Если входное воздействие на модуль изменяется очень сильно, то новое значение  $\beta$  определяется практически только характером нового сенсорного входа. Это позволяет обеспечить глобальную автономию модулей при изменениях входа системы в целом.

2. Если входное воздействие на модуль изменяется не слишком сильно, то новое  $\beta$  определяется нормированным взвешенным средним старого  $\beta$  и  $\beta$  других модулей, связанных с рассматриваемым. При этом локальная автономия достигается путем приписывания большего веса тем  $\beta$ , которые претерпевают внезапные изменения, а избыточность потенциальных команд получается в результате приписывания большего веса тем  $\beta$ , которые содержат больше селективной информации.

Как уже отмечалось, мы (произвольно) считаем, что решение согласовано, когда большинство модулей приписывают одному и тому же типу поведения вес, больший 0,5. Поэтому суммарный эффект работы схемы можно рассматривать как изначальное обеспечение автономии модулей в момент появления нового входа, позволяющее акцентировать внимание на даваемых каждым модулем оценках того, каким должно быть новое поведение,

с последующим итеративным увязыванием индивидуальных решений в одно глобальное, согласованное. Моделирование на вычислительной машине показывает, что в S-ретической схеме (или по крайней мере в конкретной рассматривавшейся системе взаимосвязей между модулями) искомое согласование достигается не более чем за 25 итераций и после того, как оно будет достигнуто, сохраняется до появления нового входа. Если входные воздействия ясно указывают на адекватность лишь одного типа поведения, согласование достигается весьма быстро. Но если предпочтение одного типа поведения не вполне ясно выражено, то начальные условия и характеристики системы оказывают сильное влияние на окончательное решение.

В рамках поведения одного и того же типа возможны многие различные действия. Например, если кошка решает спастись бегством, то она может утащить мышь с собой или бросить ее, может вскарабкаться на дерево или обежать его, перепрыгнуть через ручей или переплыть его. Килмер и Мак-Ларди [136] считают, что функцию выбора действий в пределах поведения данного типа выполняет одна из областей гиппокампа (остальные его части заняты, по крайней мере в период формирования поведения, по-видимому, консолидацией долговременной памяти). Мы не собираемся рассматривать здесь модель, предложенную этими авторами, поскольку она остается пока весьма спорной (ср., например, с другой моделью гиппокампа, принадлежащей Олдзу [194]), но, возможно, читатель захочет поразмыслить над тем, почему иерархическая структура системы выбора поведения и конкретного действия в рамках выбранного типа поведения может быть в определенном смысле «лучше» (независимо от вида конкретной структурной схемы, реализующей эти функции) другой, в которой последовательные действия выбираются сразу.

Возвращаясь к выбору поведения, отметим, что утверждение «РФ управляет выбором типа поведения» не следует понимать в том смысле, что РФ может нейтрализовать любое воздействие коры головного мозга. Напротив, кора может играть здесь важнейшую роль, устанавливая относительную важность различных комбинаций входных стимулов в выбранном РФ типе поведения. Например, один из важных параметров изменения типа поведения — это состояние готовности. Обычно животное постепенно переходит от глубокого сна к чуткому, затем просыпается и, наконец, оказывается в состоянии полной готовности. Неожиданный звук может сразу привести животное в состояние готовности, и, по-видимому, можно считать вполне установленным, что это происходит в результате передачи возбуждения по нервным путям, распространяющимся диффузно в кору головного мозга из области РФ, получившей в связи с этим название активн-

рующей ретикулярной системы. Однако при многократном повторении одного и того же звука РФ может перестать активизировать животное, и в этом случае мы говорим, что животное *привыкло* к данному стимулу. Такое привыкание может быть достаточно сложным. Спящая женщина может совершенно не реагировать на раскаты грома, но просыпается, как только заплачет ее ребенок; матрос может мирно спать под грохот судового двигателя и мгновенно просыпаться, если эти привычные звуки вдруг изменятся. Состояние готовности может быть вызвано и отсутствием привычного стимула. Так, Прибрам [204] рассказывает, что жители Нью-Йорка, привыкшие к грохоту поезда надземной железной дороги, проходившего в 3 часа ночи, в течение долгого времени после того, как эту дорогу снесли, просыпались ровно в 3 часа ночи, пока не привыкли к необычной тишине! Профессор Московского государственного университета Е. Н. Соколов поставил опыт, показывающий, что в мозгу, по-видимому, формируется «внутренняя модель» стимула, к которому мы привыкаем, и что изменение достаточного числа произвольных параметров этой модели может привести к исчезновению привычки. В опыте Соколова испытуемый многократно подвергался звуковому воздействию с фиксированной частотой и продолжительностью. При этом по мере повторения ориентировочный рефлекс, измерявшийся «вызванной реакцией» (одна из грубых мер уровня электрического возбуждения коры), становился все более и более слабым. Напрашивалось предположение, что РФ просто научилась игнорировать слуховые воздействия этой частоты. Однако Соколов [236] опроверг такое объяснение, продемонстрировав, что привычка к этой частоте исчезает, если повысить или даже *понизить* интенсивность стимула. Более того, если после того, как к стимулу заданной частоты и амплитуды выработалась привычка, резко уменьшать его продолжительность, то в течение этого «недостающего времени» будет наблюдаться вызванная реакция. Таким образом, в организме закодированы и частота, и амплитуда, и продолжительность стимула, и привыкание объясняется, по-видимому, не утомлением или отключением какой-то ограниченной группы периферических рецепторов или детекторов признаков, а скорее централизованным формированием «эталона» или набора параметров, используемых при эфферентном управлении соответствующими участками сенсорных путей, что позволяет использовать в проводимых в РФ операциях только информацию о рассогласованиях с эталоном.

Впрочем, здесь необходимо отметить, что при удалении коры погасить ориентировочный рефлекс удастся лишь в самых необыкновенных случаях. Так, хотя этот рефлекс и управляется РФ, кора головного мозга может оказывать тормозное воздей-

вие на оценку сенсорного входа. Поэтому модель Килмера — Мак-Каллока объясняет лишь то, каким образом РФ могла бы выбирать тип поведения при отсутствии воздействий со стороны коры. Мы надеемся, что нам удастся лучше разобраться в поведении человека, если мы попытаемся проследить за постепенным совершенствованием подобных примитивных операций в процессе эволюции, вместо того чтобы стараться понять это поведение сразу во всей его сложности. Аналогичным образом мы пытаемся разобраться в организации зрительного восприятия, выясняя, в какой степени зрительную кору можно рассматривать как результат эволюции, приведшей к совершенствованию системы примитивной визиомоторной координации, осуществлявшейся в тектуме. Как мы видим и в том и в другом случае, коре приходится перерабатывать много информации, чтобы помочь структурам более низкого уровня решать, что же должно быть в центре нашего внимания, и приходится признать, что наши представления об этих процессах находятся еще на самом начальном этапе.

## 7.2. ВИЗИОМОТОРНАЯ АКТИВНОСТЬ ЛЯГУШКИ

Для того чтобы противопоставить что-нибудь модели ретикулярной формации и придать конкретность нашим соображениям о многослойном вычислительном устройстве (гл. 6), мы построим на основе принадлежащей Питтсу — Мак-Каллоку модели управления взглядом (разд. 5.5) соматотопически организованную модель управления тем поведением лягушки, в основе которого лежит зрительная информация.

Сначала мы расскажем вкратце о некоторых аспектах визиомоторной деятельности лягушки, а затем ограничимся рассмотрением тех из них, которые укладываются в нашу модель.

Лягушка может сидеть неподвижно несколько часов подряд, но если в ее поле зрения появляется небольшой трепещущий объект, она может отреагировать на это либо ориентировочной реакцией (т. е. повернуться в сторону этого объекта), либо реакцией нападения (т. е. повернуться к нему, «выстрелить» языком и схватить его). Ингл установил, что для лягушки существуют две четко выраженные зоны, определяемые относительно положения ее головы, а не тела; если трепещущий объект попал во внутреннюю зону, то лягушка нападает на него, а если во внешнюю, то только поворачивается к нему.

В поведении лягушки особенно интересно отметить два момента, хотя мы и не будем пытаться моделировать их. Во-первых, движения лягушки организованы по баллистическому принципу: она как бы «стреляет» по цели, не имея никакой

возможности корректировать свои действия после того, как они начались, поскольку, если экспериментатор удалит из поля зрения лягушки стимул в течение приблизительно первых 100 миллисекунд после того, как она начнет движение, лягушка все равно «ударит» по исходной позиции стимула. Во-вторых, лягушка нападает на «муху», даже если эта муха попала в поле зрения только одного глаза, так что бинокулярное зрение для этого, по-видимому, не требуется. (Ингл предположил, что аккомодация глаза, необходимая для точной фокусировки стимула, дает лягушке необходимую информацию о расстоянии до цели, но обнаруженные Китингом и Гейзом [135] интертекстальные связи, которые способствуют бинокулярному зрению, наталкивают на мысль, что при более тщательных исследованиях удастся обна-

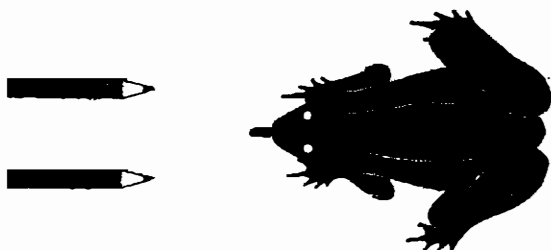


Рис. 113. Лягушка, нападающая на «среднюю муху».

ружить какой-то специальный механизм «тонкой настройки», включающийся в работу только тогда, когда оба глаза действуют согласованно.)

В настоящем разделе нас будет прежде всего интересовать поведение лягушки в присутствии более чем одной «мухи». В подобной ситуации вероятность активной реакции лягушки уменьшается, а если реакция и происходит, то лягушка обычно нападает лишь на одну из «мух». Однако Ингл [124] установил, что в ситуации, показанной на рис. 113, когда оба стимула движутся синхронно и симметрично, то приближаясь к носу лягушки, то удаляясь от него, она обычно «бьет» в точку, находящуюся строго посередине между этими стимулами. Можно сказать, что она нападает на «среднюю» муху. Наша задача состоит в том, чтобы построить нейронную сеть, которая, используя информацию о «пищечности» среды, соотнесенной с пространственными координатами и полученной либо с помощью «детекторов насекомых» (тип II, см. разд. 2.4), либо от нейронов текстуа, комбинирующих информацию от этих детекторов с сигналами, полученными из других слоев, обеспечит воздействие на управление двигательной деятельностью системы лишь одного источника возбуждения.

