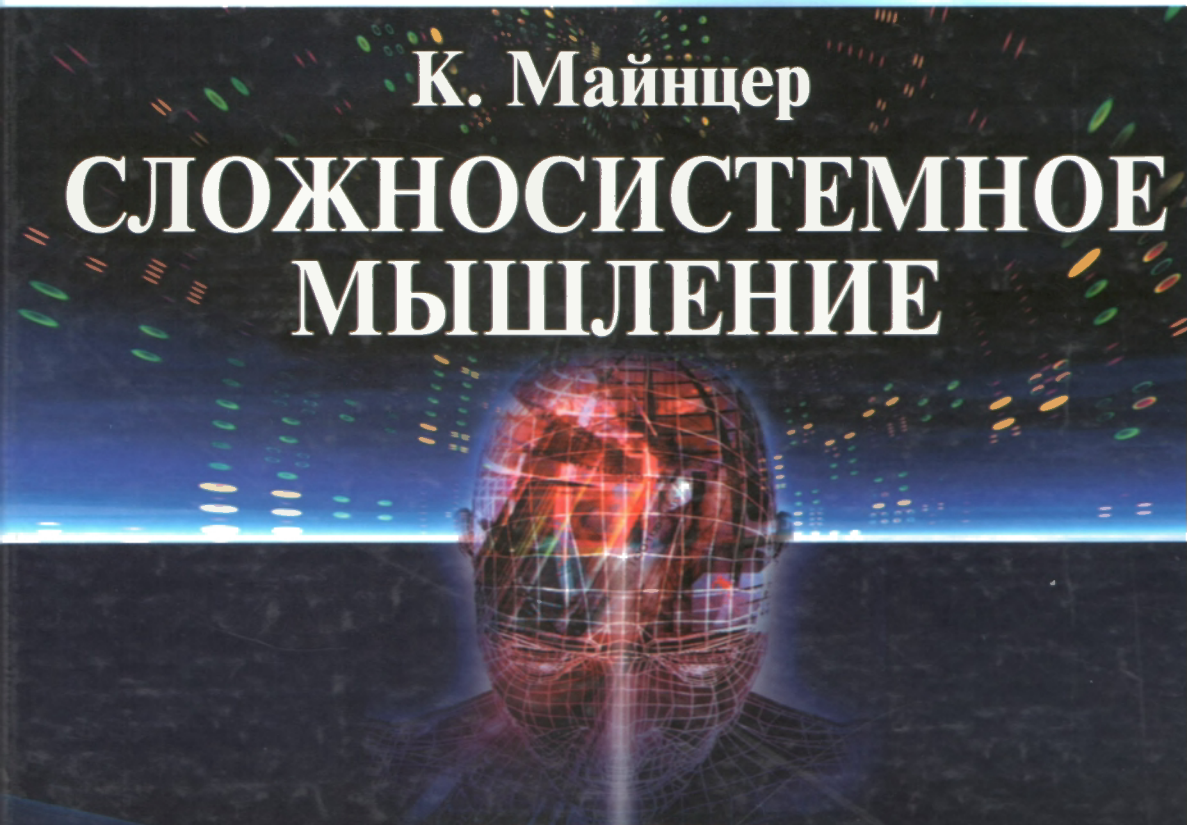
Синергетика
От прошлого к будущему

К. Майнцер

СЛОЖНОСИСТЕМНОЕ МЫШЛЕНИЕ



МАТЕРИЯ
РАЗУМ
ЧЕЛОВЕЧЕСТВО

Новый синтез

URSS

Нельзя построить содержательную общую теорию нелинейных систем, – считал Джон фон Нейман.

Великий математик ошибался.

В этом убеждают книги этой серии, посвященные синергетической парадигме, нелинейной науке, бифуркациям, фракталам, хаосу и многим другим интересным вещам.



Клаус МАЙНЦЕР (род. в 1947 г.)

Один из крупнейших в мире специалистов в области нелинейной динамики, теории самоорганизации сложных систем и искусственного интеллекта. Директор Академии им. Карла фон Линде и заведующий кафедрой философии и теории науки в Техническом университете Мюнхена, президент Немецкого общества по исследованию сложных систем и нелинейной динамики. Член ряда престижных международных научных организаций Германии, Швейцарии, США. Автор более 20 монографий, в том числе таких получивших широкую известность книг, как «Сложность» (2008), «Творческий случай. Как в мире возникает новое?» (2007), «Симметрия и сложность. Дух и красота нелинейной науки» (2005), «Философия компьютера» (2003), «Искусственный интеллект. Основы работы разумных систем» (2003).

Настоящее издание — русский перевод его книги «Thinking in Complexity. The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind», выдержавшей 5 изданий в Германии с 1994 по 2007 гг. и переведенной на китайский, японский и польский языки. Это первая книга автора, опубликованная в России.

Наше издательство предлагает следующие книги:



3608 ID 87280

9 785397 000024 >

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА

E-mail: URSS@URSS.ru

Тел./факс: 7 (499) 1
Тел./факс: 7 (499) 1

зданий
ете:
URSS.ru

Любые отзывы о настоящем издании, а также обнаруженные опечатк
и предложения будут учтены и отражены на web-странице это

. Ваши замечания
://URSS.ru

интернет-магазин OZON.ru

67631101

Klaus Mainzer

THINKING IN COMPLEXITY

The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind

Fourth Revised and Enlarged Edition

К. Майнцер

СЛОЖНОСИСТЕМНОЕ МЫШЛЕНИЕ

Материя, разум, человечество

Новый синтез

Перевод с 4-го переработанного
и дополненного
английского издания
А. В. Беркова

Под редакцией и с предисловием
профессора Г. Г. Малинецкого



URSS
МОСКВА

ББК 22.318 87.22

РФФИ

Настоящее издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07–06–07067)

Редакционная коллегия серии: Г. Г. Малинецкий (председатель), Р. Г. Баранцев, А. В. Гусев, А. С. Дмитриев, В. П. Дымников, С. А. Кащенко, И. В. Кузнецов, А. Ю. Лоскутов, И. Г. Поспелов, Ю. Д. Третьяков, Д. И. Трубецков, Д. С. Чернавский.

Майнцер Клаус

Сложносистемное мышление: Материя, разум, человечество. Новый синтез. Пер. с англ. / Под ред. и с предисл. Г. Г. Малинецкого. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 464 с. (Синергетика: от прошлого к будущему.)

Книга одного из ведущих специалистов в области междисциплинарных исследований Клауса Майнцера получила мировую известность и была переведена на многие языки. Она вошла в учебные курсы ряда европейских, азиатских и американских университетов.

Эта книга посвящена междисциплинарным проблемам современной науки. В ней, говоря словами Чарльза Сноу, перебрасывается мост между двумя культурами — естественно-научной и гуманитарной. В книге показывается пройденный познанием путь от глубоких философских идей, начиная с Античности, Средневековья и Нового времени, к исследованиям, находящимся на переднем крае науки — нанотехнологиям, хаосу, искусственному интеллекту, нейронауке, высоким гуманитарным технологиям. Несмотря на широту охвата рассматриваемых проблем, в основе этой работы глубокое внутреннее единство, связанное с использованием и развитием теории самоорганизации, или синергетики, и ее раздела — теории сложности.

Книга междисциплинарна не только по содержанию, но и по жанру. Она занимает промежуточное место между научно-популярной работой, учебником и монографией. Несмотря на отсутствие формул в тексте, *в ней ясно и точно излагаются глубокие и важные научные идеи. Среди них — искусственная* жизнь, клеточные нейронные сети, новый взгляд на проблемы сознания, которые впервые обсуждаются в литературе на русском языке.

Книга будет интересна и полезна широкому кругу читателей — от школьников и преподавателей до исследователей, инженеров, руководителей.

Translation from the English language edition: *Thinking in Complexity* by Klaus Mainzer

Издательство «Книжный дом "ЛИБРОКОМ"».
117312, г. Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 9.
Формат 70 × 100/16. Печ. л. 29. Тираж 3000 экз. Заказ № 5957.

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных диапозитивов в ОАО «Дом печати — ВЯТКА». 610033, г. Киров, ул. Московская, 122

ISBN 978–5–397–00002–4

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1994, 1996, 1997, 2004.
Springer is a part of Springer Science + Business Media.
All Rights Reserved

© Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА
E-mail: URSS@URSS.ru
Каталог изданий в Интернете:
http://URSS.ru
Тел./факс: 7 (499) 135–42–16
URSS Тел./факс: 7 (499) 135–42–46

3608 ID 87280
9 785397 000024

Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельцев.

Оглавление

Синергетика. Кризис или развитие? (*Г. Г. Малинецкий*) **5**

Предисловие к четвертому изданию **21**

Предисловие к третьему изданию **23**

Предисловие ко второму изданию **24**

Предисловие к первому изданию **25**

Глава 1. Введение: от линейного к нелинейному мышлению **26**

Глава 2. Сложность и эволюция материи **43**

2.1. Космос Аристотеля и Логос Гераклита 44

2.2. Вселенная Ньютона и Эйнштейна и демон Лапласа 57

2.3. Гамильтоновы системы, небесный хаос и квантовый мир 73

2.4. Консервативные и диссипативные системы и возникновение порядка 84

2.5. Сложные системы наномира и самоконструирующиеся материалы . . 102

2.6. Сбор сложных данных и анализ временны́х рядов 110

Глава 3. Сложность и эволюция жизни **119**

3.1. От Фалеса до Дарвина 119

3.2. Термодинамика Больцмана и эволюция жизни 124

3.3. Сложные системы и эволюция организмов 131

3.4. Сложные системы и экология популяций 146

Глава 4. Сложность и эволюция системы разум—мозг **152**

4.1. От души Платона к «человеку-машине» Ламетри 153

4.2. Сложные системы и нейронные сети 162

4.3. Мозг и возникновение сознания 187

4.4. Интенциональность и крокодил в мозге 198

Глава 5. Сложность и эволюция вычислимости **208**

5.1. Лейбниц и mathesis Universalis 208

5.2. Вычислимость и алгоритмическая сложность 212

5.3. От обработки информации к обработке знаний 224

5.4. Клеточные автоматы, хаос и случайность 250

Глава 6. Сложность и эволюция искусственных жизни и интеллекта **260**
6.1. Нейронные сети и синергетические компьютеры 260
6.2. Клеточные нейронные сети и аналоговые нейрокомпьютеры 278
6.3. Универсальные клеточные нейронные сети и динамическая сложность 292
6.4. Нейробионика и робототехника 305
6.5. От искусственного интеллекта к искусственной жизни 319
Глава 7. Сложность и эволюция человеческого общества **330**
7.1. От полиса Аристотеля до Левиафана Гоббса 331
7.2. Экономика Смита и рыночное равновесие 338
7.3. Сложные экономические системы, хаос и случайность 347
7.4. Сложные общественные и культурные системы 366
7.5. Сложные коммуникационные сети и поиск информации 383
7.6. Сложные мобильные сети и вездесущие компьютеры 393
Глава 8. Эпилог о будущем, науке и этике **401**
8.1. Сложность, прогнозы и будущее 401
8.2. Сложность, наука и техника 410
8.3. Сложность, ответственность и свобода 417
Примечания **427**
Предметный указатель **448**

Синергетика. Кризис или развитие?

Мы любим все – и жар холодных чисел,
И дар божественных видений,
Нам внятно все – и острый галльский смысл,
И сумрачный германский гений...

А. Блок

Это редкая книга. Книга о смыслах. За внешней канвой событий, новостей, конкретных дел и забот порой хочется задуматься, взглянуть на звезды, понять смысл происходящего, его роль, значение, место в жизни. Это сродни ощущению читателя, который напряженно следил за сюжетом, прочитал развязку, закрыл книгу и задумался о прочитанном, попытался собрать воедино свои впечатления и возникшие мысли.

Стало модно сетовать на быстрый темп изменений, происходящих в мире, говорить о растущей сложности реальности, жаловаться на огромные потоки информации и сложность школьных и институтских программ. Профессор Аугсбурского университета Клаус Майнцер взял на себя труд рассказать о сложности так, как ее понимают философы, математики, социологи, инженеры, физики, политики. Поэтому и круг читателей этой книги может быть очень широким – от школьников, знакомящихся с современной наукой, до академиков, окидывающих мысленным взором пройденный ими и человечеством путь. Много интересного могут найти для себя в этой книге ученые, интересующиеся тем, что делается у коллег, руководители, задумывающиеся о направлении происходящих перемен, преподаватели, стремящиеся за отдельными деревьями своей дисциплины увидеть лес современного знания.

Отсутствие формул, огромная эрудиция автора, умение говорить о сложности просто делают круг возможных читателей еще шире.

О таком предмете, как сложность, тем более раскрывая ее смысл, можно говорить, глядя на предмет с разных точек зрения. Точка зрения, выбранная К. Майнцером, является и необычной, и оригинальной, и традиционной, и ориентированной на будущее. Несколько слов сказать о ней необходимо.

Искушение синтезом

Лишь небу ведомы пределы
наших сил,
Потомством взвесится, кто
сколько утаил.
Что создадим мы впредь, на это
власть Господня,
Но что мы создали, то
с нами посегодня.

Н. Гумилев

Альберт Эйнштейн, говоря об императиве современной науки, заметил, что мы ничего не хотим знать,

но все хотим понимать. Но что такое понимание? Как правило, это способ свести возникшую проблему, поставленный вопрос, изучаемую ситуацию к чему-либо простому, известному, очевидному или к аксиомам в дисциплинах, опирающихся на математический формализм. «Упрощай и властвуй», — лозунг современной науки.

Во второй половине XX века возникла практическая потребность, а с ней и научная идея упрощать сложные системы, возникшие в одних дисциплинах, опираясь на модели и методы, родившиеся в других областях знаний. Простейший пример — прикладная математика, являющаяся инструментом во множестве сфер жизнедеятельности и научных направлений. Однако исследователям хотелось большего — переносить понятия, концепции, модели — хотелось создать *междисциплинарный подход.* Раньше ставить такие вопросы отваживались только философы.