Наши соображения, изложенные в разд. 6.1, заставляют нас искать для этой задачи решение, основанное на распределении вычислительных функций. Поэтому прежде всего мы вкратце перечислим те стратегии, от рассмотрения которых мы отказываемся. Одна из таких стратегий — это последовательное сканирование, суть которого иллюстрирует рис. 114: животное под действием какого-то центрального органа последовательно сканирует «предполагаемую зону пишенности» до тех пор, пока не наткнется на область высокой активности; после этого оно

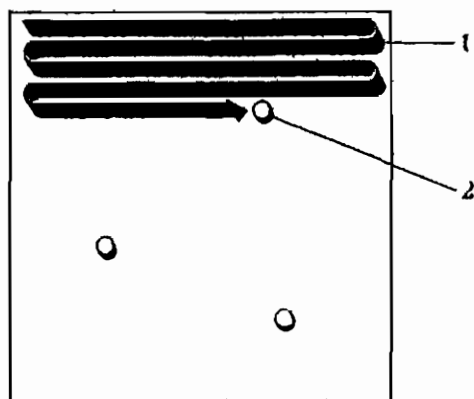


Рис. 114. Небиологичный способ устранения избыточности потенциальных команд, основанный на последовательном сканировании.

1 — путь сканирования; 2 — первая встреченная область высокой активности.

прекращает сканирование, считывает текущие «координаты сканирования», отдает соответствующий приказ системе управления движением и в результате всего этого «бьет» в соответствующую точку пространства. Подобная схема может, вероятно, объяснить даже «эффект средней мухи», если предположить, что в каждом глазу имеется свое сканирующее устройство, так что в случае симметричных стимулов оба процесса сканирования прервутся строго одновременно, а противоположные движения в ответ на противоречивые команды приведут к «среднему» движению. Но несмотря на всю привлекательность подобного механизма сканирования, мы должны отказаться от этой гипотезы, ибо, не говоря уже о наших общих соображениях в пользу соматотопической организации управления, этот механизм потребовал бы слишком много времени на сканирование того множества объектов, которые попадают в поле зрения лягушки.

В поисках схемы, которая использовала бы пространственное распределение информации, мы обратимся к работе Диддея [59]; в ней предложена новая структура, основанная на конкурентном

взаимодействии разных частей тектальной области, в результате которого в обычных обстоятельствах лишь наиболее активная из этих частей передает на систему двигательного управления входной сигнал выше порогового; при этом предполагается, что система управления движением имеет некоторую пространственно распределенную входную поверхность, подобную той, которая изображена на рис. 99. Мы начнем с того, что введем новый слой клеток, соответствующий «слою пищенности» и предназначенный для генерирования входов для системы управ-

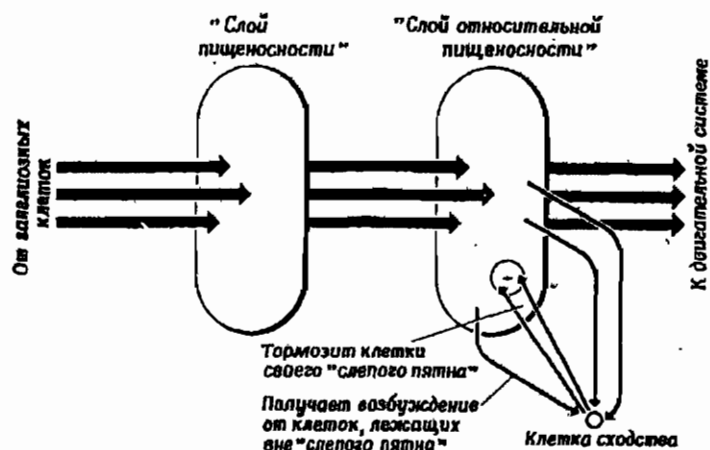


Рис. 115. Функционирование клеток сходства.

ления движением. Таким образом, в определенном смысле характер возбуждения, приходящего в данную клетку из соответствующего рецептивного поля, должен описываться слоем «относительной», а не «абсолютной пищенности».

В предложенной Диддеем схеме преобразования «пищенности» в «относительную пищенность» имеется популяция так называемых *клеток сходства*, каждая из которых как бы «контролирует» целый участок «слоя относительной пищенности» и «приглушает» активность, которую клетки этой группы получают от соответствующих клеток «слоя абсолютной пищенности», тем сильнее, чем выше активность клеток, лежащих *за пределами* контролируемого района (рис. 115). Этот механизм гарантирует, что высокая активность в каком-либо участке «слоя абсолютной пищенности» передается «слою относительной пищенности» только в том случае, если этот участок не окружен областью столь же высокой активности, которая могла бы блокировать эту передачу.



Исследуя поведение подобной системы, мы выясним, что правдоподобная схема соединения указанных слоев должна обладать следующими свойствами:

1. Если активность в каком-либо одном участке выше активности в любом другом участке, то этот участок в конце концов «возьмет верх» над всеми остальными и животное ударит по соответствующей точке пространства.

2. Если два разных участка обладают достаточно близкой активностью, то

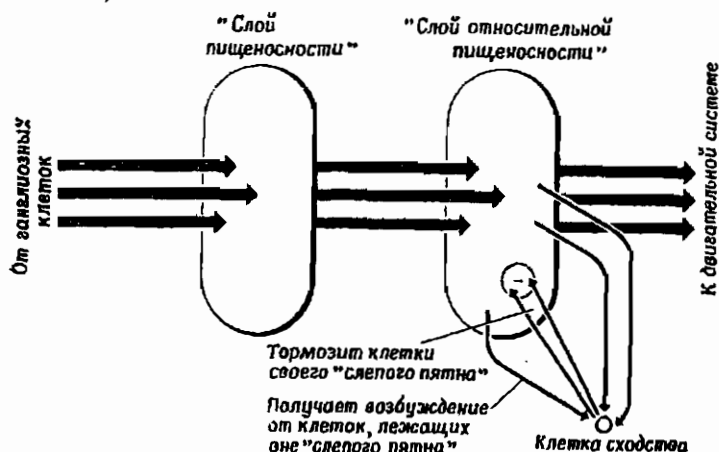


Рис. 116. Функционирование клеток новизны.

Клетки новизны вносят временные изменения, происходящие в «слое пищенности», в вычисления «слоя относительной пищенности».

а) если оба участка обладают весьма высокой активностью, то они оба могут «взять верх» на других участках входной поверхности и одновременно «взять на себя» управление, в результате чего лягушка будет бить по точке, лежащей посередине между этими двумя областями;

б) однако во многих случаях эти два активных участка просто «погасят» эффект друг друга, в результате чего ни один из них не сможет взять на себя управление и лягушка останется неподвижной, не обращая внимания ни на одну из «мух».

Одно из затруднений в этой схеме состоит в том, что нарастание торможения, создаваемого клетками сходства, исключает возможность быстрой реакции системы на новый стимул. Например, если бы в случае 2,б один из двух участков очень высокой активности внезапно стал еще более активным, то казалось бы, что образовавшийся затор должен очень быстро ликвидироваться. Однако для описанной выше системы это не так

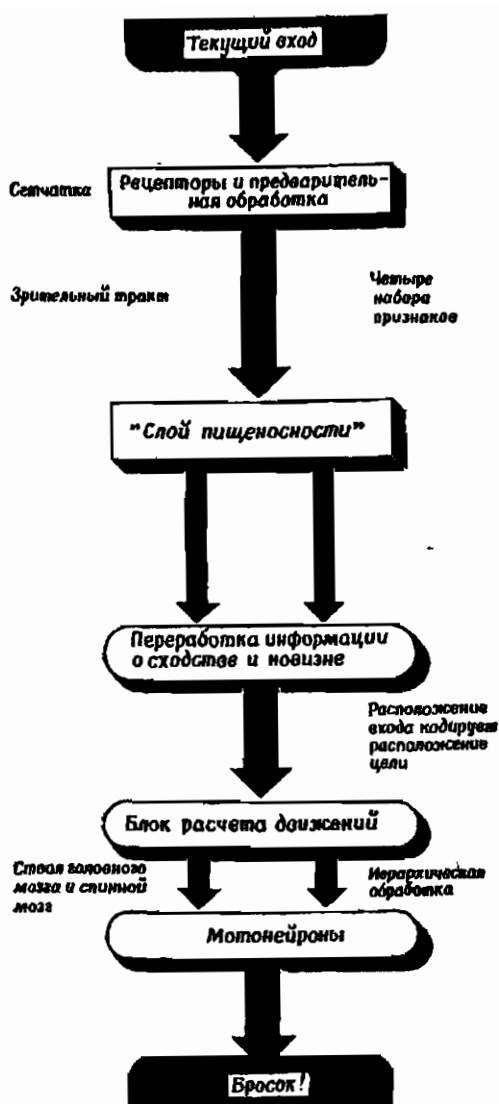


Рис. 117. Общая схема визиомоторной активности лягушки.

Схема сходна с рис. 103 и 109 с той разницей, что в этой простой модели не предусмотрено использование долговременной памяти для модификации сенсорного входа.

из-за нарабатанного торможения в клетках сходства, контролирующих этот участок. Поэтому Диддею [59] пришлось ввести на каждую клетку сходства по одной клетке новизны. Задача клеток новизны состоит в том, чтобы следить за изменениями активности соответствующего участка во времени. Если такая клетка обнаруживает достаточно резкое повышение активности в контролируемом участке, то она перекрывает тормозное воздействие клетки сходства и позволяет перенести новый уровень активности в слой относительной пищенности (рис. 116). Эта модификация позволяет преодолеть инерционность старой модели, и таким образом мы получаем «мозг лягушки», который быстро реагирует на новые содержательные стимулы (рис. 117).

### 7.3. НЕКОТОРЫЕ ТОЧКИ СОПРИКОСНОВЕНИЯ

В модели лягушки имеются два аспекта, заслуживающих особого внимания. Первый из них состоит в том, что клетки сходства и новизны были введены в модель на основании чисто логических соображений, с тем чтобы получить структуру, которая была бы непосредственно связана с деятельностью лягушки, а не с некими абстрактными представлениями о переработке информации или об адаптации, и чтобы необходимые вычисления реализовались распределенной системой. Стараясь следовать этим принципам, Диддей вынужден был *изобрести* клетки сходства и новизны. Однако после того, как он их изобрел (но до того, как он назвал их нейронами сходства и новизны, хотя, несомненно, он находился при этом под влиянием целого ряда неосознанных соображений), он заметил, что они по своим функциональным характеристикам сродни<sup>1</sup> нейронам сходства и новизны, обнаруженным Матураной и Летвином (разд. 2.4) в мозгу лягушки. Именно возможность делать качественные прогнозы побуждает нас продолжать использовать эти общие принципы в наших попытках понять работу мозга, подобно тому как совпадение соображений Винера относительно неустойчивости следящих систем с клиническими данными, касающимися атаксии (см. разд. 3.3), натолкнуло его на мысль применить теорию автоматического управления и связи для исследования биологических систем и тем самым заложить первоначальные основы кибернетики. И если соображения Винера позволили понять функции мозжечка, то наши модели помогают разобраться в ра-

<sup>1</sup> Но не «тождественны». Клетки сходства Летвина как бы фокусируют внимание лягушки. Они резко реагируют на изменение направления или скорости стимула, в каком бы месте зрительного поля он ни находился. В свою очередь нейроны новизны за один раз адаптируются к стимулам, движущимся в одном направлении. Так что сходство этих клеток не так велико, как хотелось бы.

боте зрительной системы. Однако в настоящее время мы знаем об анатомии и физиологии мозжечка гораздо больше и поэтому используем работы Винера лишь в качестве основы для дальнейших более тщательных исследований. Аналогичным образом в будущем придется изменить многие детали нашей модели визиомоторной активности лягушки по мере появления более подробных количественных данных о поведении лягушки, а также новых физиологических данных. Например, согласно Файту [74], клетки сходства и клетки новизны представляют собой лишь две группы из целого диапазона различных типов клеток, обладающих разной степенью привыкания, а не два четко обособленных класса, как утверждалось выше. Однако мы твердо надеемся, что основные качественные черты этой модели сохраняют свою силу и сыграют важную роль в определении направления будущих исследований.

Второй аспект, на котором нам хотелось бы здесь остановиться, состоит в том, что у модели выбора типа поведения, осуществляемого РФ, с одной стороны, и у модели управления визиомоторной деятельностью лягушки — с другой, много общего. В сущности, Диддей закончил свою диссертацию раньше, чем я обратил внимание на сходство этих моделей, а подметив их общность, я понял, что устранение избыточности потенциальных команд — это некий фундаментальный принцип, заслуживающий гораздо большего, чем упоминание мимоходом в связи с рассказом о модели РФ. А за этим пришло и понимание того, что механизмы, описанные в настоящей главе в связи с двумя рассматриваемыми здесь моделями, могут встретиться нам во многих подсистемах мозга и во многих системах управления роботами всякий раз, когда мы будем касаться вопросов, связанных с направлением внимания, работой памяти или изменяющимися эмоциями.

И если в модели РФ Килмера—Мак-Каллока имеется набор модулей, которые должны взаимодействовать друг с другом, с тем чтобы выбрать поведение, удовлетворяющее большинству из них, то роль второго слоя нашего гипотетического тектума состоит в том, чтобы погасить активность всех участков первого слоя (или активность, идущую от этих участков), кроме одного. Основные механизмы, управляющие этими процессами, по сути дела весьма сходны. Действительно, «локальная автономия» модулей в модели РФ выполняет, например, ту же функцию, что и нейроны «новизны» в модели тектума. Однако между этими моделями есть и существенные различия: если в модели РФ каждый модуль оценивает все типы поведения, а затем пытается согласовать свою оценку с оценкой других модулей, то в модели тектума понятие модуля можно отождествить с одним определенным типом поведения, а согласованием

считать отключение всех модулей (типов поведения), кроме одного. Так или иначе, изучение поведения лягушки по-новому освещает задачи моделирования РФ и подсказывает несколько новых гипотез. Например, оно заставляет нас поставить вопрос о том, в какой степени выбор типа поведения действительно сосредоточен в РФ, а в какой мере частичные решения по этому вопросу принимаются в более специализированных структурах, подобных тектальной области. Возникает также мысль о том, не лучше ли строить модель РФ по принципу один тип поведения — один модуль, реализованному в модели тектума. Таким образом, противопоставление этих двух моделей ставит острые проблемы как перед теоретиком, так и перед экспериментатором. Конечно, наши модели все еще весьма грубы и чрезмерно упрощены по сравнению со сложностью настоящего мозга, но, как нам кажется, даже частичный успех свидетельствует о том, что сформулированные в разд. 6.1 принципы организации, которыми слишком часто пренебрегали (даже в неявном виде, поскольку в явном виде здесь они сформулированы впервые) в кибернетической литературе, в будущем должны сыграть очень важную роль в развитии теории мозга.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ackermann R.*, The Philosophy of Science, New York, Pegasus, 1970.
2. *Allman J.*, Organic Foundations of Animal Behavior, New York, Holt, Rinehart and Winston, 1966.
3. *Apter J.*, The Projection of the Retina on the Superior Colliculus of Cats, *J. Neurophysiol.*, 8, 123—134 (1945).
4. *Apter J.*, Eye Movements Following Strychninization of the Superior Colliculus of Cats, *J. Neurophysiol.*, 9, 73—85 (1946).
5. *Arbib M. A.*, Brains, Machines and Mathematics, New York, McGraw-Hill, 1964. (М. Арбиб, Мозг, машина и математика, изд-во «Наука», М., 1968.)
6. *Arbib M. A.*, Theories of Abstract Automata, Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 1969.
7. *Arbib M. A.*, How We Know Universals: Retrospect and Prospect, *Math. Biosciences* (Warren McCulloch Memorial Issue), II, 95—107 (1971).
8. *Arbib M. A.*, Automata Theory in the Context of Theoretical Neurophysiology. In: R. Rosen, Ed., *Textbook of Theoretical Biology*, New York, Academic Press (1972).
9. *Arbib M. A.* (to appear), Eye Movements and Visual Perception.
10. *Arbib M. A.*, *Dev R. L.*, The Organization of Action-Oriented Memory for a Perceiving System II. The Hologram Metaphor, *J. Cybernet.*, forthcoming (1972).
11. *Arbib M. A.*, *Didday R. L.*, The Organization of Action-Oriented Memory for a Perceiving System I. The Basic Model, *J. Cybernet.*, 1, 3—18 (1971).
12. *Arbib M. A.*, *Zelger H. P.*, On the Relevance of Abstract Algebra to Control Theory, *Automatica*, 5, 589—606 (1969).
13. *Arbib M. A.*, *Franklin G. F.*, *Nilsson N.*, Some Ideas on Information Processing in the Cerebellum. In: E. Caianiello, Ed., *Proceedings of the Summer School on Mathematical Models of Neuronic Networks*, Berlin, Springer-Verlag, pp. 43—58 (1968).
14. *Armstrong D. M.*, A Materialistic Theory of Mind, London, Routledge and Kegan Paul, 1968.
15. *Arnheim R.*, Visual Thinking, Berkeley, University of California Press, 1969.
16. *Arnold M. E.*, Ed., The Nature of Emotion; Selected Readings, Harmondsworth, Penguin Books Ltd., 1968.
17. *Ashby W. R.*, Design for a Brain, New York, John Wiley and Sons, 1960. (У. Р. Эшби, Конструкция мозга, ИЛ, М., 1962.)
18. *Attneave F.*, Informational Aspects of Visual Perception, *Psych. Rev.*, 61, 183—193 (1954).
19. *Banerji R. B.*, Theory of Problem Solving: An Approach to Artificial Intelligence, New York, Elsevier, 1969.
20. *Barlow H. B.*, Sensory Mechanisms, The Reduction of Redundancy and Intelligence. *Symp. on Mechanization of Thought Processes*, London, H. M. Stationery Office, pp. 535—539, 1959.

21. *Barlow H. B.*, Trigger Features, Adaptation and Economy of Impulses. In: K. N. Leibovic, Ed., *Information Processing in the Nervous System*, New York, Springer-Verlag, pp. 209—230, 1969.
22. *Barlow H. B.*, *Blakemore C.*, *Pettigrew J. D.*, The Neural Mechanism of Binocular Depth Discrimination, *J. Physiol.*, **193**, 327—342 (1967).
23. *Bell C.*, *Dow S.*, Cerebellar Circuitry, *Bulletin of the Neurosciences Research Program*, **5**, MIT, 1967.
24. *Бернштейн Н.*, The Coordination and Regulation of Movements, Oxford, Pergamon, 1967.
25. *Beurle R. L.*, Properties of a Mass of Cells Capable of Regenerating Pulses, *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*, Ser. B, **240**, 231—277 (1956).
26. *Beurle R. L.*, Functional Organization in Random Networks. In: H. Von Foerster and G. W. Zopf, Jr., Eds., *Principles of Self-Organization*, New York, Pergamon, p. 291, 1962.
27. *Boring E. G.*, Mind and Mechanism, *Am. J. Physiol.*, **54**, 173—192 (1946).
28. *Bower T. G. R.*, *Broughton J. M.*, *Moore M. K.*, The Coordination of Visual and Tactile Input in Infants, *Perception and Psychophysics*, **8**, 51—53 (1970a).
29. *Bower T. G. R.*, *Broughton J. M.*, *Moore M. K.*, Demonstration of Intention in the Reaching Behaviour of Neonate Humans, *Nature*, **228**, 679—681 (1970b).
30. *Boylls C. C.*, *Arbib M. A.*, The Cerebellum: A Case Study in Brain Theory, *Progr. Biophys.*, 1972.
31. *Braitenberg V.*, *Onesto N.*, The Cerebellar Cortex as a Timing Organ. *Congress Inst. Medicina Cibernetica, First Naples Atti.*, 239—255, 1960.
32. *Brodal A.*, *Neurological Anatomy*, 2nd ed., Oxford University Press, 1969.
33. *Bronowski J.*, *Bellugi U.*, Language, Name and Concept, *Science*, **168**, 669—673 (1970).
34. *Brookhart J.*, Tutorial on the Cerebellum. NRP Conference on Information Processing in the Cerebellum, Salishan, Ore, 1967.
35. *Brooks V. B.*, Information Processing in the Motosensory Cortex. In: K. N. Leibovic, Ed., *Information Processing in the Nervous System*, New York, Springer-Verlag, 1969.
36. *Brown R.*, *Bellugi N.*, Three Processes in the Child's Acquisition of Syntax. In: E. H. Lenneberg, Ed., *New Directions in the Study of Language*, Cambridge, Mass., The MIT Press, 1964.
37. *Bullock T. H.*, Neuron Doctrine and Electrophysiology, *Science*, **129**, 997—1002 (1959).
38. *Bullock T. H.*, Transfer Functions at Synaptic Junctions. In: R. W. Gerard and J. W. Duff, Eds., *Information Processing in the Nervous System*, Vol. III, *Proc. XXII Internat. Congr. Physiol. Sci.*, Amsterdam, Excerpta Medica, pp. 98—108, 1962.
39. *Bullock T. H.*, *Horridge G. A.*, Structure and Function in the Nervous System of Invertebrates, Vol. I, San Francisco, W. H. Freeman, 1965.
40. *De Lisle Burns B.*, *The Uncertain Nervous System*, London, Edward Arnold, 1968.
41. *Cherry C.*, *On Human Communication*, New York, John Wiley and Sons, 1961.
42. *Chomsky N.*, *Syntactic Structures*, The Hague, Mouton, 1957.
43. *Chomsky N.*, *Aspects of the Theory of Syntax*, Cambridge, Mass, The MIT Press, 1965.
44. *Chomsky N.*, *Language and Mind*, New York, Harcourt Brace and World, 1968.
45. *Church J.*, *Language and the Discovery of Reality*, New York, Vintage Books, 1961.
46. *Cofer C. N.*, *Appley M. H.*, *Motivation: Theory and Research*, New York, John Wiley and Sons, 1964.