Первой удачной попыткой сделать это, оставаясь на почве естествознания, конкретных моделей, экспериментов, технических систем, стала *кибернетика.* Закладывая ее основы, американский математик Норберт Винер полагал, что, опираясь на математические модели и новые идеи, удастся выявить общие принципы и законы управления и связи в животном, машине, обществе. Оглядываясь назад, можно сказать, что эта исследовательская программа оказалась плодотворной и очень успешной. Идеи кибернетики, у которой было много энтузиастов, нашли воплощение в современной теории управления, в теории связи, в системном программировании, в социологии, философии, биологии, теории искусственного интеллекта, в дискретной математике. И все же, хотя до сих пор издаются сборники по теоретической кибернетике, проводятся конференции и семинары, сохранить ядро этого подхода не удалось. Огромная полноводная река разбилась на речки, речушки, ручейки...

И причины, на первый взгляд, тут две. В любой науке, тем более широком подходе, очень важны общие идеи, философия, своеобразная идеология. Но должно быть не только это! Один из основоположников кибернетики профессор Уильям Эшби на взлете этого подхода высказал мысль, что кибернетика — это не модели, уравнения, конкретные задачи, а взгляд, точка зрения, ви́дение мира под определенным углом. Рамки оказались раздвинуты слишком широко. Множество людей, далеких от собственно кибернетических воззрений, с полным правом начали именовать себя кибернетиками. При этом идея оказалась дискредитирована, ребенок был выплеснут с водой, популяризация науки во многом заменила саму науку. Во многом это и предопределило судьбу кибернетики в научном сообществе.

Вторая причина — более глубокая и принципиальная. Наши возможности управлять, создавать организацию, контролировать весьма ограничены. В самом деле, человек может следить не более чем за 5–7 медленно меняющимися со временем переменными. Он способен учесть не более 5–7 факторов, принимая осознанные решения. Он может активно работать не более чем с 5–7 людьми (бóльшими коллективами приходится руководить опосредованно).

Теория управления— весьма сложная математическая дисциплина — также оперирует достаточно простыми модельными сущностями. Простыми,

по сравнению с теми системами, которыми человек управляет. Несмотря на огромный прогресс компьютерной техники и здесь мы подошли к пределам. В свое время физик-теоретик Дайсон для числа 10^{100} ввел специальное название «гугол», сочтя, что это и бóльшие числа не могут возникнуть в научных исследованиях. Для такого суждения есть резоны — в нашей вселенной, по оценкам физиков, не более 10^{80} атомов. Однако сейчас в криптографии, в теории оптимизации, в биоинформатике возникают гораздо бóльшие числа. Наш мир слишком сложен, чтобы его можно было «просчитать» и чтобы им можно было эффективно управлять. И здесь на арену выходит главный герой книги К. Майнцера — *сложность*.

Как же природа, общество, человек справляются с этой сложностью? Как упрощают ее? Ответ на этот вопрос потребовал создания другого междисциплинарного подхода — *теории самоорганизации*, или *синергетики* (от греч. «совместное действие»). Вводя этот термин в 1970-х годах, немецкий физик-теоретик Герман Хакен имел в виду два смысла.

С одной стороны, этот подход рассматривает возникновение новых свойств и характеристик у сложных систем, подсистемы которых этими свойствами не обладают. По сути, это теория возникновения новых качеств.

С другой стороны, это подход, развитие которого требует совместных усилий естественников, гуманитариев, специалистов по математическому моделированию.

Первые успехи синергетики были связаны с теоретической физикой и математическим моделированием. Герман Хакен, Илья Пригожин (лауреат Нобелевской премии по химии 1977 г.), другие исследователи выявили поразительную аналогию в теоретическом описании сложных нелинейных процессов, изучавшихся в физике, химии, биологии, других областях естествознания. Выдающийся математик Анри Пуанкаре на рубеже XX века предвидел, что в будущем можно будет предсказывать новые физические явления, опираясь на общую математическую структуру теории. Синергетика на рубеже XXI века сделала этот прогноз реальностью.

Она оказалась на магистральном пути развития современной науки. До середины XX века центральное место в естествознании занимали *линейные теории, линейные математические модели и методы, созданные для их изучения*.

В истории науки бывают повороты, когда вдруг выясняется, что сложное и непонятное, в сущности, оказывается устроено достаточно просто. На других поворотах, напротив, за видимой простотой исследователям удается увидеть парадоксальность и глубину. На почти сорокалетнем пути, который прошла синергетика, были и те, и другие повороты.

Американский науковед Томас Кун ввел очень удачное слово *парадигма*. Это некоторый стандарт исследований, удовлетворяющий двум условиям. С одной стороны, в его основе лежит некоторое крупное достижение, ответ на принципиальный вопрос, задающий образец в данной области исследований. С другой стороны, это исследовательская программа, «генератор головоломок», в решении которых могут принять участие многие ученые. Характерным признаком *научной революции* является то, что на поставленные в рамках предшествующей парадигмы вопросы удается получить в новой парадигме глубокие, содержательные, открывающие новую перспективу ответы.

В центре внимания исследователей во второй половине XX века оказались *неустойчивость* и *нелинейность*. Классическая механика, связанные с ней технологии ориентировались на устойчивые решения, конструкции, стратегии. Ключевым понятием кибернетики является *отрицательная обратная связь*. Если в системе есть такая связь, то в ответ на внешнее воздействие система, как целое, реагирует так, чтобы скомпенсировать его, уменьшить его влияние, сохранить состояние равновесия (гомеостаз).

Однако развитие предполагает иную динамику — отклонение от равновесия усиливается системой и порождает еще большее отклонение. Последнее, воздействуя на систему, вновь усиливается. Это *положительная обратная связь*. Оказалось, что роль положительных обратных связей в науках о природе, обществе, человеке очень велика. Неважно, идет ли речь о цепной реакции, горении или взрыве, о проектах управляемого термоядерного синтеза (с которыми связывают решение энергетических проблем человечества), о неравномерности развития соперничающих государств или алгоритмах роста инновационных кластеров, положительная обратная связь становится желательным и необходимым условием успеха.

Можно сказать, что кибернетика делала акцент на *организации* и *системах с отрицательной обратной связью*, а синергетика основное внимание уделяет *самоорганизации* и *системам с положительной обратной связью*.

Выдающиеся ученые часто искали мировоззренческие основы своей деятельности в философских работах. Например, Гейзенберг считал, что квантовая механика, в том виде, в каком он ее представлял, является одним из воплощений идей Платона о совершенных формах, лежащих в основе бытия, и о примате геометрии в осмыслении мироздания.

Так же можно посмотреть на синергетику и кибернетику. Этот глубокий и интересный аспект обсуждается в первой главе книги Клауса Майнцера. Отцом синергетики можно считать Гераклита из Эфеса (около 500 г. до н. э.). Он мыслил реальность как процесс, а не как результат, как арену борьбы и самоорганизации разных сущностей: «Этот космос, тот же самый для всех, не создал никто ни из богов, ни из людей, но он всегда был, есть и будет вечно живым огнем, мерами разгорающимся и мерами погасающим».

Замечательно, что эту же фразу, как выражающую суть синергетики, привел мне во время нашей первой встречи один из основоположников синергетики в России, третий директор Института прикладной математики Академии наук, замечательный человек и большой ученый, мой учитель, Сергей Павлович Курдюмов. Она же открывает его сайт —

http://spkurdyumov.narod.ru,

который за последние годы стал одним из крупнейших научных и образовательных интернет-порталов России.

В противоположность Гераклиту, его оппонент, Парменид Элейский (около 500 г. до н. э.) сделал акцент на результате, на гомеостазе, на достижении совершенства. По Пармениду, совершенный мир будет представлять собой твердый, конечный, материальный шар вне времени, движения, изменений.

В обсуждаемой книге ярко и убедительно показано, как при решении научных проблем ученые, конструируя исследовательские программы,

вновь и вновь делали выбор в пользу мысли Гераклита или Парменида. *Сложность, самоорганизация, неустойчивость* — основные сюжеты синергетики — восходят к гераклитову мировидению.

Единство мира состоит не только в его материальности, что достаточно очевидно, но и в том, что процессы различной природы описываются одними и теми же уравнениями. К этой мысли выдающийся математик Анри Пуанкаре и многие естествоиспытатели пришли на рубеже XX века. Единство, общность, простота, гармония были связаны с *линейностью* решавшихся ими уравнений. Сами же уравнения представляли математические модели гидродинамики, теории электричества, теории упругости и волновой оптики. Линейность означает пропорциональность отклика системы силе внешнего воздействия. Для линейных уравнений характерен принцип наложения, или *суперпозиции, – результат суммы воздействий равен сумме результатов каждого из воздействий по отдельности.* Нельзя сбросить со счетов огромный арсенал методов исследования линейных систем, созданный за три века интенсивной работы многих поколений ученых.

Однако интенсивные воздействия, возросшие требования к точности, неустойчивости, выводящие систему из линейной области, заставили исследователей обратиться к более разнообразному, богатому и сложному миру нелинейных математических моделей. Путешествие в этот мир сделало возможным широкое использование компьютеров. Еще тридцать лет назад ученые считали, что каждая нелинейная модель «нелинейна по-своему». Сейчас мы смотрим на это иначе.

Одним из принципиальных результатов прикладной математики, синергетики, других направлений исследований стало установление *нового уровня единства* в этом нелинейном мире. Оказалось, что сами уравнения могут быть различными (а иногда это могут быть вовсе и не уравнения, а другие инструменты для описания процессов во времени и пространстве), но типы установившегося поведения (*аттракторы* — притягивающие множества, которым уделено большое место в книге) могут быть одними и теми же. Это новый, более высокий уровень понимания реальности, умения увидеть единое во многом, новый синтез.

С этим взглядом связано развитие и успехи первой парадигмы синергетики, изучающей возникновение *диссипативных структур.* В линейных системах, близких к равновесию, диссипативные процессы, обусловленные рассеянием энергии, вещества, информации (вязкость, теплопроводность, трение, забывание), приводят к уничтожению упорядоченности, властно влекут систему к равновесию. В нелинейных системах, напротив, диссипация может способствовать возникновению порядка, выступать в качестве архитектора структур различного рода (которые стали называть, чтобы подчеркнуть это обстоятельство, диссипативными).

В становлении этой парадигмы огромную роль сыграли представители нескольких научных школ. В брюссельской научной школе, которую в течение многих лет возглавлял нобелевский лауреат Илья Романович Пригожин, изучались системы химических реакций с учетом диффузионных процессов. При этом самоорганизация в пространстве и во времени, возникновение упорядоченности, многие го-

ды казалась парадоксальной, противоречащей законам природы. Об этом говорит история одного из выдающихся экспериментальных открытий XX века – колебательных химических реакций. Несмотря на демонстрацию этого эффекта журналы много лет отказывались принимать соответствующие статьи – рецензенты заявляли, что эффект противоречит законам термодинамики.

Огромную роль в становлении и этой парадигмы, и становлении синергетики в целом сыграла немецкая научная школа во главе с выдающимся физиком-теоретиком Германом Хакеном. Строя модели лазеров, он обратил внимание на поразительную аналогию между соответствующими уравнениями, описывающими генерацию лазерного излучения, и простейшими моделями конвективной неустойчивости в подогреваемом снизу слое жидкости.

Причины этой глубокой аналогии – подчинение одних степеней свободы системы другим, так называемым *параметрам порядка*. Сложные системы, описываемые нелинейными уравнениями в частных производных, обладающие потенциально бесконечным числом степеней свободы, вели себя поразительно просто!

За внешней сложностью скрывается внутренняя простота. За конкретными задачами Герман Хакен увидел контуры широкого, обобщающего междисциплинарного подхода. Огромную роль в становлении синергетики сыграла серия книг, содержащая около сотни работ, которая в течение многих лет издавалась под его редакцией в издательстве «Шпрингер». И автора этой книги естественно отнести к следующему поколению немецкой синергетической школы.

Принципиальную роль в развитии синергетики и в нашей стране, и в мире сыграла научная школа С. П. Курдюмова, сложившаяся в Институте прикладной математики имени М. В. Келдыша Академии наук, в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова, в Московском физико-техническом институте. В нелинейных системах с сильной положительной обратной связью возможны *режимы с обострением*, при которых одна или несколько величин, характеризующих систему, неограниченно возрастают за ограниченное время. Такие режимы являются отличным приближением для ряда неустойчивостей в физике плазмы, теории горения и взрыва, и даже в глобальной демографии, в тех задачах, которыми занимался С. П. Курдюмов. Структуры, возникающие в таких средах, также парадоксальны. Например, тепловые процессы в среде с нелинейным объемным источником могут быть... локализованы в пространстве. В этой области удалось получить ряд строгих и глубоких математических результатов. И вновь за сложностью уравнений здесь возникли новые понятия, принципы, новая простота [1)].

От развития парадигмы диссипативных структур сейчас непосредственно зависит успех нанотехнологической программы, реализация которой начата в США, России, в ряде других стран. Дело в том, что «организация», манипулирование отдельными атомами, например, с помощью сканирующего электронного микроскопа, не позволяет выйти на уровень технологий. Единственный путь – путь «снизу вверх», создание усло-

[1)] Миру режимов с обострением посвящена книга: Режимы с обострением: эволюция идеи. Сборник статей / Под ред. Г. Г. Малинецкого. 2-е изд., испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 312 с.

вий, при которых в результате самоорганизации на наномасштабах формируются структуры желаемых типов. Первые шаги показывают, насколько перспективен и труден этот путь. Проблема состоит в том, чтобы создать соответствующие математические модели, поставить эксперименты, помогающие понять, как происходит самоорганизация на нанометровых масштабах.

Следующий этап развития синергетики — *парадигма динамического хаоса.* Здесь, напротив, за фасадом внешней простоты оказалась внутренняя сложность. Главный фундаментальный результат этих работ — выяснение *принципиальных ограничений* в области прогноза. Пьер Симон Лаплас, выдающийся математик, механик и астроном наполеоновской эпохи, считал, что умея решать уравнения, следующие из законов Ньютона, мы можем как угодно далеко заглянуть в прошлое и в будущее. В конце XX века ученые поняли, что Лаплас был неправ. И после этого прогноз стал бурно развивающейся областью индустрии. В рамках этой парадигмы были созданы новые методы шифрования и защиты информации, способы управления (управление хаосом), новые алгоритмы медицинской и технической диагностики. И эти работы продолжаются самым активным образом.

И, наконец, *парадигма сложности* — основой объект интереса и усилий ученых, развивающих синергетику, в настоящее время. И, конечно, главная тема этой книги. В книге замечательно представлены многие, хотя далеко не все, ипостаси сложности в современной науке. И поэтому обращу внимание только на два вызова исследователям, не рассматриваемых подробно в этой книге.