47. Colby K. M., Gilbert J. P., Programming a Computer Model of Neurosis, *J. Math. Psych.*, 1, 405—417 (1964).
48. Cragg B. G., Temperley H. N. V., The Organization of Neurons: A Cooperative Analogy, *EEG Clin. Neurophysiol.*, 6, 85—92 (1954).
49. Craik K. J. W., The Nature of Explanation, Cambridge University Press, 1943.
50. Craik K. J. W., The Mechanism of Human Action. In: S. L. Sherwood, Ed., The Nature of Psychology: A Selection of Papers, Essays and Other Writings by Kenneth. J. W. Craik, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 9—90, 1966.
51. Crosby E. C., Humphrey T., Lauer E. W., Correlative Anatomy of the Nervous System, New York, The Macmillan Company, 1962.
52. Dawson G. D., The Central Control of Sensory Inflow, *Proc. Roy. Soc. Med.*, 51 (7), 531—535 (1958).
53. Dell P., Reticular Homeostasis and Critical Reactivity. In: G. Moruzzi, A. Fessard and H. H. Jasper, Eds., Brain Mechanisms; Progress in Brain Research, 2, pp. 82—103 (Discussion: pp. 103—114), 1963.
54. Dennett D. C., Content and Consciousness, London, Routledge and Kegan Paul, 1969.
55. Denny-Brown D., The Cerebral Control of Movement: The Sherrington Lectures VIII, Springfield, Ill., Charles C Thomas, 1966.
56. Dertouzos M., PHASEPLOT: An On-line Graphical Display Technique. *IEEE Trans. Electron. Computers*, EC-16, 203—209 (1967).
57. Dertouzos M., Graham H. L., A Parametric Display Technique for On-line Use. *AFIPS Conf. Proc.*, 29 (1966 Fall Joint Computer Conf.), 201—209 (1966).
58. Deutsch J. A., The Structural Basis of Behaviour, Chicago, University of Chicago Press, 1960.
59. Didday R. L., The Simulation and Modelling of Distributed Information Processing in the Frog Visual System, Ph. D. Thesis, Information Systems Laboratory, Stanford University, August 1970.
60. Doran J., Michie D., Experiments with the Graph Traverser Program, *Proc. Roy. Soc. A*, 284, 235—259 (1966).
61. Dow R. S., Moruzzi G., The Physiology and Pathology of the Cerebellum, Minneapolis, University of Minnesota Press, 1958.
62. Duda R. O., Hart P. E., Experiments in Scene Analysis, *Proc. First Natl. Symp on Industrial Robots*, Chicago, Ill., April 2—3, 1970.
63. Duncan C. P., The Retroactive Effect of Electroshock on Learning, *J. Comp. Physiol. Psychol.*, 42, 32—44 (1949).
64. Eccles J. C., Ed., Brain and Conscious Experience, New York, Springer-Verlag, 1966.
65. Eccles J. C., Circuits in the Cerebellar Control of Movement, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 58, 336—343 (1967).
66. Eccles J. C., Ito M., Szentágothai J., The Cerebellum as a Neuronal Machine, New York, Springer-Verlag, 1967.
67. Ernst G. W., Newell A., GPS: A Gase Study in Generality and Problem Solving, New York, Academic Press, 1969.
68. Evans C. R., Robertson A. D. J., Eds., Cybernetics: Key Papers, Baltimore, Md., University Park Press, 1968.
69. Evars E. V., Bizzi E., Burke R. E., DeLong M., Thach W. T., Jr., Central Control of Movement, *Neurosci. Res. Prog. Bull.*, 9, 1—170 (1971).
70. Fair C. M., The Physical Foundations of the Psyche. Meddletown, Conn., Wesleyan University Press, 1963.
71. Feigenbaum E. A., Feldman J., Eds., Computers and Thought, New York, McGraw-Hill, 1964.
72. Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M., The Feynman Lectures on Physics, Vol. 3, Quantum Mechanics, Reading, Mass., Addison-Wesley, 1965.



- (Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс, Фейнмановские лекции по физике. Квантовая механика, изд-во «Мир», М., 1968. Изд. 3. М.: УРСС, 2004.)
73. *Fields J., Magoun H. W., Hall V. E., Eds.*, Handbook of Physiology, Section 1, Neurophysiology, Washington, D. C., American Physiological Society, 1959—1960.
  74. *Fite K.*, Single Unit Analysis of Binocular Neurons in the Frog Optic Tectum, *Exp. Neurol.*, 24, 475—480 (1969).
  75. *Flavell J. H.*, The Developmental Psychology of Jean Piaget, Princeton, N. J., Van Nostrand, 1963.
  76. *Friedman L.*, Instinctive Behavior and Its Computer Synthesis, *Behav. Sci.*, 12, 85 (1967).
  77. *Furth H. G.*, Piaget and Knowledge, Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 1969.
  78. *Gabor D., Kock W. E., Stroke G. W.*, Holography, *Science*, 173, 11—23 (1971).
  79. *Gardner A. R., Gardner B. T.*, Teaching Sing Language to a Chimpanzee, *Science*, 165, 664—672 (1969).
  80. *Gardner E.*, Fundamentals of Neurology, Philadelphia, W. B. Saunders, 1963.
  81. *Geschwind N.*, Disconnexion Syndromes in Animal and Man, Part I, *Brain*, 88, 237—295; Part II, *Brain*, 88, 585—644 (1965).
  82. *Geschwind N.*, The organization of Language and the Brain, *Science*, 170, 940—944 (1970).
  83. *Gibson J. J.*, The Senses Considered as Perceptual Systems, London, George Allen and Unwin, 1966.
  84. *Glaser E. M.*, The Physiological Basis of Habituation, Oxford, Oxford University Press, 1966.
  85. *Sir Gray J.*, Animal Locomotion, London, Weidenfeld and Nicholson, 1968.
  86. *Greene P. H.*, New Problems in Adaptive Control. In: J. T. Tou and R. H. Wilcox Eds., Computer and Information Sciences, Washington, Spartan, 1964.
  87. *Greene P. H.*, Models for Perception and Actions. Proceedings of the First Annual Princeton Conference on Information Sciences and Systems, Dept. of EE, Princeton University, 245—253.
  88. *Greene P. H.*, A. Essential Features of Purposive Movements, B. Cybernetic Problems of Sensorimotor Structure: Introductory Remarks and Survey of a Study; C. Seeking Mathematical Models of Skilled Actions; D. An Aspect of Robot Control and Nervous Control of Skilled Movements; Coordinator of Two Effectors and Transfer of Adaptation, Institute for Computer Research, Quarterly Progress Report No. 16, Sections III A—D, 1968.
  89. *Greene P. H.*, The Theory of Tasks: Cybernetic Problems of Sensorimotor Structure. Book in preparation (Preliminary material may be found in Greene, 1967/1968), 1970.
  90. *Greene P. H., Ruggles T.*, CHILD and SPOCK (Computer Having Intelligent Learning and Development; Simulated Procedure for Obtaining Common Knowledge), *IEEE Trans. on Military Electronics*, MIL-7, 156—159 (1963).
  91. *Gregory R. L.*, The Brain as an Engineering Problem. In: W. H. Thorpe and O. L. Zangwill, Eds., Current Problems in Animal Behaviour, Cambridge, Cambridge University Press, 1961.
  92. *Gregory R. L.*, Eye and Brain, the Psychology of Seeing, New York, McGraw-Hill, 1966.
  93. *Gregory R. L.*, On How So Little Information Controls So Much Behaviour. In: C. H. Waddington, Ed., Towards a Theoretical Biology, 2 Sketches, Edinburgh, Edinburgh University Press, 1969a.

94. *Gregory R. L.*, The Intelligent Eye, New York, McGraw-Hill, 1969b. (Р. Грегори, Разумный глаз, изд-во «Мир», М., 1972. Изд. 2. М.: УРСС, 2003.)
95. *Grossman S. P.*, A Textbook of Physiological Psychology, New York, John Wiley and Sons, 1967.
96. *Gurowitz E. M.*, The Molecular Basis of Memory, Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 1969.
97. *Guzman A.*, Some Aspects of Pattern Recognition by Computer, MAC-TR-37 (Thesis) MIT, 1967.
98. *Guzman A.*, Decomposition of a Visual Scene Into Three-dimensional Bodies, Proc. Fall Joint Comp. Conf., 291—304, 1968.
99. *Gyr J. W., Cafagna A. C., Brown J. S.*, Quasi-Formal Models of Inductive Behavior and Their Relation to Piaget's Theory of Cognitive Stages, Psychol. Rev., 1967.
100. *Gyr J. W., Brown J. S., Willey R., Zivian A.*, Computer Simulation and Psychological Theories of Perception, Psychol. Bull., 65, 174—192 (1966).
101. *Hanson N. R.*, Patterns of Discovery, Cambridge, Cambridge University Press, 1968.
102. *Hanson N. R.*, Observation and Explanation, New York, Harper Torch Books, 1971.
103. *Harmon L. D., Lewis E. R.*, Neural Modeling, Physiol. Rev., 46, 513—591 (1966).
104. *Harris D. B.*, Ed., The Concept of Development, Minneapolis, University of Minnesota Press, 1957.
105. *Hart P., Nilsson N., Raphael B.*, A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Trans. Syst. Sci. Cybernetics, SSC-4, 100—107 (1968).
106. *Hartline H. K.*, The Response of Single Optic Nerve Fibers of the Vertebrate Eye to Illumination of the Retina, Am. J. Physiol., 121, 400—415 (1938).
107. *Hebb D. O.*, The Organization of Behavior, New York, John Wiley and Sons, 1949.
108. *Held R.*, Plasticity in Sensory-motor Systems, Sci. Am., 213, 84—94 (1965).
109. *Held R., Hein A.*, Movement-Produced Stimulation in the Development of Visually Guided Behavior, J. Comp. Physiol. Psychol., 56, 872—876 (1963).
110. *Herrick C. J.*, Brains of Rats and Men, University of Chicago Press, 1926.
111. *Herrick C. J.*, The Thinking Machine, University of Chicago Press, 1929.
112. *Hildebrand M.*, How Animals Run, Sci. Am., 148—157 (1960).
113. *Hildebrand M.*, Symmetrical Gaits of Horses, Science, 150, 701—708 (1965).
114. *Hildebrand M.*, Analysis of the Symmetrical Gaits of Tetrapods, Fol. Biotheoretica, IV, 9—22 (1966).
115. *Hinde R. A.*, Animal Behaviour: A Synthesis of Ethology and Comparative Psychology, 2nd ed., New York, McGraw-Hill, 1970.
116. *Hodgkin A. L.*, The Conduction of the Nervous Impulse, Springfield, Ill., Charles C Thomas, 1964. (А. Ходжкин, Нервный импульс, изд-во «Мир», М., 1965.)
117. *Hormann A. M.*, Programs for Machine Learning, Parts I and II, Inform. Control, 5, 347—367; 7, 55—77 (1962, 1964).
118. *Adrian Horridge G.*, Interneurons — Their Origin, Action, Specificity, Growth, and Plasticity, London and San Francisco, W. H. Freeman, 1968.
119. *Hubel D. H., Wiesel T. N.*, Receptive Fields, Binocular Interaction and Functional Architecture in the Cat's Visual Cortex, J. Physiol., 160, 106—154 (1962).
120. *Hubel D. H., Wiesel T. N.*, Receptive Fields and Functional Architecture in Two Non-Striate Areas (18 and 19) of the Cat, J. Neurophysiol., 28, 229—289 (1965).
121. *Hubel D. H., Wiesel T. N.*, Receptive Fields and Functional Architecture of Monkey Striate Cortex, J. Physiol., 195, 215—243 (1968).