Первый вызов связан с так называемой *субъективной самоорганизацией.* В предыдущих парадигмах речь шла, прежде всего, о естествознании, о самоорганизации в физических, химических, биологических системах, а также в экономике и социологии, во многом имеющих сходную динамику. Однако не менее важной представляется самоорганизация в информационном пространстве, в пространстве правил, стратегий, ожиданий, оценок. Именно с такой самоорганизацией и имеет дело субъективная синергетика.

В самом деле, нервная клетка — нейрон — срабатывает *в миллион раз медленнее*, чем триггер — элементарная логическая единица в чипе персонального компьютера. Скорость передачи информации нервной системе *в миллион раз меньше*, чем в персональном компьютере. Это означает, что принципы работы мозга кардинально отличаются от тех, которые воплощены в компьютере. И, судя по всему, самоорганизация и тут играет ключевую роль.

Другая сторона той же медали. По данным психологов, человек в состоянии принять во внимание не очень много факторов. Однако для постановки диагноза медицинские учебники советуют оценить 400 и более признаков, симптомов, результатов анализов. Как же врач принимает решения, причем во многих случаях достаточно быстро и эффективно? Как в результате самоорганизации в процессе обучения и работы вырабатываются те самые решающие правила, которые мы называли профессиональным опытом, как выделяются те 5–7 параметров порядка, которые он на самом деле и принимает во внимание? Первые многообеща-

ющие шаги здесь сделаны[2]. Но это только начало пути.

Второй пример. На рубеже XX века был открыт так называемый закон Ципфа. Оказалось, что население городов многих стран, регионов, мира в целом часто описывается степенной зависимостью

$$N(r) \sim r^{-\alpha}.$$

Вначале города упорядочиваются по числу жителей и первому городу присваивается ранг r_0 (единственный подгоночный коэффициент), второму $r_0 + 1$, третьему $r_0 + 2$ и т. д. $N(r)$ — население города ранга r. Для систем расселения $\alpha \sim 1$.

Закон Рихтера–Гутенберга утверждает, что число землетрясений в зависимости от их энергии также описывается степенной зависимостью

$$N(E) \sim E^{-\alpha},$$

где $N(E)$ — число землетрясений с энергией большей E, а $\alpha \sim 1$ (оно зависит от сейсмичности региона). Этот степенной закон порождает степенные зависимости ранг — размер, аналогичные закону Ципфа.

В мире степенных зависимостей находятся роды, упорядоченные по числу входящих в них видов, слова по частоте их употребления в языке, природные катастрофы по числу погибших в их результате, компьютерные вирусы, упорядоченные по числу пораженных компьютеров, страны, отранжированные по доле взрослого населения, зараженного СПИДом...

Мы видим поразительную *общую закономерность*. Ключ к пониманию системных механизмов этой общности дает парадигма сложности. И первые шаги здесь также весьма успешны.

Казалось бы, при таком разнообразии проблем, при ряде крупных достижений, при глубоких изменениях в понимании мироздания, связанных с синергетикой, можно говорить только о бурном развитии этого междисциплинарного подхода, а уж никак не о кризисе.

Однако не все так просто. Развитие синергетики и ее будущие успехи зависят от того, насколько успешно ей удается прокладывать свой путь между Сциллой и Харибдой. Сцилла в этой аналогии связана с дисциплинарной, узкопрофессиональной ориентацией и российской, и мировой науки. Узкая специализация, рождение новых направлений на стыке дисциплин, большие усилия, посвященные небольшой проблеме, давали успехи в течение многих десятилетий. Специалистам, знающим все об очень немногом, трудно примириться с появлением журналов, конференций, книг, где с единых позиций, конкретно и конструктивно рассматриваются многие задачи, относящиеся, по сути, к разным наукам. Во многих научных организациях просто нет структур, способных поддерживать междисциплинарный поиск. Однако эти трудности преодолимы. В сущности, тем же путем шли прикладная математика, вычислительная физика, системное программирование, которым в течение нескольких десятилетий научное сообщество отказывало в признании полноценными, «респектабельными» научными дисциплинами. Конкретные успехи на междисциплинарном поле — здесь лучший аргумент.

Харибда же связана с риском выплеснуть с водой ребенка. В самом деле, создание коллектива из пред-

[2] Обращу внимание на работы научной школы академика И. М. Гельфанда, связанные с алгоритмами диагностических игр: *Котов Ю. Б.* Новые математические подходы к задачам медицинской диагностики. М.: URSS, 2004. 328 с. (Синергетика: от прошлого к будущему).

ставителей различных дисциплин, деятельность по «сборке» больших междисциплинарных проектов предполагает огромную работу по объяснению, популяризации, пропаганде комплексных идей, подходов и взглядов. Участники таких проектов должны говорить на одном языке и понимать друг друга! Это прекрасно показывает и настоящая книга. На это уходит очень много времени и сил. И очень важно, чтобы цель при этом не была утрачена, чтобы остались ресурсы собственно на исследовательскую работу, чтобы популяризация науки не заменяла саму науку. Но и эти проблемы разрешимы, потому что в современной науке возникает все больше проблем, где альтернативы междисциплинарности просто нет.

Но из того, что проблемы разрешимы, совсем не следует, что их легко решить...

Вызов нового поколения

Здравствуй, племя младое, незнакомое!

А. С. Пушкин

Один из великих писателей заметил, что каждый человек может написать одну прекрасную книгу. Книгу о своей жизни. Но настоящий писатель может написать и вторую книгу...

Видимо, то же самое относится и к научному поиску. Чтобы развитие определенной области науки, да и всей науки в целом, шло успешно, мало усилий одного поколения. Помнится, Ньютон говорил, что мы видим далеко, так как стоим на плечах гигантов. Важно, чтобы на этих плечах было кому стоять...

И в этом контексте книга Клауса Майнцера исключительно важна и интересна. В самом деле, основополагающий вклад в развитие синергетики внесли ученые, которым сейчас 80 или больше. Илья Романович Пригожин, Герман Хакен, отечественные исследователи — Сергей Павлович Курдюмов, Юрий Львович Климонтович, Дмитрий Сергеевич Чернавский, другие выдающиеся исследователи.

И у основоположников вновь и вновь возникал или возникает вопрос о том, есть ли следующее поколение, есть ли кому передать эстафету? И при этом не утратить главных целей и задач своей науки, сохранить ее дух и стиль. И у нового поколения должны появиться новые задачи, новые впечатляющие достижения. Без этого кризис неизбежен. В этом отношении книга Клауса Майнцера — одна из наиболее оптимистических и вселяющих надежду на будущее синергетики.

В последние годы появились глубокие работы, посвященные методологии синергетики. В этой области успешно работают сотрудники Института философии — В. С. Стёпин, В. И. Аршинов, Е. Н. Князева, В. Г. Буданов [3)].

Зачастую многие представители естественных наук и математики со скепсисом и осторожностью относятся к философии. И тем не менее, создавая и разрабатывая междисциплинарные подходы, без существенной и значимой философской компоненты не обойтись.

Известный методолог синергетики В. Г. Буданов определил ее как подход, лежащий на пересечении трех сфер — *предметного знания, математического моделирования и философской ре-*

[3)] Подробнее о методологии синергетики рассказывается в недавно вышедшей книге: *Буданов В. Г.* Методология синергетики в постнеклассической науке и в образовании. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2007. 232 с. (Синергетика в гуманитарных науках).

флексии. Все три компоненты представлены в этой книге. В ней есть и конкретные задачи, и захватывающие дух перспективы, есть обсуждение математических инструментов (хотя порой возникает соблазн привести несколько формул, проясняющих суть текста) и очень большое внимание уделено философской традиции. Платон, Аристотель, Декарт, Лейбниц, Кант и другие мыслители ставили и обсуждали проблемы, с которыми сегодня при решении конкретных задач столкнулась синергетика.

Почему существенны все три компоненты этой триады? Появление предметного знания понятно. Сегодня наука так же конкретна, как во времена Френсиса Бэкона, осознавшего эту конкретность как методологический принцип. Математическое моделирование тоже естественно — синергетика говорит на языке моделей и прикладной математики. Но почему здесь оказывается важна философская рефлексия?

Академик В. С. Стёпин — выдающийся специалист по философии науки — поясняет это таким образом. В основе *классической науки* лежал принцип повторяемости, объективности, независимости от времени и места наблюдения. Ни инструмент, ни наблюдатель, ни его установки не были существенны. *Неклассическая наука* показала, что во многих случаях дело обстоит сложнее. Оказалось, что в квантовой механике у нас нет возможности одновременно сколь угодно точно измерить координату и импульс микрочастицы. Более того, сама процедура измерения меняет и свойства частицы, и то, что будет измерено. Кроме того, в результате множества экспериментов возникает неустранимым образом вероятность. А это уже совсем не такая жесткая причинно-следственная связь, как в классической механике. Однако все чаще мы сталкиваемся со следующим этапом познания — *постнеклассической наукой*[4]. Здесь существенен и объект исследования, и используемые инструменты, и познающий субъект. Простой пример — понятие безопасности в контексте охраны окружающей среды. Очевидно, что зайцы, волки и люди, стремящиеся сохранить биоразнообразие, трактуют ответ на этот вопрос с принципиально различных позиций, имеют разные картины мира.

Постнеклассическая наука все чаще оказывается перед необходимостью описать уникальный, необратимо развивающийся объект (вселенную, биосферу, техносферу, цивилизацию, историю, психику), спрогнозировать наиболее вероятные сценарии его развития и осмыслить, как в этих условиях можно добиться своих целей, да и какие цели разумно ставить субъектам. На сегодняшний день именно синергетике удается наиболее успешно продвигаться в постановке и решении таких проблем. По мысли В. С. Стёпина именно этому научному подходу суждено стать ядром всей научной парадигмы XXI века[5]. Поэтому обсуждение мировоззренческих проблем, вопросов методологии, «вечных вопросов» познания в книге К. Майнцера — не украшение текста, а обсуждение по существу. Он делает это с глубоким знанием и философ-

[4] Основы такого ви́дения науки заложены в книге: *Стёпин В. С.* Теоретическое знание. М.: Прогресс-Традиция, 2000. 744 с.

[5] Более того, саму синергетику, делая акцент на сложности, он трактует как теорию саморазвивающихся систем (*Стёпин В. С.* Саморазвивающиеся системы и постнеклассическая рациональность // Вопросы философии. 2003. № 8. С. 5–15).

ской традиции, и синергетики, с изяществом и блеском.

В 2004 г. по инициативе С. П. Курдюмова в Москве, в Российской академии государственной службы при Президенте РФ была проведена большая международная конференция, посвященная проектированию будущего: «Стратегии динамического развития. Единство управления и самоорганизации»[6]. Конференция собрала более 1000 участников из многих стран, в том числе ряд ведущих специалистов по синергетике из России и Германии. В ее рамках был проведен симпозиум «Диалог научных школ». Он показал глубокое внутреннее единство развития синергетических исследований в России и в Германии. Этот очевидный, на первый взгляд, результат является очень важным.

Расхожим мнением является представление об интернациональном характере науки, о «незримом колледже», объединяющем ученых разных стран. Конкретные исследования науковедов и знакомство с организацией научной деятельности в различных государствах показывают, что это романтическое представление весьма далеко от реальности. И хотя школьники всех стран учат законы Ньютона и таблицу Менделеева, различий оказывается гораздо больше, чем сходства.

Наука в современном обществе является, прежде всего, тонким, сложным и дорогим инструментом, позволяющим решать многие задачи в области обороны, промышленности, в области государственного управления, в образовании, в социальной сфере. Но все эти области, а с ними и научные приоритеты, существенно отличаются в разных странах. Об очень большой разнице и в организации научной деятельности, и в самой науке, и в стиле работы говорит организация крупных международных проектов. Согласование приоритетов и организация эффективного сотрудничества обычно занимает десятилетия. И это так, идет ли речь о международной космической станции, проекте термоядерного реактора ИТЕР или гигантского ускорителя.

Поэтому встреча специалистов по синергетике из двух стран, шедших разными путями и знавших друг друга в основном по публикациям, оказалось очень впечатляющей. Создавалось ощущение, что это давно сотрудничающие коллеги, прекрасно понимающие и дополняющие друг друга, ведут прерванную на вчерашнем семинаре беседу. Это замечательное ощущение единства, связанного с объективностью поставленных проблем и предлагаемых решений, правильностью выбранного пути. Именно тогда и возникла мысль перевести книгу Клауса Майнцера.

О синергетике можно писать по-разному. В нашей серии «Синергетика: от прошлого к будущему», выпускаемой издательством URSS с 2002 года, вышло около 40 книг на русском и испанском. Это учебники для гуманитариев и естественников, монографии ученых, находящихся на переднем краю исследований, со сложным, развитым математическим формализмом или с результатами конкретных экспериментов, это философские размышления о драме идей в современной науке, одним из активных участников которой стала синергетика.

Однако в настоящее время многие результаты и идеи синергетики

[6] Избранные доклады этой принципиальной конференции вошли в книгу: Будущее России в зеркале синергетики / Под ред. Г. Г. Малинецкого. М.: КомКнига/URSS, 2006. 272 с., изданную в серии «Будущая Россия».

стали не только достоянием ученых. Они формируют образ будущего и помогают выбрать варианты развития. Эти идеи живут сегодня в обществе. Понятия бифуркации, горизонта прогноза, управляемого хаоса, фракталов прочно заняли место в массовом сознании. Они меняют мир, становясь элементами культуры. И самый короткий путь в нее связан с философией. Здесь появляется возможность обсуждать научные идеи без формул, опираясь на философскую традицию. Достаточно сказать, что наиболее популярными, известными и читаемыми среди книг по синергетике в России являются работы С. П. Курдюмова и его ученицы, профессора Е. Н. Князевой, посвященные философии синергетики[7]. По этому пути идет и Клаус Майнцер в настоящей книге, привнося в обсуждение научных проблем и достаточный оптимизм, и энергию, и большие надежды на будущее, и философское измерение.

Одним из важных результатов упомянутой конференции, да и ряда последующих научных форумов, стало понимание, что следующее поколение есть. И этому поколению удается и сохранить традицию, и привнести в синергетику много нового[8].

Книга К. Майнцера показывает, насколько быстро и радикально меняется облик синергетики. Это прежде всего ее нынешний лейтмотив — сложность в ее различных проявлениях — главный герой этой книги.