122. *Huffman D. A.*, Impossible Objects as Nonsense Sentences. In: B. Meltzer and D. Michie, Eds., *Machine Intelligence*, Edinburgh University Press, Vol. 6, pp. 295—323 (1971).
123. *Humphrey N. K.*, What the Frog's Eye Tells the Monkey's Brain, *Brain Behav. Evol.*, 3, 324—337 (1970).
124. *Ingle D.*, Visual Releasers of Prey-Catching Behavior in Frogs and Toads, *Brain Behav. Evol.*, 1, 500—518 (1968).
125. *Ingle D.*, *Schneider G. E.*, Eds., *Subcortical Visual Systems*, Published as *Brain Behaviour and Evolution*, 3, Nos. 1—4 (1970).
126. *Ingle D.*, *Schneider G. E.*, *Trevarthen C. B.*, *Held R.*, Locating and Identifying: Two Modes of Visual Processing (A Symposium), *Psychol. Forsch.*, 31, Nos. 1 and 4 (1967).
127. *Jacobson M.*, *Developmental Neurobiology*, New York, Holt, Rinehart and Winston, 1970.
128. *Roy John E.*, *Mechanisms of Memory*, New York, Academic Press, 1967.
129. *Johnson A. R.*, A Structural Preconscious Piaget: Heed Without Habit, Proc. National Electronics Conf., XXIII, 29—32 (1967).
130. *Jouvet M.*, The States of Sleep, *Sci. Am.*, 216 (2), 62—72, Feb. 1967.
131. *Kagan J.*, Attention and Psychological Change in the Young Child, *Science*, 170, 826—832 (1970).
132. *Kalman R. E.*, *Falb P. L.*, *Arbib M. A.*, *Topics in Mathematical System Theory*, New York, McGraw-Hill, 1969.  
(Р. Калман, П. Фалб, М. Арбиб, Очерки по математической теории систем, изд-во «Мир», М., 1971.)
133. *Kandel E. R.*, *Frazier W. T.*, *Coggeshall R. E.*, Opposite Synaptic Actions Mediated by Different Branches of an Identifiable Interneuron in *Aplysia*, *Science*, 155, 346—349 (1967).
134. *Katz B.*, *Nerve, Muscle and Synapse*, New York, McGraw-Hill, 1966.  
(Б. Катц, Нерв, мышца и синапс, изд-во «Мир», М., 1968.)
135. *Keating M. J.*, *Gaze R. M.*, Rigidity and Plasticity in the Amphibian Visual System, *Brain Behav. Evol.*, 3, 102—120 (1970).
136. *Kilmer W. L.*, *McLardy T.*, Hippocampal Circuitry, *Am. Psychol.*, 25, 563—566 (1970).
137. *Kilmer W. L.*, *McCulloch W. S.*, *Blum J.*, Some Mechanisms for a Theory of the Reticular Formation. In: M. Mesarovic, Ed., *Systems Theory and Biology*, New York, Springer-Verlag, pp. 286—375, 1968.
138. *Kilmer W. L.*, *McCulloch W. S.*, *Blum J.*, A Model of the Vertebrate Central Command System, *Int. J. Man-Machine Studies*, 1, 279—309 (1969).
139. *Kimble D. P.*, Ed., *Experience and Capacity*, New York, New York Academy of Science, 1968.
140. *Klein F.*, *Elementary Mathematics from an Advanced Standpoint: Geometriy*. (Ф. Клейн, Элементарная математика с точки зрения высшей, М., 1968.)
141. *Klir G. J.*, *An Approach to General Systems Theory*, New York, Van Nostrand Reinhold, 1969.
142. *Konorski J.*, *Integrative Activity of the Brain*, Chicago, University of Chicago Press, 1967. (Ю. Конорски, Интегративная деятельность мозга, изд-во «Мир», М., 1970.)
143. *Krieg W. J. S.*, *Brain Mechanisms in Diachrome*, 2nd ed., Brain Books, Box 9, Evanston, Ill., 1957.
144. *Kuffler S.*, Discharge Patterns and Functional Organization of Mammalian Retina, *J. Neurophysiol.*, 16, 37—68 (1953).
145. *Kuhn T. S.*, *The Structure of Scientific Revolutions*, 2nd ed., Chicago, University of Chicago Press, 1970.
146. *Lashley K. S.*, *Brain Mechanisms in Intelligence*, Chicago, University of Chicago Press, 1929. (Reprinted 1963 with a new introduction by D. O. Hebb, Dover, New York.)

147. *Lashley K. S.*, The Problem of Serial Order in Behavior. In: L. A. Jeffress, Ed., *Cerebral Mechanisms in Behavior: The Hixon Symposium*, New York, John Wiley and Sons, pp. 112—136 (Discussion, 136—146), 1951.
148. *Lenneberg E. H.*, *Biological Foundations of Language*, New York, John Wiley and Sons, 1967.
149. *Lettvin J. Y.* et al., Two Remarks on the Visual System of the Frog. In: W. Rosenblith, Ed., *Sensory Communication*, Cambridge, Mass., The MIT Press, p. 755, 1961.  
(Теория связи в сенсорных системах, изд-во «Мир», М., 1964, стр. 416.)
150. *Lettvin J. Y.*, *Maturana H.*, *McCulloch W. S.*, *Pitts W. H.*, What the Frog's Eye Tells the Frog's Brain, *Proc. IRE*, 47, 1940—1951, 1959.
151. *Livingston R. B.*, Goal-Seeking Controls Affecting Both Motor and Sensory Systems, *Int. J. Neurol.*, 4 (1), 39—59 (1963).
152. *Loehlin J. C.*, *Computer Models of Personality*, New York, Random House, 1968.
153. *Лурия А. Р.*, *Higher Cortical Functions in Man*, New York, Basic Books, 1966.
154. *Лурия А. Р.*, *The Mind of a Mnemonist*, New York, Basic Books, 1968.
155. *MacKay D. M.*, The Epistemological Problem for Automata. In: C. E. Shannon and J. McCarthy, Eds., *Automata Studies*, Princeton, N. J., Princeton University Press, pp. 235—251, 1955.
156. *MacKay D. M.*, Internal Representation of the External World, AGARD Symposium on Natural and Artificial Logic Processors, Athens, mimeographed, 14 pages, 1963.
157. *MacKay D. M.*, *Cerebral Organization and the Conscious Control of Action*. In: J. C. Eccles, Ed., *Brain and Conscious Experience*, New York, Springer-Verlag, pp. 422—445, 1966.
158. *Magoun H. W.*, *The Waking Brain*, Springfield, Ill., Charles C Thomas, 1963. (Г. Мэгуи, Бодрствующий мозг, изд-во «Мир», М., 1965.)
159. *Marler P.*, Birdsong and Speech Development: Can There be Parallels? *Am. Sci.*, 58, 669—673 (1970).
160. *Marr D.*, A Theory of Cerebellar Cortex? *J. Physiol.*, 202, 437—470 (1969).
161. *Martin J.*, *Norman A. R. D.*, *The Computerized Society*, Englewood Cliffs, N. J. Prentice-Hall, 1970.
162. *McCulloch W. S.*, *Embodiments of Mind*, Cambridge, Mass., The MIT Press, 1965.
163. *Merton P. A.*, Speculations on the Servo-Control of Movement. In: *The Spinal Cord*, A CIBA Foundation Symposium, J. and A. Churchill, Ltd., London, pp. 247—255 (Discussion, 255—260), 1953.
164. *Mesarovic M.*, ed., *Systems Theory and Biology*, New York, Springer-Verlag, 1968. (См. кн. «Системные исследования». Ежегодник, изд-во «Наука», М., 1970.)
165. *Michie D.* et al., *Machine Intelligence*, Vols. 1—6, Edinburgh University Press, 1967.
166. *Milthorn H. T., Jr.*, *The Application of Control Theory to Physiological Systems*, Philadelphia, London, W. B. Saunders, 1966.
167. *Miller G. A.*, *Galanter E.*, *Pribram K. H.*, *Plans and the Structure of Behavior*, New York, Henry Holt and Co., 1960.
168. *Milner P. M.*, *Physiological Psychology*, New York, Holt, Rinehart and Winston, 1970. (Р. Милнер, Физиологическая психология, изд-во «Мир», М., 1973.)
169. *Mitsum J. H.*, *Biological Control Systems Analysis*, New York, McGraw-Hill, 1966. (Дж. Милсум, Анализ биологических систем управления, изд-во «Мир», М., 1968.)
170. *Minsky M. L.*, Steps Toward Artificial Intelligence, *Proc. IRE*, 49, 8—30 (1961).