Синергетика сейчас вбирает в себя идеи и проблемы других научных дисциплин, предлагая свои подходы и свои решения. Это, прежде всего, множество проблем, связанных с субъективной самоорганизацией, с искусственным интеллектом, с моделированием элементов сознания. И здесь ей есть, что сказать. Достаточно упомянуть недавно родившееся и активно развивающееся направление, связанное с *искусственной жизнью*. Здесь самоорганизация происходит в популяции агентов, имеющих генотип и реализующих на его основе свои фенотипы в зависимости от того окружения и той ситуации, в которой оказываются. Сегодня такие модели все шире используются в теории эволюции, экономике, этнографии, в биологии и теории вычислительных систем.

Квантовая механика — одна из основ современного естествознания и научной картины мира — является линейной теорией. И поэтому важным, интересным и неожиданным является проникновение идей синергетики и в эту важную область. Пути взаимодействия этих подходов также очерчены в книге К. Майнцера.

Синергетика позволяет и помогает легко и достаточно конструктивно «скрещивать» подходы и парадигмы разных областей. У клеточных автоматов, развитие которых началось с работы Джона фон Неймана, есть множество достоинств, но и существенные недостатки. То же относится и к нейронным сетям. И когда американский исследователь Леон Чуа в 1991 году на конференции в Кацивели говорил о большом будущем

---

[7] В этой связи можно обратить внимание на их книгу, пользующуюся сейчас большой популярностью: *Князева Е. Н., Курдюмов С. П.* Синергетика: нелинейность времени и ландшафты коэволюции. М.: КомКнига/URSS, 2007 (Синергетика: от прошлого к будущему).

[8] Проблема следующего поколения во многих областях науки стоит очень остро. Поэтому не случайно один из сборников исследователей младшего поколения научной школы С. П. Курдюмова так и назван: «Новое в синергетике. Новая реальность, новые проблемы, новое поколение» (М.: Наука, 2007. 383 с.). Эта книга вызвала большой интерес.

их гибрида — *клеточных нейронных сетей*, то это воспринималось как неоправданный оптимизм. Однако прошли годы, и многие надежды, возлагавшиеся на системы такого класса, которые удалось «вырастить» на основе общих идей синергетики и конкретных прикладных задач, оправдались. Этой проблематике посвящена одна из самых вдохновенных и математических глав этой книги.

Будущее зависит от того, есть ли задачи и проблемы, которыми стоит заниматься, решения которых могут открыть двери в сказку, а также от того, есть ли поколение исследователей, готовых взяться за эту работу. Замечательная книга К. Майнцера показывает, что и то и другое в современной синергетике есть.

Проблема перевода

Конечно б, это было смело,
Описывать мое же дело:
Но панталоны, фрак, жилет,
Всех этих слов на русском нет...
. . . . . .
Du comte il faut
(Шишков, прости:
Не знаю, как перевести.)

А. С. Пушкин

Ко мне взывает периодика:
Нет ли какого переводика?
Но знаю я: переводить –
Как в мир теней переводить...

С. Кирсанов

Человечество говорит на разных языках. И чтобы воспользоваться его основным преимуществом — *способностью передавать понятое и освоенное во времени и пространстве* — надо переводить с одних языков на другие.

Роль переводов в развитии научного знания огромна. По сути, синергетика, как большое научное направление в сообществе исследователей России, состоялась благодаря отличному и своевременному переводу двух книг: *Хакен Г.* Синергетика / Пер. с англ. В. И. Емельянова; Под ред. Ю. Л. Климонтовича и С. Н. Осовца. М.: Мир, 1980. 408 с. и *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур и упорядоченности через флуктуации / Пер. с англ. В. Ф. Пастушенко; Под ред. Ю. А. Чизмаджева. М.: Мир, 1979.

Дело в том, что хорошая книга дает язык, на котором удобно и конкретно можно говорить о каком-то классе задач. И здесь не только эффект отсутствия пророка в своем отечестве. Это возможность взглянуть на свою работу новым взглядом, расширить горизонт. Но для этого перевод должен быть хорошим. И отредактирован он должен быть хорошо в соответствии с уже принятой в этой области терминологией и русской транскрипцией имен основоположников.

В научной сверхдержаве СССР были свои традиции отличного научного перевода. Издательство «Мир» переводило очень много важных и полезных учебников и монографий. Многое переводилось блестяще. В большой степени эти традиции утрачены. И если всерьез говорить о развитии России (как это сейчас начали делать официальные лица), которое невозможно без сильной науки и образованной элиты, то эти традиции придется возрождать.

А пока издательства пытаются решать эти проблемы своими силами. Есть блестящие переводы, в которые вложено очень много. В качестве примера можно привести книгу Роджера Пенроуза «Новый ум короля. О компьютерах, мышлении и законах физики» (Пер. с англ. под общ. ред.

В. О. Малышенко. Изд. 3-е, испр. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2008. 400 с.).

Очевидно, перевод этой работы (безусловно, лучший среди всех книг выдающегося математика и физика Роджера Пенроуза, издававшихся на русском языке) потребовал огромных усилий. Перевод междисциплинарных книг особенно сложен, поскольку и переводчик, и редактор должны хорошо понимать переводимое. Эта книга Пенроуза стала научным бестселлером последних лет в России. К выходу в свет уже готовится ее 4-е издание.

Есть другой блестящий пример — переводимый в течение многих лет по инициативе профессора С. П. Капицы при поддержке Российского нового университета журнал Scientific American (В мире науки). Трудно переоценить значение этой инициативы для отечественной науки.

Однако таких успешных примеров в десятки, а то и в сотни раз меньше, чем необходимо для инновационного развития. Качество перевода многих издаваемых сейчас книг оставляет желать лучшего, а то и просто дискредитирует автора и проблему.

Почти за 20 лет безвременья накопилось очень много отличных книг, которые должны читать студенты, преподаватели, исследователи, руководители в России. *Нужна государственная программа и поддержка тех издательств, которые берут на себя нелегкий труд по переводу и успешно с ним справляются.* Видимо, и Академии, и Министерству образования и науки, и другим заинтересованным ведомствам стоит разобраться, что необходимо перевести, если Россия решила двигаться по пути инновационного развития. Пока имеет место странная, если не сказать абсурдная, ситуация. Например, Российский фонд фундаментальных исследований поддерживает переводы работ, вышедших за три последних года, либо классиков науки, умерших более 30 лет назад (видимо, это как раз то время, которое нужно, чтобы разобраться, классик человек или нет). А книги, написанные между тремя годами и вечностью?

Среди книг особого внимания заслуживают вдохновляющие работы, открывающие двери в будущее. И прекрасная работа Клауса Майнцера, безусловно, относится к ним. Он показывает, что слухи о кризисе синергетики сильно преувеличены и этот междисциплинарный подход, скорее, сталкивается с противоположными проблемами, с болезнями бурного роста.

Выдающийся механик, специалист в области космических полетов, академик Тимур Магометович Энеев после одной из защит, поздравляя защитившего диссертацию, так описал стадии развития исследователя: «Первые 20 лет — время всеучения, следующие 20 — время всеумения. Последующие 20 — время всепризнания, а потом наступает время всепрепятствования». Вероятно, то же самое относится к научным направлениям и подходам. И, судя по всему, синергетика находится в «переходном возрасте» — от «всеучения» к «всеумению». И книга К. Майнцера это очень наглядно показывает.

Книга — результат совместных усилий многих людей. То же относится и к переводу этой книги. Переводчику этой книги Александру Викторовичу Беркову хочется выразить признательность за усилия, вложенные в работу, которая, вероятно, станет важной и значимой для всех, кто интересуется синергетикой. Искренняя благодарность сотруднику Российской

академии государственной службы при Президенте РФ Игорю Евгеньевичу Москалеву, получившему грант на издание этой работы, а также отредактировавшему ряд важных моментов, требовавших взгляда философа. Еще хочется выразить благодарность всем коллегам, которые помогали в нелегкой технической работе, особенно Вере Григорьевне Комаровой; Ирине Макеевой — за замечательную обложку этой книги, Любови Чирок — за огромные усилия в организации большого коллектива сотрудников издательства, взявших на себя труд по подготовке книги к печати, а также всем другим сотрудникам издательства URSS, благодаря которым книга увидела свет.

После чтения книги Клауса Майнцера возникает большое желание, чтобы обсуждаемые планы и мечты воплотились в жизнь, а ожидаемая реальность превзошла радужные перспективы, нарисованные автором. Надеюсь, что такое же ощущение возникнет и у многих читателей.

Председатель редколлегии
серии *«Синергетика:*
от прошлого к будущему»,
профессор *Г. Г. Малинецкий*

Однако целое есть всего лишь бытие,
достигшее завершения
в процессе саморазвития.

Георг Вильгельм Фридрих Гегель
Феноменология духа (1807 г.)

Предисловие к четвертому изданию

Первое издание этой книги, опубликованное в 1994 году, начиналось с утверждения, что новая наука о сложности будет характеризовать развитие всей науки XXI века. В первом десятилетии этого века такое предсказание подтвердилось ошеломляющими новыми эмпирическими результатами и теоретическими прозрениями в физике и биологии, в когнитивных и компьютерных, а также гуманитарных и экономических науках. Сложность и нелинейность являются наиболее замечательными свойствами эволюции материи, разума и человеческого общества. Наука о сложности сейчас ставит своей целью объяснить возникновение порядка в природе и мозге, а также в экономике и обществе, исходя из общих принципов.

Но и новая инженерная мысль сконцентрировалась на исследовании сложности. С одной стороны, нам нужны новые вычислительные машины для анализа сложных данных и выявления будущих тенденций. С другой стороны, принципы сложности все чаще закладываются в проекты генной, био- и компьютерной технологий. Науки о жизни и компьютерные науки перерастают в новый тип сложной инженерии, меняющей основные условия жизни людей и общества. Законы нелинейной динамики реализуются в нелинейных микросхемах, работающих с большой скоростью и имеющих миниатюрные размеры. Однако подобные элементы есть не только в нашем техническом оборудовании и окружающей среде, но и в нашем теле и мозге. Создаются новые поколения роботов. Нанотехнология с использованием новых материалов, а также искусственные жизнь и интеллект — это волнующие вызовы будущей науке о сложности. В век глобализации человечество развивается вместе с распространенными глобальными компьютерными и телекоммуникационными сетями. Но мы также встревожены неравновесными фазовыми переходами в технической, экономической и социальной динамике. Все эти новые вопросы рассмотрены в дополнительных частях и главах расширенного и переработанного четвертого издания этой книги.

Таким образом, «Сложносистемное мышление» обрело новый подзаголовок «Материя, разум, человечество. Новый синтез». Мы сегодня действительно способны определить степень алгоритмической и динамической сложности. Недавно были доказаны основные теоремы вычислительной динамики. Однако из-за хаоса и случайности понимание вычислительной динамики не означает предсказания и определения будущего во всех деталях. Хотя мы и можем с помощью компьютерных экспериментов приобрести опыт работы с нелинейными системами, результаты вычислений не могут заменить реальность. Поскольку жизнь сложна и случайна, то для приобретения жизненного опыта мы должны нашу жизнь прожить. С философской точки зрения, эта книга обрисовывает новые стандарты эпистемологии и этического поведения, которые требуются при

изучении сложных проблем природы, разума, экономики и общества.

Это новое издание было вдохновлено плодотворным сотрудничеством с несколькими коллективами. В 1997 году книга была переведена на японский язык, и я был приглашен посетить университеты Токио, Осаки, Нагасаки и Фукуи. В 1999 году, благодаря появлению перевода на китайский язык, мне удалось посетить университеты Пекина и Шанхая. Во время всемирной выставки Expo-2000 в Ганновере немецкие научные организации предложили мне председательствовать во время конференции «Наука и технология — мысли о будущем» на секциях «Понимание сложных систем» и «Глобальные сети». Во время 2002/2003 учебного года я был членом международной исследовательской группы по теме «Общие принципы теории информации и комбинаторики» в Центре междисциплинарных исследований в Билефельде, Германия. Во время 7-го международного рабочего совещания ИИЭР «Клеточные нейронные сети и их приложения» (Франкфурт, 2002) возникло новое понимание недавних достижений в области аналоговых нейрокомпьютеров и технологии чипов. Как член редакционного совета «Международного журнала по бифуркациям и хаосу в прикладных науках и инженерии» я имел возможность выработать междисциплинарный взгляд на проводящиеся во всем мире исследования сложности. Особо я хочу поблагодарить редактора нашего журнала Леона О. Чуа (Департамент электротехники и компьютерных наук, Калифорнийский университет, Беркли) за поддержку и любезное приглашение посетить Беркли. Приношу также благодарность Стивену Уолфрему и Леону Чуа за разрешение воспроизвести в гл. 5 и 6 ряд рисунков из их книг. Последнее, но не менее важное. Я хочу поблагодарить Вольфа Бейгльбека (изд-во «Шпрингер») за инициативу нового издания и его поддержку.

Аугсбург, март 2003 г.

Клаус Майнцер

Предисловие к третьему изданию

Второе издание «Сложносистемного мышления», как и первое, было распродано менее чем за год. Кроме того, вышли в свет японский и китайский переводы второго издания. И вновь у меня есть возможность выправить и расширить текст.

Включен новый раздел «Сложные системы наномира и самоконструирующиеся материалы», позволяющий проанализировать роль сложных систем в поразительном успехе супрамолекулярной химии, нанотехнологии и технологии «умных» материалов. Эти разделы лежат на границе между материаловедением и наукой о жизни. В последние годы науки о жизни и компьютерные науки выросли вместе в общее поле исследований под названием «искусственная жизнь». Был добавлен еще один новый раздел «От искусственного интеллекта к искусственной жизни», в котором обсуждается роль сложных систем в области искусственной жизни. В новом издании сделан ряд замечаний о связи между подходом Института сложности в Санта Фе к сложным системам и методам синергетики и концепцией параметров порядка, которые являются ключевыми понятиями в этой книге.

Исследования по сложным системам продолжаются во всем мире. Благодарю читателей со всего мира, приславших мне дружеские и вдохновляющие письма. Несколько месяцев тому назад было основано Немецкое общество по сложным системам и нелинейной динамике. Уважаемая Немецкая академия естественных наук «Леопольдина» пригласила меня прочесть лекцию о сложности, за что я выражаю благодарность. Последнее, но не менее важное. Я хочу вновь поблагодарить Вольфа Бейгльбека (изд-во «Шпрингер») за инициативу нового издания и его поддержку.