171. *Minsky M. L.*, Matter, Mind and Models. In: W. A. Kalenich, Ed., Information Processing 1965, Proceedings of IFIP Congress 65, Vol. I, Washington, D. C., Spartan Books, pp. 45—49 (1965).
172. *Minsky M. L.*, Ed., Semantic Information Processing, Cambridge, Mass., The MIT Press, 1968.
173. *Mittelstaedt H.*, Control Systems of Orientation in Insects, Ann. Rev. Entomol., 7, 177—198 (1962).
174. *Mountcastle V. B.*, Ed., Medical Physiology, 12th ed., Vol. II, St. Louis, The C. V. Mosby Co., 1968.
175. *Murray E. J.*, Motivation and Emotion, Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 1964.
176. *Narasimhan R.*, Syntactic Descriptions of Pictures and Gestalt Phenomena of Visual Perception. Report No. 142, Digital Computer Laboratory, University of Illinois, Urbana, Ill., 1963.
177. *Narasimhan R.*, Picture Languages. Technical Report No. 75, Computer Group, Tata Institute of Fundamental Research, Bombay, 1969.
178. *Nauta W. J. H.*, Central Nervous Organization and the Endocrine Nervous System. In: A. V. Nalbandov, Ed., Advances in Neuroendocrinology, pp. 5—21, 1963.
179. *Nauta W. J. H.*, *Karten H. J.*, A General Profile of the Vertebrate Brain, with Sidelights on the Ancestry of Cerebral Cortex, in Schmitt, pp. 7—26, 1970.
180. *Navas F.*, *Stark L.*, Sampling or Intermittency in Hand Control System Dynamics, Biophys. J., 8, 252—302 (1968).
181. *Neisser U.*, Cognitive Psychology, New York, Appleton-Century-Crofts, 1967.
182. *Netter F. H.*, Nervous System, Vol. I, The Ciba Collection of Medical Illustration, Summit, N. J., CIBA, 1962.
183. *Newell A.*, *Shaw J. C.*, *Simon H. A.*, Report on a General Problem-Solving Program. Pro. Int. Conf. Inf. Processing, UNESCO House, Paris, pp. 256—264, 1959.
184. *Newell A.*, *Shaw J. C.*, *Simon H. A.*, A Variety of Intelligent Learning in a General Problem Solver. In: M. Yovitts and S. Cameron, Eds., Self-Organizing Systems, New York, Pergamon, pp. 153—189, 1960.
185. *Newell A.*, *Simon H. A.*, Human Problem Solving, Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 1972.
186. *Nilsson N. J.*, Learning Machines, New York, McGraw-Hill, 1965. (Н. Нильсон, Обучающиеся машины, изд-во «Мир», М., 1967.)
187. *Nilsson N. J.*, Problem-Solving Methods in Artificial Intelligence, New York, McGraw-Hill, 1971.
188. *Nilsson N. J.*, *Raphael B.*, Preliminary Design of an Intelligent Robot, Comp. Inf. Sci., 11, 235—259 (1967).
189. *Norman D. A.*, Memory and Attention, New York, John Wiley and Sons, 1969.
190. *Noton D.*, A Theory of Visual Pattern Perception, IEEE Trans. Systems Sci. Cybernet., SSC-6, 349—357 (1970).
191. *Noton D.*, *Stark L.*, Scanpaths in Eye Movements During Pattern Perception, Science, 171, 308—311 (1971).
192. *Noton D.*, *Stark L.*, Eye Movements and Visual Perception, Sci. Am., 224 (2), 34—43 (1971).
193. *Ochs S.*, Elements of Neurophysiology, New York, John Wiley and Sons, 1965. (С. Окс, Основы нейрофизиологии, изд-во «Мир», М., 1969.)
194. *Olds J.*, The Central Nervous System and the Reinforcement of Behaviour, Am. Psychol., 24, 114—132 (1969).
195. *Paillard J.*, The Patterning of Skilled Movements, Handbook of Physiology, Section I, Neurophysiology, 3, 1679—1708 (1960).

196. *Papert S.*, Etude comparée de l'intelligence chez l'enfant et chez le robot. La Filiation des Structures. Etudes d'Epistémologie Génétique, XV, Paris, Presses Universitaires de France, 1963.
197. *Peters R. S.*, The Concept of Motivation, London, Routledge and Kegan Paul, 1968.
198. *Phillips C. G.*, Changing Concepts of the Precentral Motor Area. In: J. C. Eccles, Ed., Brain and Conscious Experience. New York, Springer-Verlag, pp. 389—421, 1966.
199. *Piaget J.*, Judgment and Reasoning in the Child, London, Routledge and Kegan Paul, 1928.
200. *Piaget J.*, The Construction of Reality in the Child, New York, Basic Books, 1954.
201. *Pinneo L. R.*, Electrical Control of Behavior by Programmed Stimulation of the Brain, *Nature*, 211, 705—708 (1966).
202. *Pitts W. H.*, *McCulloch W. S.*, How We Know Universals: The Perception of Auditory and Visual Forms, *Bull. Math. Biophys.*, 9, 127—147 (1947).
203. *Pribram K.*, The Neurophysiology of Remembering, *Sci. Am.*, January 1969.
204. *Pribram K.*, The Languages of the Brain, Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 1971.
205. *Pylyshyn Z. W.*, Ed., Perspectives on the Computer Revolution, Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 1970.
206. *Quartermain D.*, *Paolino R. M.*, *Miller N. E.*, A Brief Temporal Gradient of Retrograde Amnesia Independent of Situational Change, *Science*, 149, 1116—1118 (1965).
207. *Quarton G. C.*, *Melnechuk T.*, *Schmitt F. O.*, Eds., The Neurosciences: A Study Program, New York, Rockefeller University Press, 1967.
208. *Quillian M. R.*, *Wortman P. M.*, *Baylor G. W.*, The Programmable Piaget: Behavior from the Standpoint of a Radical Computerist. Dittoed Memorandum, Cambridge, Mass., 1965.
209. *Rall W.*, Dendritic Neuron Theory and Dendrodendritic Synapses in a Simple Cortical System, in Schmitt, pp. 552—565, 1970.
210. *Ramon-Moliner E.*, An Attempt at Classifying Nerve Cells on the Basis of Their Dendritic Patterns, *J. Comp. Neur.*, 119, 211—227 (1962).
211. *Ransmeier R. E.*, *Gerard R. W.*, Effects of Temperature, Convulsion and Metabolic Factors on Rodent Memory and EEG, *Am. J. Physiol.*, 179, 663—664 (1954).
212. *Ranson S. W.*, *Clark S. L.*, The Anatomy of Nervous System: Its Development and Function, 10th ed., Philadelphia, W. B. Saunders, 1959.
213. *Reitman W.*, Cognition and Thought, New York, John Wiley and Sons, 1965.
214. *Roberts L. G.*, Machine Perception of 3-Dimensional Solids. Lincoln Laboratory, MIT, Tech. Rept. No. 315 (1963).
215. *Roberts T. D. M.*, Neurophysiology of Postural Mechanisms, London, Butterworths, 1967.
216. *Robinson D. A.*, The Oculomotor Control System: A Review, *Proc. IEEE*, 56 (6), 1032—1049 (1968).
217. *Romer A. S.*, The Vertebrate Body, 4th ed., Philadelphia, W. B. Saunders, 1970.
218. *Rosen C. A.*, Machines that Act Intelligently, *Sci. J.*, 109—114 (1968).
219. *Rosen R.*, Dynamical System Theory in Biology, New York, Wiley—Interscience, 1970.
220. *Roszak T.*, The Making of a Counterculture, Garden City, N. Y., Doubleday, 1969.
221. *Samuel A. L.*, Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers, *IBM J. Res. and Dev.*, 3, 210—229 (1959).

222. *Samuel A.*, Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers II, Recent Progress, IBM J. Res. and Dev., 11, 601—617 (1967).
223. *Scheibel M. E., Scheibel A. B.*, The Brain Stem Core — An Integrative Matrix. In: M. Mesarovic, Ed., Systems Theory and Biology, New York, Springer-Verlag, pp. 261—285, 1968.
224. *Scheibel M. E., Scheibel A. B.*, Terminal Patterns in Cat Spinal Cord III, Primary Afferent Collaterals, Brain Res., 13, 417—433 (1969).
225. *Scheibel M. E., Scheibel A. B.*, Elementary Processes in Selected Thalamic and Cortical Subsystems — The Structural Substrates, in Schmitt, pp. 443—457, 1970.
226. *Schmitt F. O.*, Editor-in-Chief, The Neurosciences Second Study Program, New York, The Rockefeller University Press, 1970.
227. *Schneider G. E.*, Two Visual Systems, Science, 163, 895—902 (1969).
228. *Shepard R., Metzler J.*, Mental Rotations of Three-Dimensional Objects, Science (1970).
229. *Sholl D. A.*, The Organization of the Cerebral Cortex, Oxford University Press, 1956.
230. *Simon H. A.*, Motivational and Emotional Controls of Cognition, Psych. Rev., 74, 29—39 (1967).
231. *Simon H. A.*, The Sciences of the Artificial, Cambridge, Mass., The MIT Press, 1969. (Г. Саймон, Науки об искусственном, изд-во «Мир», 1972.)
232. *Simon H. A., Barenfeld M.*, Information-Processing Analysis of Perceptual Processes in Problem-Solving, Psych. Rev., 76, 473—483 (1969).
233. *Slagle J.*, Artificial Intelligence: The Heuristic Programming Approach, New York, McGraw-Hill, 1971.
234. *Smart J. J. C.*, Philosophy and Scientific Realism, London, Routledge and Kegan Paul, 1963.
235. *Smythies J. R.* ed., Brain and Mind, London, Routledge and Kegan Paul, 1965.
236. *Соколов Е. Н.*, Восприятие и условный рефлекс, Изд-во МГУ, М., 1958.
237. *Sperry R. W.*, Mechanisms of Neural Maturation. In: S. S. Stevens, Ed., Handbook of Experimental Psychology, New York, John Wiley and Sons, pp. 236—280, 1951. (Экспериментальная психология, ИЛ, М., 1960.)
238. *Sperry R. W.*, Brain Bisection and Consciousness. In: J. C. Eccles, Ed., Brain and Conscious Experience, New York, Springer-Verlag, pp. 298—313, 1966.
239. *Szentagothai J.*, Structuro-functional Considerations of the Cerebellar Neuron Network, Proc. IEEE, 56 (6), 960—968 (1968).
240. *Talland G. A.*, Disorders of Memory and Learning, Baltimore, Md., Penguin, 1968.
241. *Teuber H. L.*, Perception, Handbook of Physiology: Section I, Neurophysiology, III, 1595—1668 (1960).
242. *Тихомиров О. К., Познанская Э. Д.*, Исследование зрительного поиска как путь к анализу эвристики. Вопросы психологии, № 4, 39—53 (1966).
243. *Tomkins S. S., Messick S.* eds., Computer Simulation of Personality, New York, John Wiley and Sons, 1963.
244. *Trevarthen C. B.*, Two Mechanisms of Vision in Primates, Psychol. Forsch., 31, 299—337 (1968).
245. *Tricker R. A. R., Tricker B. J. K.*, The Science of Movement, New York, American Elsevier, 1967.
246. *Turbayne C. M.*, The Myth of the Metaphor, rev. ed., Columbia, S. C., University of South Carolina Press, 1970.
247. *Turing A. M.*, Computing Machinery and Intelligence, Mind, 59, 433—460 (1950).
248. *Uhr L.*, Ed., Pattern Recognition, New York, John Wiley and Sons, 1966.

249. *Uhr L., Vossler C.*, A Pattern Recognition Program that Generates, Evaluates and Adjusts Its Own Operators, Proc. Western Joint Computer Conference, pp. 555—569, 1961.
250. *Von Holst E., Mittelstaedt H.*, Das Refferenzprinzip, *Naturwiss.*, 37, 464—476.
251. *Von Neumann J.*, The Computer and the Brain, New Haven, Conn., Yale University Press, 1958.
252. *Weiss P.*, Self-Differentiation of the Basic Patterns of Coordination, Comparative Psychology Monographs, Serial No. 88, 17, No. 4 (1941).
253. *Werner G.*, The Topology of the Body Representation in the Somatic Afferent Pathway in Schmitt, pp. 605—617, 1970.
254. *Westlake P. R.*, The Possibilities of Neural Holographic Processes within the Brain, *Kybernetik*, 7, 129—153 (1970).
255. *Whitfield I. C.*, The Auditory Pathway, London, Edward Arnold, 1967.
256. *Wiener N.*, Cybernetics, Cambridge, Mass., The Technology Press, 1948.
257. *Wiener N.*, Cybernetics, 2nd ed., Cambridge, Mass., The MIT Press, 1961.
258. *Wilson D. M.*, Insect Walking, *Ann. Rev. Entomol.*, 11, 103—121 (1966).
259. *Wilson D. M.*, Stepping Patterns in Tarantula Spiders, *J. Exp. Biol. Gr. Br.*, 47, 133—157 (1967).
260. *Winograd T.*, Procedures as a Representation for Data in a Computer Program for Understanding Natural Languages. Report MAC TR-84, Cambridge, Mass., Project MAC, MIT, 1971.
261. *Winograd S., Cowan J. D.*, Reliable Computation in the Presence of Noise, Cambridge, Mass., The MIT Press, 1963.
262. *Winston P. H.*, Learning Structural Descriptions from Examples, Report MAC TR-76, Cambridge, Mass., Project MAC, MIT, 1970.
263. *Woodridge D. E.*, The Machinery of the Brain, New York, McGraw-Hill, 1963. (Д. Вудридж, Механизмы мозга, изд-во «Мир», М., 1965.)
264. *Wymore A. W.*, A Mathematical Theory of Systems Engineering, New York, John Wiley and Sons, 1967.
265. *Young J. Z.*, A Model of the Brain, Oxford University Press, 1964.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

О серии «Науки об искусственном» . . . . .	1
ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ . . . . .	5
ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ АВТОРА . . . . .	11
<b>ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. ВВЕДЕНИЕ</b>	
<b>ГЛАВА 1. МОЗГ, ПОВЕДЕНИЕ И МЕТАФОРА . . . . .</b>	<b>15</b>
1.1. Эволюционная и кибернетическая метафоры . . . . .	17
1.2. Что означает «понять принципы работы мозга»? . . . . .	22
<b>ГЛАВА 2. ДЕЕНАПРАВЛЕННОЕ КОДИРОВАНИЕ И НЕЙРОННЫЕ СЕТИ . . . . .</b>	<b>31</b>
2.1. Деенаправленное восприятие . . . . .	32
2.2. Мозг как нейронная сеть . . . . .	37
2.3. Отступление. Некоторые сведения о строении мозга . . . . .	53
2.4. Предварительная обработка зрительной информации у кошки и лягушки . . . . .	64
<b>ЧАСТЬ ВТОРАЯ. ТЕОРИЯ СИСТЕМ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ</b>	
<b>ГЛАВА 3. ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ СИСТЕМ . . . . .</b>	<b>84</b>
3.1. Состояния . . . . .	85
3.2. Алгоритмы . . . . .	100
3.3. Обратная связь . . . . .	104
3.4. Адаптация . . . . .	116
<b>ГЛАВА 4. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ РОБОТОВ . . . . .</b>	<b>126</b>
4.1. Внутренние модели и разум . . . . .	127
4.2. Планирование и эвристический поиск . . . . .	138
4.3. Анализ обстановки . . . . .	155
4.4. Конструирование интегрального робота . . . . .	166
<b>ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ. ТЕОРИЯ МОЗГА</b>	
<b>ГЛАВА 5. НЕЙРОННАЯ РЕГУЛЯЦИЯ ДВИЖЕНИЯ . . . . .</b>	<b>175</b>
5.1. Обратная связь и спинной мозг . . . . .	176
5.2. Еще одно отступление. Нейроанатомия двигательной системы . . . . .	187
5.3. Ходьба . . . . .	199
5.4. Иерархическая структура управления двигательной системой . . . . .	204
5.5. Распределенное (distributed) двигательное управление . . . . .	214
<b>ГЛАВА 6. МНОГОСЛОЙНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПАМЯТИ И ВОСПРИЯТИЯ . . . . .</b>	<b>227</b>
6.1. Принципы организации . . . . .	227
6.2. Комплексы выходных признаков . . . . .	237
6.3. Преобразования и соматотопическая организация . . . . .	248
6.4. Голографическая метафора . . . . .	259
<b>ГЛАВА 7. УСТРАНЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ КОМАНД . . . . .</b>	<b>268</b>
7.1. Модель ретикулярной формации . . . . .	269
7.2. Визуomotorная активность лягушки . . . . .	276
7.3. Некоторые точки соприкосновения . . . . .	282
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ . . . . .</b>	<b>285</b>

## Издательство УРСС

специализируется на выпуске учебной и научной литературы, в том числе монографий, журналов, трудов ученых Российской Академии наук, научно-исследовательских институтов и учебных заведений.



### Уважаемые читатели! Уважаемые авторы!

Основываясь на широком и плодотворном сотрудничестве с Российским фондом фундаментальных исследований и Российским гуманитарным научным фондом, мы предлагаем авторам свои услуги на выгодных экономических условиях. При этом мы берем на себя всю работу по подготовке издания — от набора, редактирования и верстки до тиражирования и распространения.

Среди вышедших и готовящихся к изданию книг мы предлагаем Вам следующие:

#### Серия «Науки об искусственном»

*Гаазе-Рапопорт М. Г., Поспелов Д. А.* От мысли до робота: модели поведения.

*Саймон Г.* Науки об искусственном.

*Тарасов В. Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика.

*Калман Р., Фалб П., Арbib М.* Очерки по математической теории систем.

*Жилин Д. М.* Теория систем: опыт востроения курса.

*Тарасевич Ю. Ю.* Математическое и компьютерное моделирование.

*Тарасевич Ю. Ю., Перколяция.* Теория, приложения, алгоритмы.

*Плохотников К. Э.* Математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

*Мышкис А. Д.* Элементы теории математических моделей.

*Ворожцов А. В.* Путь в современную информатику.

*Поталова Р. К.* Речь: коммуникация, информация, кибернетика.

*Поталова Р. К.* Тайны современного Кентавра. Речевое взаимодействие.

*Поталова Р. К.* Новые информационные технологии и лингвистика.

*Поталова Р. К.* Речевое управление роботом.

*Ханский Н., Миллер Дж.* Введение в формальный анализ естественных языков.

*Бахтияров К. И.* Логика с точки зрения информатики.

Организационное управление и искусственный интеллект. Под ред. *Арлазарова В. Л.*

Управление информационными потоками. Под ред. *Арлазарова В. Л., Емельянова Н. Е.*

*Попков Ю. С.* Теория макросистем. Равновесные модели.

*Вайдлик В.* Социодинамика: системный подход к математическому моделированию социальных наук.

Информационные технологии и вычислительные системы. Гл. ред. *Емельянов С. В.*  
№ 2-3, 2002, № 1-4, 2003.

Социальная информатика: основания, методы, перспективы. Под ред. *Лапина Н. И.*

*Закреский А. Д.* Логика распознавания.

*Капун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А.* ANSYS в руках инженера.

*Поппер К. Р.* Объективное знание. Эволюционный подход.

По всем вопросам Вы можете обратиться к нам:  
тел./факс (095) 135-42-16, 135-42-46  
или электронной почтой [URSS@URSS.ru](mailto:URSS@URSS.ru)  
Полный каталог изданий представлен  
в Интернет-магазине: <http://URSS.ru>

**Издательство УРСС**

Научная и учебная  
литература



Представляет Вам свои лучшие книги:

*Николлс Дж. Г., Мартин А. Р., Валлас Б. Дж., Фукс П. А.*

### ОТ НЕЙРОНА К МОЗГУ

Цель нового издания знаменитой и ставшей классической в нейробиологии книги «От нейрона к мозгу» осталась той же, что и в первом издании, написанном 25 лет назад. В предисловии к этой книге цель декларирована как: «описать способы передачи сигналов нервными клетками, как сигналы анализируются и как на основе этой интеграции возникают высшие функции мозга. Книга предназначена читателю без специального образования, который интересуется принципами работы нервной системы». В новом издании четыре широко известных нейробиолога в том же ясном стиле описывают существующие факты, методические подходы и концепции, делая упор на экспериментальные данные, как классические, так и самые современные. Фактически более чем на три четверти это совершенно новая книга, так как бурный рост науки о мозге привел к удивительным открытиям в последние десятилетия. Книга снабжена огромным количеством иллюстраций, просто и четко излагаются не только каждая проблема, но и откуда она появилась, как связана с другими вопросами нейробиологии. Очень приятной особенностью книги является то, что авторы не опускают спорные вопросы, четко описывают альтернативные точки зрения и не стесняются сказать, что многие основные проблемы в настоящее время не решены.

Первое издание книги было переведено и стало настольным справочником по основным вопросам физиологии мозга для нескольких поколений русскоязычных исследователей. Первое издание входит как рекомендованная литература практически во все курсы, касающиеся работы мозга, для студентов медицинских и биологических вузов России. Надеемся, что новое полностью переработанное современное издание займет такое же место.

*Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р.* Физика процессов эволюции.

*Кожедуб Р. Г.* Мембранные и синаптические модификации в проявлениях основных принципов работы головного мозга.

*Гамов Г., Ичас М.* Мистер Томкингс внутри себя: Приключения в новой биологии.

*Блюменфельд Л. А.* Решаемые и нерешаемые проблемы биологической физики.

*Барышников А. Ю., Шишкин Ю. В.* Иммунологические проблемы апоптоза.

*Крутько В. Н., Славин М. Б., Смирнова Т. М.* Математические основания геронтологии.

*Шлегель Г. Г.* История микробиологии.

*Лотова Л. И.* Морфология и анатомия высших растений.

Методология биологии: новые идеи. Под ред. *Баксанского О. Е.*

*Вязлов Е. Д.* Информационные ресурсы о состоянии природной среды.

*Новиков Г. Г.* Рост и энергетика развития костистых рыб в раннем онтогенезе.

*Малиновский А. А.* Тектология. Теория систем. Теоретическая биология.

Физиотерапия: глоссарий текстовых ковенций (испанский, английский, французский, русский). В 2 томах. Под ред. *Львовской З. Д.*

*Нейман Б. А.* Программное регулирование организма. Гомеопатия.

*Леках В. А.* Ключ к пониманию физиологии.