Аугсбург, ноябрь 1996 г.

Клаус Майнцер

Предисловие ко второму изданию

Первое издание этой книги было распродано меньше чем за год. Очевидно, что сложность и нелинейность являются «горячими» вопросами, представляющими междисциплинарный интерес в естественных и общественных науках. Итог ситуации хорошо подведен в фразе Яна Стюарта (Математический институт, Варвикский университет), написавшего благожелательный отзыв на мою книгу под названием «Возникновение новой науки» (Nature. 1995. **374**. 834): «Нелинейность – это не универсальный ответ, но часто это лучший способ размышлений о проблеме».

Я воспользовался случаем, который предоставляет мне второе издание, чтобы пересмотреть и расширить текст. В книгу включено дополнение о недавно выяснившейся важной роли консервативной самоорганизации в супрамолекулярной химии и материаловедении. Приведены ссылки на недавнюю дискуссию о самоорганизации в альтернативных космологических моделях. Сделано несколько замечаний о новых результатах, касающихся диссипативной самоорганизации в живых клетках. Более подробно анализируются успехи и ограничения адаптивного нейронного протезирования в нейротехнологии. Последняя глава расширена и стала называться «Эпилог о будущем, науке и этике». После краткого введения в традиционные методы предсказаний обсуждаются их ограниченность и новые методики в рамках нелинейности и сложности в естественных и общественных науках. В частности, для современных споров о будущем человечества и об этике особый интерес представляют возможности предсказания и моделирования научного и технологического роста.

Общие методы исследования и создания сложных нелинейных систем должны развиваться в кооперации с естественными и общественными науками в конкретной теоретической, экспериментальной, экспертной деятельности. Поэтому я хочу выразить благодарность за полезные советы своим коллегам: Рольфу Экмюллеру (кафедра нейроинформатики, Боннский университет), Гансу-Йоргу Фару и Вольфу Пристеру (кафедра астрофизики и Институт радиоастрономии Макса Планка, Бонн), Герману Хакену (Институт теоретической физики и синергетики, Штуттгарт), Бенно Хессу (Институт медицинских исследований Макса Планка, Гейдельберг), С. П. Курдюмову (Институт прикладной математики им. Келдыша, Москва), Ренате Майнц (Институт общественных наук Макса Планка, Кельн), Ахиму Мюллеру (кафедра неорганической химии, Билефельдский университет). Последнее, но не менее важное. Я хочу поблагодарить Вольфа Бейгльбека (изд-во «Шпрингер») за инициативу нового издания и его поддержку.

Аугсбург, ноябрь 1995 г.

Клаус Майнцер

Предисловие к первому изданию

Принципиальными чертами эволюции материи, жизни и человеческого общества являются сложность и нелинейность. Создается впечатление, что даже наш разум управляется нелинейной динамикой сложных сетей в нашем мозге. В этой книге рассматриваются сложные системы в физических и биологических, когнитивных и компьютерных, общественных и экономических науках, философии и истории науки. Для объяснения возникновения порядка в природе и мышлении, а также в экономике и обществе с помощью общих принципов вводится междисциплинарная методология.

Иногда говорят, что эти методы предвещают появление новых наук о сложности, характеризующих научное развитие в XXI веке. В книге критически анализируются успехи и границы такого подхода, его методические принципы, а также исторические и философские основы. В эпилоге обсуждаются новые стандарты этического поведения, требуемые сложными проблемами природы и разума, экономики и общества.

«Ядром» этой книги стала статья, представленная на конференции по сложным нелинейным системам, организованной Германом Хакеном и Александром Михайловым в Центре междисциплинарных исследований в Билефельде в октябре 1992 года. В декабре 1992 года госпожа Ангела М. Лахи (изд-во «Шпрингер») предложила переработать основные положения статьи в книгу. Таким образом, я хотел бы выразить свою благодарность доктору Лахи за сердечную и эффективную поддержку, а также Герману Хакену за сотрудничество в ряде проектов по сложным системам и синергетике. Я также хочу поблагодарить Немецкий исследовательский фонд (НИФ) за поддержку моих проектов «Компьютеры, хаос и самоорганизация» (1990–1992: Ma 842/4-1) и «Нейроинформатика» (1993–1994: Ma 842/6-1). Большое влияние оказало на меня преподавание по математической программе для выпускников «Сложные системы» (поддержано НИФ) и экономической программе «Нелинейность в экономике и менеджмент» в университете Аугсбурга. В 1991 и 1993 годах Научный центр земли Северный Рейн – Вестфалия (Дюссельдорф) пригласил меня на две международные конференции по влиянию на культуру компьютерной технологии, нейробиологии и нейрофилософии.

Последнее, но не менее важное. Я хочу особо поблагодарить Дж. Эндрю Росса (изд-во «Шпрингер») за внимательное чтение и корректуру книги с точки зрения носителя языка, и Катю Хютер и Ютту Янсен (Аугсбургский университет) за перепечатку текста.

Аугсбург, июнь 1994 г.

Клаус Майнцер

Глава 1

Введение: от линейного к нелинейному мышлению

Теорию нелинейных сложных систем удалось успешно применить к решению естественно-научных задач — от лазерной физики, квантового хаоса и метеорологии до моделирования молекул в химии и компьютерного моделирования роста клеток в биологии. С другой стороны, представители общественных наук отмечают, что главные проблемы человечества также являются глобальными, сложными, нелинейными и зачастую случайными. Локальные изменения в экологической, экономической или политической системе могут стать причиной глобального кризиса. Линейное мышление и убеждение в том, что целое есть всего лишь сумма его частей, очевидно, устарели. Одним из самых волнующих вопросов, вызывающих в наши дни наибольший научный и общественный интерес, является идея о том, что даже наш разум управляется нелинейной динамикой сложных систем. Если этот тезис вычислительной нейробиологии правилен, то в наших руках действительно имеется мощная математическая стратегия для исследования междисциплинарных проблем естественных, общественных и гуманитарных наук. Однако одна из главных идей, заложенных в этой книге, состоит в том, что умение решать задачи не всегда означает расчет на компьютере и определение будущего. Когда господствует случайность, мы можем понять динамические причины явлений, но не имеем шансов для их прогнозирования. С точки зрения нашего практического поведения, понимание сложной динамики явлений часто более важно, чем численный поиск определенных решений, особенно, когда этого нельзя сделать.

Что стоит за этими успешными междисциплинарными приложениями? В книге показывается, что теория нелинейных сложных систем не может быть сведена к частным физическим законам природы, хотя математические принципы этой теории были открыты и поначалу успешно использованы именно в физике. Поэтому в попытке объяснения динамики лазера, экологических популяций или нашего мозга схожими структурными законами нет ничего от традиционного «физикализма». Это — междисциплинарная методология для объяснения возникновения определенных макроскопических явлений за счет нелинейных взаимодействий микроскопических элементов в сложных системах. Макроскопические явления могут принимать форму световых волн, жидкостей, облаков, химических волн, растений, животных, популяций, рынков и ансамблей нервных клеток, характеризующихся параметрами порядка. Все эти явления не сводятся

к микроскопическому описанию отдельных атомов, молекул, клеток, организмов и тому подобных сложных систем. На самом деле, они представляют свойства реальных макроскопических явлений, таких как разности потенциалов полей, общественная или экономическая мощь, чувства и даже мысли. Кто станет отрицать, что чувства и мысли могут изменить мир?

Исторически физические теории часто оказывали влияние на понятия общественных и гуманитарных наук. В век механизации Томас Гоббс описывал государство как машину («Левиафан»), граждане которого были зубчатыми колесиками. Для Ламетри человеческая душа сводилась к зубчатой передаче автомата. Адам Смит объяснял механизм функционирования рынка наличием «невидимой» силы типа ньютоновской силы тяготения. В классической механике причинность определяется уравнениями движения Ньютона или Гамильтона. Консервативная система характеризуется обратимостью (т. е. симметрией или инвариантностью) во времени и сохранением энергии. Известными примерами служат небесная механика и маятник без трения. Диссипативные системы, например ньютоновские силы с учетом силы трения, необратимы.

Однако в целом природа рассматривалась как огромная консервативная и детерминированная система, события в которой можно было предсказать и проследить в каждый момент времени в будущем и прошлом, если полностью задать начальное состояние («демон Лапласа»). Анри Пуанкаре первым заметил, что небесная механика не является полностью предсказуемым часовым механизмом, даже если наложить ограничения консерватизма и детерминизма. Взаимодействия всех планет, звезд и небесных тел нелинейны в том смысле, что эти взаимодействия могут приводить к хаотическим траекториям (например, проблема трех тел). Примерно через шестьдесят лет после открытия Пуанкаре А. Н. Колмогоров (1954), В. И. Арнольд (1963) и Ю. Мозер доказали так называемую теорему КАМ: траектории в фазовом пространстве классической механики не являются ни полностью регулярными, ни полностью нерегулярными, а очень чувствительны к выбору начальных условий. Малые изменения могут привести к хаотическому развитию («эффект бабочки»).

В XX в. фундаментальной физической теорией стала квантовая механика [1.1]. В рамках шрёдингеровской волновой механики квантовый мир считается консервативным и линейным. При первичном квантовании классические системы, описываемые функцией Гамильтона, заменяются на квантовые системы (например, электроны и протоны), описываемые оператором Гамильтона. Предполагается, что эти системы консервативны, т. е. не диссипативны и инвариантны по отношению к обращению времени и, таким образом, удовлетворяют закону сохранения энергии. Состояния квантовой системы описываются векторами (волновыми функциями) гильбертова пространства, натянутого на собственные векторы ее оператора Гамильтона. Динамика квантовых состояний определяется детерминированным дифференциальным уравнением (уравнением Шрёдингера), которое линейно, в котором имеет место принцип суперпозиции. Иными словами, решения этого уравнения (волновые функции или векторы состояния) могут интерферировать,

как в классической оптике. Принцип суперпозиции или линейности в квантовой механике допускает коррелированные («перепутанные») состояния комбинированных систем, существование которых с большой точностью подтверждается в экспериментах ЭПР-типа [1] (А. Аспект, 1981). В перепутанном чистом квантовом состоянии суперпозиции наблюдаемая может иметь только неопределенные значения. Отсюда следует, что перепутанное состояние квантовой системы и измерительный прибор могут иметь только неопределенные значения. Однако в лаборатории измерительный прибор показывает вполне определенные измеренные значения. Таким образом, линейная квантовая динамика не может объяснить процесс измерения.

В рамках копенгагенской интерпретации Бора, Гейзенберга и других, процесс измерения объясняется так называемой «редукцией волнового пакета», т. е. расщеплением состояния суперпозиции на два отдельных состояния с определенными собственными значениями — состояние измерительного прибора и состояние измеряемой квантовой системы. Очевидно, что необходимо отличать линейную динамику квантовых систем от нелинейного акта измерения. Такая нелинейность в мире иногда объясняется возникновением человеческого сознания. Евгений Вигнер (1961) предположил, что для разумных наблюдателей линейность уравнения Шрёдингера должна нарушаться и замениться на некоторую нелинейную процедуру, согласно которой либо одна, либо другая альтернатива должна быть исключена. Но вигнеровская интерпретация вынуждает нас поверить в то, что линейная квантовая суперпозиция должна разложиться на отдельные части только в тех уголках Вселенной, в которых возникло человеческое или человекоподобное сознание.

В истории науки антропные или телеологические аргументы часто демонстрировали слабость и пробелы в научных объяснениях. Так, некоторые ученые, например Роджер Пенроуз, предполагают, что линейная динамика квантовой механики не подходит для объяснения космической эволюции, приводящей к возникновению сознания. Пенроуз доказывает, что единая теория линейной квантовой механики и нелинейной общей теории относительности может, по крайней мере, объяснить отдельные состояния макроскопических систем в мире. Измерительный прибор — это макроскопическая система, а измерительный процесс необратим и далек от термодинамического равновесия. Следовательно, объяснение может быть успешным только в единой нелинейной теории.

Даже обобщение шрёдингеровской волновой механики на квантовую теорию поля уже нелинейно. В квантовой теории поля полевые функции заменяются полевыми операторами в схеме так называемого вторичного квантования. Например, уравнение квантового поля с двухчастичным потенциалом содержит нелинейное слагаемое, соответствующее рождению пар элементарных частиц. В общем случае реакции между элементарными частицами в квантовой теории поля представляют существенно нелинейные явления. В результате взаимодействий элементарной частицы ее квантовые состояния имеют

[1] ЭПР-эксперимент — предложенный Эйнштейном, Подольским и Розеном мысленный опыт по проверке основных положений квантовой механики. — *Прим. пер.*

только конечное время жизни и поэтому нарушают обратимость во времени. Таким образом, даже квантовый мир сам по себе не является в общем случае ни консервативным, ни линейным.

В теории систем сложность означает не только нелинейность, но и наличие огромного числа элементов со многими степенями свободы [1.2]. Все макроскопические системы типа камней или планет, облаков или жидкостей, растений или животных, популяций животных или человеческих сообществ состоят из отдельных элементов — атомов, молекул, клеток или организмов. Поведение отдельных элементов в сложных системах с огромным числом степеней свободы нельзя ни предсказать, ни проследить вспять по времени. Детерминированное описание отдельных элементов должно быть заменено на эволюцию вероятностных распределений.

Во второй главе анализируются *сложные системы и эволюция материи*. Со времен досократиков фундаментальной проблемой философии природы было выяснение того, каким образом из сложных, нерегулярных и хаотичных состояний материи возникает порядок. Гераклит верил в упорядочивающую силу энергии (*логоса*), которая гармонизирует нерегулярные взаимодействия и создает упорядоченные состояния материи. Современная термодинамика описывает возникновение порядка с помощью математических понятий статистической механики. Мы различаем два типа фазовых переходов (самоорганизации) упорядоченных состояний. *Консервативная самоорганизация* означает фазовый переход обратимых структур в тепловом равновесии. Типичными примерами являются рост кристаллов льда или возникновение намагниченности в ферромагнетике в результате отжига системы до критического значения температуры. Консервативная самоорганизация в основном создает упорядоченные структуры с малой энергией при низких температурах, описываемые больцмановским распределением. В современной технологии такие переходы используются в материаловедении для формирования структур. Вызовом для ключевых технологий будущего являются сложные системы в наномире и самоконструирующиеся материалы.