Представляет Вам свои лучшие книги:



*Галимов Э. М.*

**Феномен жизни**

*Между равновесием и нелинейностью*

*Происхождение и принципы эволюции*

Книга посвящена одной из наиболее фундаментальных проблем естествознания — проблеме происхождения жизни и законам ее эволюции. В настоящее время дарвинизм не дает исчерпывающего знания проблем эволюции, в частности, не помогает понять механизм зарождения жизни. Э. М. Галимов в своей концепции предлагает решение, основанное на нетрадиционном рассмотрении процесса производства упорядочения в рамках линейной равновесной термодинамики. Сформулированная модель позволяет конкретизировать требования к содержанию химических форм начальной эволюции. В соответствии с ней не рибонуклеиновые кислоты (РНК) или полипептиды, как принято, а молекула аденозинтрифосфата (АТФ) находится в истоке химического эволюционного процесса, приводящего к возникновению живого. Автор рассматривает геологические условия первичного синтеза АТФ на Земле, в том числе, возможность первичной восстановительной атмосферы. Он доказывает, что наряду с известными свойствами живых систем: открытостью, неравновесностью и стационарностью, принципиально важны и свойства итеративности и линейности. В этой связи обсуждается возникновение и генетического кода. Из авторской концепции вытекают принципы биологической эволюции, которые предполагают заметное место в эволюции комбинаторного видообразования, горизонтального переноса генов. С точки зрения предлагаемой концепции автор анализирует роль мутации, естественного отбора и других аспектов эволюции.

*Пригожин И. От существующего к возникающему.*

*Табор М. Хаос и интегрируемость в нелинейной динамике.*

*Олемской А. И., Кацельсон А. А. Синергетика конденсированной среды.*

*Магницкий Н. А., Сидоров С. В. Новые методы хаотической динамики.*

Серия «Синергетика: от прошлого к будущему»

*Трубецков Д. И. Введение в синергетику. Колебания и волны.*

*Арнольд В. И. Теория катастроф.*

*Малинецкий Г. Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент.*

*Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. Современные проблемы нелинейной динамики.*

*Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетика и прогнозы будущего.*

*Баранцев Р. Г. и др. Асимптотология — путь к целостной простоте.*

*Пригожин И., Стенгерс И. Время. Хаос. Квант. К решению парадокса времени.*

*Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой.*

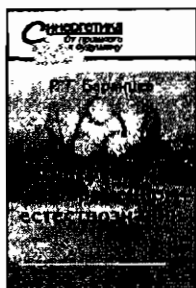
*Пригожин И., Николис Г. Познание сложного. Введение.*

*Пригожин И., Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций.*



Представляет Вам свои лучшие книги:

Серия «Синергетика: от прошлого к будущему»



*Баранцев Р. Г.*

**Синергетика в современном естествознании**

Синергетический подход, который воссоздает целостностное представление о мире, позволяет компактно изложить законы развития, являющиеся общими для природы, человека и общества.

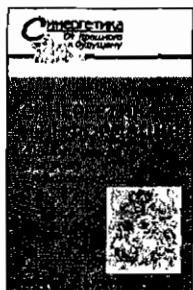
Книга написана на материале лекционного курса, который читается автором на гуманитарных факультетах Санкт-Петербургского государственного университета. Курс построен на основе тернарной методологии, развиваемой автором в течение последних десятилетий. Эта методология опирается на новые идеи в асимптотической математике и

находит плодотворное применение в синергетике.

*Чернавский Д. С.*

**Синергетика и информация  
(динамическая теория информации)**

В книге обсуждаются особенности синергетики как науки и ее математические и методологические аспекты. Отображены процессы возникновения информации и эволюции ее ценности. В качестве примеров рассмотрены: вопрос о происхождении жизни и генетического кода, проблема развития организма, а также процессы мышления и творчества. Широко используется метод математического моделирования. Для облегчения восприятия приведено краткое изложение основ теории динамических систем в форме, доступной для людей, не имеющих специального математического образования.



*Трубецков Д. И.*

**Введение в синергетику. Хаос и структуры**

Современная наука о колебаниях и волнах представлена в книге своими эффектами и явлениями, встречающимися в медицине, химии, экологии, гидродинамике, электронике, экономике, социальных и других науках. Цель книги — показать, что такие понятия, как колебания и волны, неустойчивость и нелинейность, хаос и структуры позволяют понять единство современной картины мира. В книге также показано, как связанные с этими понятиями идеи проникают в разные науки.

Особое внимание уделено хаосу и структурам — центральным темам синергетики. Книга представляет самостоятельный интерес, но может рассматриваться и как продолжение книги Д. И. Трубецкого «Введение в синергетику. Колебания и волны» (М.: УРСС, 2003).



Представляет Вам свои лучшие книги:



*Брайан Грин*

### ЭЛЕГАНТНАЯ ВСЕЛЕННАЯ

**Суперструны, скрытые размерности  
и поиски окончательной теории**

Книга Брайана Грина «Элегантная Вселенная» — увлекательнейшее путешествие по современной физике, которая как никогда ранее близка к пониманию того, как устроена Вселенная. Квантовый мир и теория относительности Эйнштейна, гипотеза Калуцы—Клейна и дополнительные измерения, теория суперструн и браны, Большой взрыв и мульти-вселенные — вот далеко не полный перечень обсуждаемых вопросов.

Используя ясные аналогии, автор переводит сложные идеи современной физики и математики на образы, понятные всем и каждому. Брайан Грин срывает завесу таинства с теории струн, чтобы представить миру 11-мерную Вселенную, в которой ткань пространства рвется и восстанавливается, а вся материя порождена вибрациями микроскопических струн.

Книга вызовет несомненный интерес как у специалистов естественно-научных дисциплин, так и у широкого круга читателей.

*Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.*

**Фейнмановские лекции по физике. В 9 т.**

**Задачи и упражнения с ответами и решениями. В 2 т.**

Внимание читателя предлагается знаменитый курс лекций по общей физике, который выдающийся американский физик, Нобелевский лауреат Ричард Фейнман читал в Калифорнийском технологическом институте.

Лекции Фейнмана, записанные вначале на магнитофон, а затем «переведенные» на «письменный английский» профессорами М. Сэндсом и Р. Лейтоном, не похожи ни на один известный курс. Они отличаются оригинальным методом изложения, в котором отразилась яркая научная индивидуальность автора, его точка зрения на пути обучения студентов физике, его умение заразить читателей интересом к науке. Последовательность изложения и выбор материала также отличаются от традиционных. В лекциях не тратится время на объяснение «ученым языком» того, что современный читатель уже знает или слышал. Зато в них увлекательно рассказывается о том, как человек изучает окружающую его природу, какое положение занимает физика в ряде других наук, какие проблемы наука решает сегодня и будет решать завтра.

Курс будет полезен преподавателям, заставив их по-новому взглянуть на процесс обучения физике; студентам, которые найдут много нового в дополнение тому, что они узнают на лекциях; школьникам, у которых сформируется интерес к физике и поможет им войти в современную науку; а также всем интересующимся физикой.





Представляет Вам свои лучшие книги:



*Грегори Р. Л.*  
**Разумный глаз**

Автор книги — профессор бионики Эдинбургского университета, один из крупнейших в мире специалистов по психологии зрения. Отвечая на вопрос, «каким образом мозг извлекает сведения о внешнем мире из некоторого узора пятен света на сетчатке глаза», Грегори компетентно и увлекательно рассказывает о связях между важнейшими факторами восприятия, о сложнейшем многогранном процессе зрительного мышления.

Текст богато иллюстрирован рисунками, которые позволяют читателю самостоятельно проверить многие факты. Предмет освещается с различных, часто неожиданных сторон, и потому книга представляет интерес для широкого круга читателей и в особенности для тех, кто интересуется психологией, физиологией, искусствоведением, языкознанием, астрономией, техникой.

*Роджер Пенроуз*  
**НОВЫЙ УМ КОРОЛЯ**

О компьютерах, мышлении и законах физики  
Многостраничная известная физика и математика Роджера Пенроуза посвящена изучению проблемы искусственного интеллекта на основе всестороннего анализа достижений современных наук. Возможно ли моделирование разума? Чтобы найти ответ на этот вопрос, Пенроуз обсуждает широчайший круг явлений: алгоритмизацию математического мышления, машины Тьюринга, теорию сложности, теорему Геделя, телепортацию материи, парадоксы квантовой физики, энтропию, рождение вселенной, черные дыры, строение мозга и многое другое. Книга вызовет несомненный интерес как у специалистов, так и у широкого круга читателей.



Издательство  
УРСС

(095) 135-42-46,  
(095) 135-42-16,  
URSS@URSS.ru

**Наши книги можно приобрести в магазинах:**

- «Библио-Глобус» (м. Лубянка, ул. Мясницкая, 6. Тел. (095) 925-2457)
- «Московский дом книги» (м. Арбатская, ул. Новый Арбат, 8. Тел. (095) 203-8242)
- «Москва» (м. Охотный ряд, ул. Тверская, 8. Тел. (095) 229-7355)
- «Моялда гвардия» (м. Полянка, ул. Б. Полянка, 28. Тел. (095) 238-5083, 238-1144)
- «Дом деловой книги» (м. Пролетарская, ул. Марксистская, 9. Тел. (095) 270-5421)
- «Старый Свет» (м. Пушкинская, Тверской б-р, 25. Тел. (095) 292-8688)
- «Глобус» (м. Университет, 1 гуп. корпус МГУ, комн. 141. Тел. (095) 939-4718)
- «У Невтаря» (РГГУ) (м. Новослободская, ул. Чалюпа, 15. Тел. (095) 973-4381)
- «СПб. дом книги» (Невский пр., 28. Тел. (812) 311-3954)

В настоящей книге известный американский ученый М. Арбиб подробно рассматривает результаты двух основных направлений в кибернетическом исследовании мышления: так называемой теории искусственного интеллекта, которая обращает основное внимание на внешнее поведение объектов, не касаясь структурного аспекта, и теории конструирования роботов, где наряду с имитацией внешних проявлений поведения стараются сохранить и принципы его структурной организации. Книга написана живо и популярно.

Мозг, поведение и метафора

Децентрализованное кодирование и нейронные сети

Введение в теорию систем

Искусственный интеллект и конструирование роботов

Нейронная регуляция движений

Многослойная организация памяти и восприятия

Устранение избыточности потенциальных команд

2501 ID 21192



ИЗДАТЕЛЬСТВО **УРСС**  
НАУЧНОЙ И УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Тел./факс: 7 (095) 135-42-16

Тел./факс: 7 (095) 135-42-46



Любые замечания и предложения по изданию, а также замеченные опечатки присылайте по адресу [URSS@URSS.ru](mailto:URSS@URSS.ru). Полный список замеченных опечаток можно будет увидеть на web-странице этой книги в нашем интернет-магазине <http://URSS.ru>