Диссипативная самоорганизация — это фазовый переход необратимых структур вдали от теплового равновесия [1.3]. Макроскопические структуры возникают за счет сложной нелинейной кооперации микроскопических элементов в тот момент, когда энергетическое взаимодействие диссипативной («открытой») системы с окружающей средой достигает некоторого критического значения. Выражаясь несколько абстрактно, устойчивость возникающих структур гарантируется определенным балансом нелинейности и диссипации. Слишком большое нелинейное взаимодействие или большая диссипация приводят к разрушению структуры.

Так как условия диссипативных фазовых переходов носят весьма общий характер, то существует большое разнообразие междисциплинарных приложений. Типичным физическим примером является лазер. В химии ведущие центры или спиральные волны в реакции Белоусова—Жаботинского (БЖ) возникают тогда, когда определенные химические вещества смешиваются в критической пропорции. Конкуренция отдельных спиральных волн ясно показывает нелинейность этих явлений, так как в слу-

чае выполнения принципа суперпозиции эти волны проникали бы друг в друга как лучи в оптике.

Фазовые переходы в нелинейных диссипативных сложных системах находят объяснение в синергетике. На качественном уровне можно сказать, что старые структуры становятся неустойчивыми и разрушаются за счет изменения управляющих параметров. На микроскопическом уровне устойчивые моды старых состояний подавляются нестабильными модами («принцип подчинения» Хакена) [1.4]. Они определяют параметры порядка, которые описывают макроскопическую структуру и формы упорядоченности. Существуют различные формы фазовых переходов, соответствующие разным *аттракторам*. Такие аттракторы можно представить как потоки, скорость которых шаг за шагом растет. На первом уровне существует однородное состояние равновесия («неподвижная точка»). При более высокой скорости может наблюдаться бифуркация двух или более вихрей, соответствующая периодическим и квазипериодическим аттракторам. В конце концов порядок переходит в детерминированный хаос, представляющий фрактальный, подобный себе на разных масштабах, аттрактор сложной системы. Я хотел бы подчеркнуть, что с философской точки зрения микроскопическое описание материи в синергетике отличается от макроскопических упорядоченных состояний. Таким образом, концепция порядка в синергетике напоминает мне «логос» Гераклита или «форму» Аристотеля, которые порождают упорядоченные состояния в природе за счет процессов преобразования материи. Но, конечно, во времена античности не могло быть и речи о каком-либо математическом описании.

На математическом языке микроскопический вид сложной системы описывается уравнением эволюции вектора состояния, каждый компонент которого зависит от координат и времени, причем компоненты могут означать компоненты скорости жидкости, ее температурное поле или концентрацию химических веществ в случае химических реакций. Принцип подчинения в синергетике позволяет исключить степени свободы, относящиеся к устойчивым модам. В первом приближении уравнение эволюции можно преобразовать к виду со специальной формой нелинейности, применимой для тех систем, в которых возникает конкуренция между структурами. Амплитуды старших членов неустойчивых мод носят название *параметров порядка*. Уравнение их эволюции описывает возникновение макроскопических структур. Возникающие структуры («аттракторы») достигаются при переходе, который можно понимать как определенный тип нарушения симметрии [1.5]. С философской точки зрения, причиной эволюции материи является нарушение симметрии, как это ранее отмечал Гераклит.

Создается впечатление, что понимание сложных систем и нелинейной динамики в природе приводит к подходящим моделям эволюции материи. Но как практически найти правильную модель? Физики, химики, биологи или медики начинают со сбора данных в неизведанной области исследований. Все, что они получают, — это конечные ряды измеренных данных, соответствующих зависящим от времени событиям в неизвестной динамической системе. Исходя из временны́х рядов этих данных, ученые должны реконструировать поведение системы с целью угадать тип описывающего ее динами-

ческого уравнения. Поэтому анализ временных рядов бросает вызов современным исследованиям в теории хаоса и нелинейной динамике.

В третьей главе анализируются *сложные системы и эволюция жизни*. Как видно из истории науки и философии, люди верили в принципиальную разницу между «неживой» и «живой» материей. Аристотель представлял жизнь как способность к самоорганизации (энтелехия), стимулирующую рост растений и животных до их окончательного вида. Живая система способна двигаться сама, в то время как неживую систему можно привести в движение только извне. Жизнь объяснялась телеологически, т. е. действием непричинных («жизненных») сил, стремящихся достичь определенных целей в природе. В XVIII в. Кант показал, что самоорганизация живых организмов не может быть объяснена механической системой ньютоновской физики. В знаменитой цитате он утверждал, что для объяснения стебелька травы все еще нет своего Ньютона. В XIX в. было открыто второе начало термодинамики, описывающее необратимое движение замкнутых систем к состоянию с максимальными энтропией или беспорядком. Но каким образом кто-то может объяснить возникновение порядка в дарвиновской схеме эволюции жизни? Больцман подчеркивал, что живые организмы являются открытыми диссипативными системами, взаимодействующими с окружающей их средой, что не нарушает второго начала термодинамики для замкнутых систем. Но, тем не менее, в статистической интерпретации от Больцмана до Моно возникновение жизни может быть только случайным событием, локальной космической флуктуацией «на краю Вселенной».

В рамках теории сложных систем с точки зрения диссипативной самоорганизации возникновение жизни не случайно, а необходимо и закономерно. Во Вселенной случайными могут быть только условия возникновения жизни (например, на планете Земля). В общем случае биология различает онтогенез (рост организмов) и филогенез (эволюция видов). В любом случае мы имеем сложные диссипативные системы, развитие которых можно объяснить эволюцией (макроскопических) параметров порядка, вызванной нелинейными (микроскопическими) взаимодействиями молекул, клеток и т. п. в далеких от теплового равновесия фазовых переходах. Формы биологических систем (растения, животные и пр.) описываются параметрами порядка. Аристотелевская телеология целей в природе интерпретируется с помощью аттракторов в фазовых переходах. Однако не требуется никаких особых «жизненных» или «телеологических» сил. С философской точки зрения возникновение жизни можно объяснить в рамках нелинейной причинности и диссипативной самоорганизации, хотя по эвристическим соображениям его можно описывать и на языке телеологии.

Напомню читателю, что добиологическая эволюция биомолекул была проанализирована и смоделирована Манфредом Эйгеном и другими. Идея Спенсера о том, что эволюция жизни характеризуется увеличением сложности, может быть точно сформулирована в рамках диссипативной самоорганизации. Хорошо известно, что Тьюринг анализировал математическую модель организмов, представленных как сложные клеточные системы. Гирер, Мейнхардт и другие описывали рост организма (напри-

мер, слизневика) уравнениями эволюции для агрегации клеток. Когда в окружающей среде достигается некоторое критическое значение количества клеточной пищи, то нелинейные взаимодействия амеб приводят к возникновению макроскопического организма типа слизневика. Эволюция параметра порядка соответствует формам агрегации во время фазового перехода макроскопического организма. Взрослое многоклеточное тело можно интерпретировать как «цель» или (лучше) «аттрактор» органического роста. Многоклеточные тела, вроде генетических, нервных, иммунных или экологических систем, являются примерами сложных динамических систем, составленных из сетей множества взаимодействующих элементов. С. Кауффман предложил изучать случайные булевы сети, которые можно запрограммировать на компьютере. В компьютерных экспериментах он обнаружил иерархию динамического поведения с неподвижными точками и циклами увеличивающейся сложности, которую можно наблюдать в реальных клетках.

С помощью понятий синергетики можно описывать даже экологический рост биологических популяций. Экологические системы представляют собой сложные диссипативные системы растений или животных со взаимными нелинейными метаболическими взаимодействиями друг с другом и с окружающей средой. Симбиоз двух популяций с их источниками пищи можно описать тремя связанными дифференциальными уравнениями, которые уже использовал Эдвард Лоренц для описания погоды в метеорологии. В XIX в. итальянские математики Лотка и Вольтерра смоделировали развитие двух экологически связанных популяций. Нелинейные взаимодействия этих популяций описываются двумя связанными дифференциальными уравнениями для хищника и жертвы. Эти уравнения имеют особые точки (положения равновесия). «Аттракторами эволюции» являются периодические колебания.

Теория сложных систем позволяет анализировать нелинейную причинность природных экологических систем. С начала промышленной революции человеческое общество стало все больше и больше вовлекаться в природные экологические циклы. Но сложный баланс сил в природе подвергается серьезной опасности из-за линейного роста традиционного промышленного производства. Люди считают, что природа содержит неисчерпаемые источники энергии, воды, воздуха и т. п., которые можно использовать, не нарушая природный баланс. Промышленность производит нескончаемый поток товаров, совершенно не учитывая синергетические последствия вроде озоновой дыры или накопления отходов. Эволюция жизни трансформируется в эволюцию человеческого общества.

Возможно, наиболее спорное междисциплинарное приложение сложных систем обсуждается в четвертой главе «*Сложные системы и эволюция системы разум–мозг*». В истории философии и науки известно много разных предложений для решения проблемы разума — мозга. Философы-материалисты — Демокрит, Ламетри и другие — предлагали свести разум к взаимодействиям атомов. Идеалисты — Платон, Пенроуз и другие — подчеркивали, что разум полностью независим от материи и мозга. Для Декарта, Эккла и других разум и материя — отдельные субстанции, взаимодействующие друг с другом. Лейбниц верил

в метафизический параллелизм разума и материи, поскольку они не способны физически взаимодействовать. Согласно Лейбницу, разум и материя существуют в «предустановленной гармонии», как двое синхронизированных часов. Современные философы, размышляющие над проблемой разума, например Дж. Сёрл, придерживаются своего рода эволюционного натурализма. Сёрл доказывает, что разум характеризуется интенциональными ментальными состояниями, являющимися внутренними свойствами биохимии человеческого мозга, которые поэтому невозможно имитировать на компьютере.

Однако теория сложных систем не сводится к этим более или менее односторонним позициям. Основанный на сложных системах подход является междисциплинарной методологией исследования нелинейных сложных систем, и в частности клеточного органа, называемого мозгом. Возникновение ментальных состояний (например, распознавание образов, чувства, мысли) объясняется эволюцией (макроскопических) параметров порядка в клеточных ансамблях, вызванной нелинейными (микроскопическими) взаимодействиями нервных клеток в ходе обучения вдали от теплового равновесия. Клеточные ансамбли с ментальными состояниями интерпретируются как аттракторы (неподвижные точки, периодические, квазипериодические или хаотические) соответствующих динамических систем, описывающих мозг.

Если рассматривать мозг как сложную систему нервных клеток, то его динамика, как считают исследователи, описывается нелинейной математикой нейронных сетей. Например, распознавание образов интерпретируется как тип фазового перехода по аналогии с уравнениями эволюции, которые используются для описания возникновения структур в физике, химии и биологии. С философской точки зрения, мы получаем междисциплинарную программу исследований, которая должна позволить нам, основываясь на общих принципах, объяснить нейрокомпьютерную самоорганизацию как естественное следствие физических, химических или биологических процессов. Как и в случае образования структур, конкретный распознаваемый образ (например, лицо-прототип) описывается параметрами порядка, обладающими конкретным набором свойств. Если задана только часть свойств, принадлежащих параметру порядка (например, часть лица), то параметр порядка дополнит их другими свойствами, так что вся система станет действовать как ассоциативная память (например, реконструкция сохраненного лица-прототипа по изначально заданной части этого лица). Согласно принципу подчинения Хакена, свойства распознанной структуры соответствуют подсистемам, подчиненным в процессе ее образования.

Но что можно сказать о возникновении сознания, самосознания и интенциональности? В синергетике следует различать внутренние и внешние состояния мозга. Во внешних состояниях восприятия и распознавания параметры порядка соответствуют ансамблям нервных клеток, представляющим образы внешнего мира. Внутренние состояния мозга — не что иное как самосоотносимые состояния, т. е. ментальные состояния, ссылающиеся снова на ментальные состояния, а не на состояния внешнего мира. На традиционном языке философии можно сказать, что люди способны рефлексировать, осмысли-

вая себя (саморефлексия), и соотносить внешние ситуации в мире с их собственным внутренним состоянием, чувствами и намерениями (интенциональность). В недавних нейробиологических исследованиях ученые выяснили, что возникновение сознания и самосознания зависит от критического значения скорости образования «метаклеточных ансамблей», т. е. клеточных ансамблей, представляющих клеточные ансамбли, которые снова являются клеточными ансамблями и т. д., что представляет нейронную реализацию саморефлексии. Но эта гипотеза (если она верна) может лишь объяснить структуру возникающих свойств, например, сознания. Конечно, решая математические уравнения эволюции клеточных ансамблей, мы не испытываем те же чувства, что и наш сосед. В этом смысле (это негативный вывод) наука слепа. Но, с другой стороны, (это позитивный вывод) сохраняется персональная *субъективность* — возможности расчетов и имитации с помощью компьютеров в нелинейной динамике в принципе ограничены.

Так или иначе, основанный на сложных системах подход решает старую метафизическую проблему, описанную Лейбницем в следующих словах: если представить мозг как большую машину, в которую можно войти так же, как внутрь мельницы, то внутри мы обнаружим лишь его отдельные части, подобные зубчатым колесам в мельнице, и никогда не найдем разума, не говоря уже о человеческой душе. Конечно, на микроскопическом уровне мы можем только описать динамику нейронов как клеточных частей мозга. Но на макроскопическом уровне нелинейные взаимодействия в сложной системе нейронов приводят к возникновению клеточных ансамблей, относящихся к параметрам порядка, которые уже нельзя отождествить с состояниями отдельных мозговых клеток. Целое не есть сумма его частей.

Очевидно, что подход, основанный на сложных системах, приводит к решениям проблемы разум-тело, которые находятся вне традиционных философских ответов, даваемых идеализмом, материализмом, физикализмом, дуализмом, интеракционизмом и пр. В том, что касается разницы между так называемыми естественным и искусственным интеллектами, важно заметить, что принципы нелинейных сложных систем не зависят от биохимии человеческого мозга. Такой мозг является «естественным» воплощением указанных принципов, в том смысле, что сложная мозговая система есть продукт физической и биологической эволюции. Однако возможны другие («искусственные») модели, порождаемые человеческой технологией, хотя их реализация может столкнуться с техническими и этическими ограничениями.

В гл. 5 мы обсуждаем *сложные системы и эволюцию вычислимости*. Традиционными понятиями теории вычислимости являются машины Тьюринга и алгоритмическая сложность. Существуют ли ограничения на аналогии между компьютерами, человеческими разумом и мозгом, вытекающие из результатов Гёделя и Тьюринга о неполноте и неразрешимости? Как можно совместить понимание человеческого мозга одновременно как машины для обработки информации и основанной на знаниях системы? Концепция клеточных автоматов Джона фон Неймана прояснила идею самоорганизующихся клеточных систем. Недавние компьютерные эксперименты Стивена Уолфрема показали, что все типы аттракторов нелинейных динамических си-

стем, от неподвижной точки, предельных циклов и до хаоса, можно имитировать клеточными автоматами. Даже случайность можно генерировать подходящими клеточными автоматами, хотя локальные правила клеточных взаимодействий могут быть очень просты и хорошо известны. Клеточные автоматы приводят к дискретным приближениям сложных динамических систем, определяемых непрерывными дифференциальными уравнениями.

Вычислительная динамика открывает новые перспективы для *сложных систем и эволюции искусственных жизни и интеллекта* (гл. 6). Искусственная жизнь, так же как нейронные сети, корнями уходит в универсальный метод клеточных автоматов. Самоорганизация и обучение являются главными свойствами нейронных сетей, моделирующих разумные системы. В синергетических компьютерах уравнения для параметров порядка допускают новый тип нехеббовского обучения[2)], а именно стратегию минимизации числа синапсов. В противоположность нейрокомпьютерам, работающим по принципу спиновых стекол (например, системы Хопфилда), нейроны не являются пороговыми элементами, а осуществляют простые алгебраические действия, такие как умножение и сложение. Помимо детерминированных однородных сетей Хопфилда существуют так называемые больцмановские машины со стохастической сетевой архитектурой недетерминированных элементов и распределенным представлением знаний, которые математически описываются некоторой энергетической функцией. В то время как хопфилдовские системы используют правило обучения Хебба, больцмановские машины используют алгоритм обратного распространения ошибки (правило Уайдроу–Хоффа) с нейронами, спрятанными в многослойной сети.

В общем случае цель обучающего алгоритма заключается в том, чтобы с помощью самоорганизации уменьшить информационно-теоретическую меру расхождения между внутренней моделью мира в мозге и реальной окружающей средой. Недавнее возрождение интереса к проблеме нейронных сетей вызвано главным образом успешными техническими приложениями статистической механики и нелинейной динамики в физике твердого тела, в теории спиновых стекол, при разработке параллельных химических, оптических, синергетических компьютеров, в лазерных системах. Другие причины – недавнее развитие вычислительных мощностей и уровня технологий, делающих все более реальным вычислительный подход к сложным нелинейным системам. С философской точки зрения, традиционные концепты эпистемологии, такие как ощущение, воображение и распознавание, могут обсуждаться в междисциплинарных рамках сложных систем.

В электротехнике, теории информации и вычислительной технике понятие *клеточных нейронных сетей* (КНС) становится перспективной парадигмой исследований сложности, реализованной в информационной технологии и производстве чипов [1.6]. Техническим ответом на *сенсорную революцию* стали *аналоговые клеточные компьютеры*, имитирующие анатомию и физиологию органов чувств и ис-

[2)] Хеббовское обучение состоит в том, что между нейронами, находящимися в одинаковых состояниях, при предъявлении набора образов устанавливаются связи. Чем чаще это происходит, тем больше веса этих связей, т. е. тем сильнее состояние одного нейрона начинает влиять на состояние другого. – *Прим. ред.*

полнительных органов. КНС представляет собой нелинейную аналоговую цепь, обрабатывающую сигналы в реальном времени.

Архитектура этой сети восходит к более ранней парадигме *клеточных автоматов* (КА) Дж. фон Неймана. В противоположность обычным клеточным автоматам, главные процессоры КНС непрерывно во времени принимают и посылают аналоговые сигналы, соответствующие действительным числам. Универсальная микросхема КНС представляет собой техническую реализацию универсальной машины КНС (УМ КНС), аналогичной универсальной машине Тьюринга в цифровых компьютерах. Она является краеугольным камнем информационной технологии, так как представляет собой первый полностью программируемый похожий на мозг компьютер промышленных размеров с хранимой программой и динамическими массивами. Кроме того, подходящие КНС могут имитировать все виды образования структур и распознавания образов, анализировавшиеся в синергетике и нелинейной динамике. Два главных преимущества КНС — это их строгий математический анализ и их техническая реализация. Динамическая сложность клеточных автоматов и соответствующих им нелинейных динамических систем может быть охарактеризована точным индексом сложности. С момента предложения детально изучить и использовать такие системы Чуа и Янга в 1988 г. произошел невероятный рост скорости компьютерного счета, сопровождаемый значительным уменьшением электрической мощности в первых микросхемах КНС, что привело в наши дни к интенсивным исследованиям КНС.

Важными приложениями подхода, основанного на сложных системах, являются нейробионика и медицина. Человеческий мозг представляет собой не только клеточный компьютер, возникший в результате естественной эволюции, но и является центральным органом нашего тела, требующим ухода и лечения. Например, нейрохирургия — это медицинская дисциплина, отвечающая за поддержание здоровья биологической среды человеческого разума. Главной целью нейробионики является будущее благополучие объекта мозг—разум. В последние годы были разработаны новые диагностические процедуры и технические устройства для трансплантации органов, основанные на новом понимании мозга как сложной динамической системы. В этом контексте неизбежно изменение методов клинического лечения. Нервные и психические формы заболеваний можно интерпретировать как сложные состояния нелинейной системы большой чувствительности. Даже лечение должно учитывать высокую чувствительность этого сложного органа. Другим, более спорным аспектом новой технологии является *киберпространство*. Ощущение, чувство, интуиция и фантазия могут ли рассматриваться как продукты искусственных нервных сетей? Ключевым словом в современной философии культуры стала *виртуальная реальность*.

Пройдя путь от материи к жизни, разуму-мозгу и искусственному разуму, книга завершается в духе гегелевского большого синтеза седьмой главой, посвященной *сложным системам и эволюции человеческого общества*. В социальных науках обычно проводят строгое различие между биологической эволюцией и историей человеческого общества. Причина состоит в том, что развитие наций, рынков и культур, очевидно, сопровождается це-

ленаправленным поведением людей, т. е. человеческими решениями, основанными на устремлениях, ценностях и т. д. С микроскопической точки зрения мы, конечно, можем наблюдать отдельных индивидуумов с их целями, верованиями. Однако с макроскопической точки зрения развитие *наций, рынков и культур* не просто сумма их частей. Как мы все хорошо знаем, монопричинность в политике и истории — ошибочный и опасный *способ линейного мышления*. Синергетика, похоже, является успешной стратегией при рассмотрении сложных систем даже в гуманитарных науках. Очевидно, что для применения междисциплинарного синергетического подхода совсем не обязательно сводить историю культуры к биологической эволюции. В противоположность любому редукционистскому типу естествознания и физикализма мы распознаем характерные ментальные *свойства человеческих обществ*. Таким образом, подход, основанный на анализе сложных систем, может стать методом наведения мостов между естественными и гуманитарными науками, отсутствие которого в свое время подвергалось критике в знаменитой концепции «двух культур» Чарльза Сноу.

В рамках теории сложных систем поведение человеческих популяций объясняется эволюцией (макроскопических) параметров порядка, вызванной нелинейными (микроскопическими) взаимодействиями людей или подгрупп людей (государств, институтов и т. д.). *Социальный или экономический* порядок интерпретируется как аттрактор соответствующих динамических систем. Аллен и другие анализировали рост городов. С микроскопической точки зрения, эволюция популяций в отдельно взятых городских агломерациях математически описывается связанными дифференциальными уравнениями со слагаемыми и функциями, относящимися к производительности труда, экономическому производству каждого региона и пр. Макроскопическое развитие всей системы иллюстрируется полученными с помощью компьютеров графиками с меняющимися центрами индустрии, отдыха и т. п., динамика которых определяется нелинейными взаимодействиями отдельных городских районов (например, преимущества и недостатки далеких и близких транспортных связей, коммуникаций и пр.). Важным результатом синергетической модели является то, что развитие городов не может объясняться свободной волей одного человека. Хотя местные жители действуют, исходя из индивидуальных целей, планов и т. д., тенденция к совместному развитию есть результат нелинейных взаимодействий.

Другим примером междисциплинарного применения синергетики является модель миграции Вайдлиха. Он отличает микроуровень индивидуальных решений от макроуровня динамических коллективных процессов в обществе. Вероятностные макропроцессы со стохастическими флуктуациями описываются основным уравнением для человеческих *социоконфигураций*. Каждый компонент социоконфигурации относится к субпопуляции с характеристическим вектором поведения. Макроскопическое развитие миграции в обществе можно проиллюстрировать полученными с помощью компьютеров графиками с меняющимися центрами смешивания, гетто, бродяжничеством и хаосом, которые вызваны нелинейными взаимодействиями социальных субпопуляций. В такой модели очевидны различия между сложными системами с уча-

стием человека и без него. На микроскопическом уровне человеческая миграция целенаправленна (т. е. определяется соображениями пользы) и нелинейна (т. е. зависит от индивидуальных и коллективных взаимодействий). Главный результат синергетики снова заключается в том, что явления национальной и межгосударственной миграции невозможно объяснить свободной волей отдельных личностей. Я думаю, что в наши дни миграция — один из весьма драматических вопросов, демонстрирующий, насколько опасным может быть линейное и монопричинное мышление. Недостаточно иметь хорошие намерения, не рассматривая при этом нелинейные эффекты отдельных решений. Линейные мышление и действие могут спровоцировать глобальный хаос, хотя локально мы действуем с лучшими намерениями.

Грустно говорить, что в экономике все еще доминируют линейные модели. С качественной точки зрения уже модель свободного рынка Адама Смита может быть объяснена самоорганизацией. Смит подчеркивал, что хорошие или плохие намерения отдельных личностей несущественны. В противоположность централизованной экономической системе, равновесие спроса и предложения не управляется центральным процессором по заданной программе, а есть результат действий «невидимой руки» (Смит), т. е. определяется нелинейным взаимодействием потребителей и производителей. Недавний интерес экономистов к нелинейным диссипативным системам обусловлен ростом основанных на знаниях высокотехнологичных производств с положительной обратной связью (т. е. рост производства, зависящий от роста научных и технологических знаний в сфере электроники, производства компьютеров и т. д.) в противоположность старой промышленности с отрицательной обратной связью (т. е. падающее производство, зависящее от ограниченных ресурсов, таких как уголь или сталь).

Основанный на анализе сложных систем подход резко расширил область своего применения от нейронных сетей до глобальных сетей технической информации. Поток информации в последних осуществляется через информационные пакеты, содержащие адреса источника и адресата. Динамика Интернета во многом аналогична КА и КНС. Вычислительные и информационные сети стали техническими суперорганизмами, вовлеченными в квазиэволюционный процесс. Информационный потоп в более или менее хаотичном Интернете представляет вызов разумному поиску информации. Чтобы найти эвристические устройства для управления потоками информации в Интернете, можно использовать аналогии со свойствами самоорганизации и обучения в мозге. Однако сложность создания глобальных сетей не ограничивается Интернетом. Везде в «разумной» среде окружающего нас мира распространены менее сложные, чем персональные компьютеры (ПК), дешевые, маломощные и умные микросхемы. Вездесущая компьютеризация — это вызов стандартным сетям и пакетной маршрутизации данных со стороны глобальных сетей беспроводного широкополосного доступа к мультимедиа в режиме реального времени. Не только миллионы ПК, но и миллиарды микропроцессорных устройств взаимодействуют через Интернет. Ошеломляющий поток данных и информации заставляет нас работать на грани хаоса.

В целом процессы экономической информации очень сложны и требуют для своего описания нелинейных диссипативных моделей. Напомним, что разные аттракторы, от экономических циклов до финансового хаоса, можно объяснить только синергетическими эффектами нелинейных взаимодействий потребителей и производителей, налоговой политики, рынка сбыта, безработицы и т. п. Даже в менеджменте обсуждаются возможные сложные модели, позволяющие поддержать креативность и инновации за счет нелинейного сотрудничества на всех уровнях управления и производства. Однако опыт показывает, что рациональность принятия решений человеком ограничена. Познавательные возможности людей подавляются сложностью и случайностью нелинейных систем, которыми они пытаются управлять. Впервые введенная Гербертом Саймоном *концепция ограниченной рациональности* была реакцией на ограниченность человеческих знаний, информации и времени.

Очевидно, что существует несколько успешных стратегий обращения со сложными нелинейными системами. Мы обсудим примеры применений этих стратегий в квантовой физике, гидродинамике, химии и биологии, а также в экономике, социологии, неврологии и создании искусственного интеллекта.

В чем же причина столь успешных применений таких подходов в естественных и гуманитарных науках? Основанный на теории сложных систем подход не сводится к особым физическим законам природы, хотя его математические принципы были открыты и впервые успешно применены именно в физике (например, в лазерной физике). Таким образом, это *междисциплинарная методология* для объяснения возникновения определенных макроскопических явлений в результате нелинейных взаимодействий микроскопических элементов в сложных системах. Макроскопические явления могут иметь форму световых волн, жидкостей, облаков, химических волн, биомолекул, растений, животных, популяций, рынков, ансамблей нервных клеток, пробок на дорогах или Интернета, которые характеризуются параметрами порядка (табл. 1.1). С философской точки зрения, важно понять, что параметры порядка в сложных системах не сводятся к микроскопическому уровню атомов, молекул, клеток, организмов и т. д. В некоторых случаях они являются измеримыми величинами (например, разность потенциалов поля в лазере). В других случаях они представляют собой качественные свойства (например, геометрические формы структур). Тем не менее параметры порядка — это не какие-то абстрактные понятия математики, не имеющие никакого отношения к реальности. На самом деле они представляют свойства реальных макроскопических явлений, такие как поля, общественная или экономическая мощь, чувства и даже мысли. Кто станет отрицать, что чувства и мысли могут изменить мир? Если нам удастся понять их нелинейную динамику, то когда-нибудь станет возможным их реализация в чипах типа КНС.

Таким образом, основанный на теории сложных систем подход не является метафизическим онтологическим процессом. Принципы синергетики (помимо других) представляют эвристическую схему для построения моделей нелинейных сложных систем в естественных и гуманитарных науках. Если эти модели можно математизировать, а их свойства описать численно, то мы получим эм-

Таблица 1.1

Междисциплинарные приложения теории нелинейных сложных систем

Дисциплина	Система	Элементы	Динамика	Параметр порядка
Космология	Вселенная	Материя	Космическая динамика	Образование космической структуры (например, образование галактик)
Квантовая физика	Квантовые системы (например, лазер)	Атомы, фотоны	Квантовая динамика	Образование квантовой структуры (например, оптические волны)
Гидродинамика	Жидкости	Молекулы	Динамика жидкости	Структуры (вихри и др.) в жидкостях
Метеорология	Погода, климат	Молекулы	Динамика в метеорологии	Образование структуры (например, облака, ураганы)
Геология	Лава	Молекулы	Геологическая динамика	Образование структуры (например, сегментация)
Химия	Молекулярные системы	Молекулы	Химическая реакция, химическая динамика	Образование химической структуры (например, диссипативные структуры)
Материаловедение	Умные материалы, наносистемы	Макромолекулы	Динамика макромолекул	Образование макромолекулярной структуры (например, наноформы)
Биология	Генетические системы	Биомолекулы	Генетическая реакция	Образование генетической структуры
	Организмы	Клетки	Органический рост	Образование органической структуры
	Популяции	Особи	Эволюционная динамика	Образование видов
Экономика	Экономические системы	Экономические агенты (например, потребитель и производитель)	Экономические взаимодействия (например, механизмы рынка)	Образование экономической структуры (например, спрос и предложение)
Социология	Общества	Отдельные лица, организации	Социальное взаимодействие, динамика истории	Образование социальной структуры

Окончание таблицы 1.1

Дисциплина	Система	Элементы	Динамика	Параметр порядка
Неврология, психология	Мозг	Нейроны	Законы нейронауки, обучающие алгоритмы, информационная динамика	Образование нейронной структуры. Распознавание образов
Вычислительная техника	Клеточные автоматы, нейронные сети, глобальные сети (например, Интернет, повсеместная компьютеризация)	Клеточные процессоры	Вычислительные правила, алгоритмы эволюции, обучающие алгоритмы, информационная динамика	Образование структуры вычислительных сетей

пирические модели, которые могут как согласовываться, так и расходиться с данными. Еще одним преимуществом является *принцип подчинения*. Он уменьшает число степеней свободы в изучаемой сложной системе, поэтому синергетика становится не только эвристичной, математической, эмпирической и проверяемой, но и экономичной. Иначе говоря, она удовлетворяет известному принципу бритвы Оккама, призывающему отбрасывать лишние сущности. Кроме того, нелинейные модели можно реализовать в крохотных нелинейных компьютерных чипах с большим быстродействием. Мы можем также исследовать основные *принципы вычислительной динамики*. Однако, из-за хаоса и случайности, понимание вычислительной динамики не означает возможности детального предсказания и определения будущего. Анализ вычислительных систем позволяет приобретать опыт в нелинейной динамике, а также глубже понимать и лучше чувствовать, что происходит в реальном мире. Однако жизнь сложна и случайна, и для того чтобы понять ее, мы должны ее прожить.

В этом смысле наш подход утверждает, что физические, социальные и ментальные реальности нелинейны, сложны и невычислимы. Этот важный результат новой эпистемологии влечет за собой жесткие последствия для нашего поведения. Как мы подчеркивали, линейное мышление в нелинейной сложной действительности может быть опасным. Напомним лишь один пример: требование хорошего равновесия в сложной системе экологии и экономики.

Наши врачи и психиатры должны научиться рассматривать людей как сложные нелинейные единства разума и тела. Линейное мышление может препятствовать постановке правильного диагноза. Локальные, изолированные и «линейные» методы лечения могут привести к отрицательным синергетическим явлениям. В политике и истории следует помнить, что монопричинность может привести к догматизму, нетерпимости и фанатизму.

Так как экологические, экономические и политические проблемы человечества становятся глобальными, сложными, нелинейными и случайными, то становится спорным традиционное понятие индивидуальной ответственности. Нам нужны новые модели коллективного поведения, зависящего от разных степеней наших индивидуальных возможностей и интуиции. Короче говоря, основанный на теории сложных систем подход приводит к новым следствиям в *эпистемологии* и *этике*. Наконец, этот подход дает шанс научиться управлять хаосом и случайностью в сложном нелинейном мире и использовать созидательные возможности синергетических эффектов.

Глава 2

Сложность и эволюция материи

Каким образом из сложных, нерегулярных и хаотичных состояний материи возникает порядок? Античные философы пытались свести сложность природных явлений к первым принципам. Астрономы разрабатывали математические модели для того, чтобы свести наблюдавшиеся на небе нерегулярные и сложные орбиты планет к регулярным и простым движениям сфер. Вплоть до Коперника, простота понималась как свойство истины (разд. 2.1). Ньютон и Лейбниц внесли нечто принципиально новое в теорию моделей движения. Дифференциальное исчисление позволяет вычислить мгновенную скорость тела и представить ее как касательный вектор к траектории тела. Векторное поле скоростей стало одним из основных понятий теории динамических систем. Космологические теории Ньютона и Эйнштейна описывались полностью детерминированными динамическими моделями (разд. 2.2).

Однако Пуанкаре обнаружил, что эти модели могут оказаться невычислимыми на больших временах счета (проблема многих тел). Было показано, что даже в полностью детерминированном мире предположение о лапласовском демоне, способном рассчитать Вселенную на долгое время вперед, является иллюзорной фантазией. Хаос может возникать не только на небесах, но и в квантовом мире (как квантовый хаос) (разд. 2.3). С методологической точки зрения нелинейность является необходимым, но недостаточным условием хаоса. Она допускает и возникновение порядка. В рамках современной физики возникновение структурного разнообразия Вселенной, от элементарных частиц до звезд и живых организмов, моделируется фазовыми переходами и нарушением симметрии равновесных состояний (разд. 2.4). При современном состоянии теорий суперструн и других фундаментальных концепций в нашем распоряжении нет полной теории, объясняющей эволюцию материи с учетом ее возрастающей сложности. Удивление досократиков тому, что «есть нечто, а не ничто», не развеялось. Но теория сложных систем открывает новые пути образования структур в наномире с приложениями к самоконструированию материалов в материаловедении (разд. 2.5). С методологической точки зрения, возникает вопрос, каким образом можно выявить аттракторы образования структур в необъятном множестве измеренных данных? Сбор сложных данных и анализ временны́х рядов — это вызовы современной теории сложных систем. Глава завершается обзором характеристик сложности для разных аттракторов в нелинейной динамике (разд. 2.6).

2.1. Космос Аристотеля и Логос Гераклита

Со времен досократиков фундаментальной проблемой философии природы было установление того, каким образом из сложных, нерегулярных и хаотичных состояний материи возникает порядок [2.1]. Философы-досократики рассматривали сложность непосредственно наблюдаемых природных явлений как данное и старались свести ее к «первоосновам» (αρχη), «принципам» или определенному порядку. Приведем несколько примеров. Фалес из Милета (625–545 гг. до н. э.), про которого говорят, что он доказал первые геометрические теоремы, был также первым натурофилософом, считавшим, что исходными причинами всех вещей могут быть только материальные первопричины. В качестве начала всего Фалес положил воду или влагу. Его аргументы основаны на наблюдении, что пища и семя всех существ влажные, а естественной средой влажных вещей является вода.

Анаксимандр (610–545 гг. до н. э.), который считается учеником и последователем Фалеса, расширил его философию природы. Почему именно вода должна быть первопричиной всего сущего? Она есть лишь одна из многих форм материи, которые существуют в непрерывных взаимных напряжениях и борьбе противоположностей: теплота против огня, влага против сухости... Поэтому Анаксимандр предполагает, что «начало и первопричина всех существующих вещей» — это «безграничная неопределимая» первичная материя апейрон (απειρον), из которой возникли противоположные формы материи. Соответственно мы должны представлять себе «безгранично неопределимое» как первичное состояние, в котором материя была безгранична, не имела противоположностей и поэтому везде была однотипной. Следовательно, это было начальное состояние, обладающее однородностью и совершенной симметрией. Затем происходит нарушение симметрии, благодаря чему возникает мир со всеми наблюдаемыми противоположностями и напряжениями:

> ...При зарождении этого мира из вечного выделилось животворное начало теплого и холодного, и некая сфера из этого пламени облекла окружающий землю воздух, как кора — дерево. А когда она разорвалась и замкнулась в кольца, возникли солнце, луна и звезды [2.2][1)].

Поэтому последующие состояния материи, которые описывает Анаксимандр в своей космогонии, совершенно не были хаотическими, напротив, они определялись новыми видами упорядоченности. Восхищение Анаксимандром возрастает еще больше, когда мы знакомимся с его ранними идеями о биологической эволюции. Он предполагает, что первые человеческие существа были рождены морскими животными, молодь которых быстро приспособилась поддерживать друг друга, как это он наблюдал у определенного вида акул. Всего столетием спустя уже проводились поиски останков морских животных как свидетельства того, что люди возникли из моря.

Третьим знаменитым милетским философом природы был Анаксимен (около 525 г. до н. э.), который считается последователем Анаксимандра. Анаксимен рассматривает изменение как явление, обусловленное внешними силами сгущения и разрежения.

[1)] Все цитаты из сочинений древних философов даются по изданию: Антология мировой философии. Т. 1. М.: Мысль, 1969. — *Прим. пер.*

По его мнению, каждая форма материи может считаться основной. Сам он выбирает за основу воздух (αερα):

> ...При разрежении рождается огонь, а при сгущении — ветер, затем туман, вода, земля, камень. А из этого возникает все прочее. Движение же Анаксимен считает вечным. Благодаря ему все вещи превращаются друг в друга. Он говорит, что холод сжимает и сгущает вещи; напротив, теплота расширяет и разжижает их [2.3].

Таким образом, Анаксимен предполагает, что существуют внешние силы, создающие из единой первичной материи различные преобразующиеся друг в друга состояния.

Взгляды Гераклита из Эфеса (около 500 г. до н. э.), которого часто называли «темным», имеют очень большое значение для нашей темы. Конечно, язык Гераклита загадочен, он больше пророческий, чем рассудочно научный, и полон проницательных метафор. Он взял от Анаксимандра учение о борьбе и столкновении противоположностей в природе. Первичная материя — источник всего — сама есть изменение, и поэтому отождествляется с огнем:

> ...Всем управляет молния. Этот космос, тот же самый для всех, не создал никто ни из богов, ни из людей, но он всегда был, есть и будет вечно живым огнем, мерами разгорающимся и мерами погасающим [2.4].

Далее Гераклит разрабатывает учение о том, каким образом все состояния материи можно рассматривать как различные формы первичной материи — огня. В наши дни физик Вернер Гейзенберг утверждал:

> ...Здесь можно заметить, что в определенном смысле современная физика чрезвычайно сильно сближается с учением Гераклита. Если заменить слово «огонь», то можно увидеть, что утверждения Гераклита почти слово в слово совпадают с современными представлениями. Энергия действительно является тем материалом, из которого сделаны все элементарные частицы, все атомы и поэтому вообще все вещи, и в то же время энергия — это то, что движется... Энергия может превращаться в движение, теплоту, свет и давление. Энергию можно рассматривать как причину всех изменений, происходящих в мире [2.5].

Мы видим, что в материальном мире властвуют противоположные условия и тенденции, которые, тем не менее, объединены скрытой гармонией: «Противоречивость сближает, разнообразие порождает прекраснейшую гармонию (αρμονια), и все через распрю создается» [2.6]. Таким образом, скрытая гармония противоположностей есть космический закон Гераклита, который был им назван «логосом» (λογος).

Что происходит, когда борьба противоположностей заканчивается? Согласно Гераклиту, тогда мир приходит к конечному состоянию абсолютного равновесия. Парменид Элейский (около 500 г. до н. э.) описал состояние материи, в котором не происходит никаких изменений и движений в (пустом) пространстве. В этом случае материя распределена везде равномерно (однородно) и так, что отсутствует выделенное направление возможного движения (изотропно). Примечательно, что бесконечность рассматривается как недостаток, поэтому предполагается, что распределение материи конечно. Рассуждая подобным образом, Парменид приходит к образу мира, представляющему собой твердый, конечный, однородный материальный шар вне времени,

без движения и изменения. Элеатская философия неизменного бытия была на самом деле направлена против гераклитовской философии непрерывного изменения, которая отвергалась как всего лишь иллюзия чувств. Позднейшее историческое влияние элеатской философии на философию Платона ощущается в его критике вводящих в заблуждение изменений, связанных с чувственным восприятием, в противоположность истинному миру неизменного существования идей. Однако, с точки зрения философии природы, мир, описанный Парменидом, не обязательно противоречит учению Гераклита; в его космогонии мир Парменида можно вполне понимать как сингулярное конечное состояние с наивысшей симметрией.

После того как вода, воздух и огонь были признаны первичными элементами, было легко представить себе эти элементы как сырье для построения мира. Этот шаг сделал Эмпедокл (492–430 гг. до н. э.), добавив к огню, воде и воздуху четвертый элемент, землю. Эти элементы могут свободно перемешиваться и соединяться в любых пропорциях, а также могут растворяться и разделяться. Каковы же, согласно Эмпедоклу, те неизменные принципы, которые лежат в основе постоянных изменений и движений в природе? Во-первых, это четыре элемента, которые, как полагал философ, возникают из природы и случая (τυχε), а не в результате сознательного намерения. Изменения вызваны обратным влиянием этих элементов друг на друга, т. е. их смешиванием и разделением:

> Хочу сказать вам еще одно. Элементы эти всегда пребывают, они не рождаются и не завершают свой путь разрушительной смертью. Есть только одно: смешивание и обмен тем, что смешалось [2.7].

За эти взаимно обратные явления ответственны две основные энергии. Эмпедокл назвал их «любовью» (φιλια) для притяжения и «враждой» (νειχος) для отталкивания. Здесь видна аналогия с дуализмом инь — ян в китайской философии. Эмпедокл говорил о постоянном процессе изменений, т. е. о соединении и разделении элементов, при которых сами элементы сохраняются. Он считал, что все процессы изменений являются не механическими (как позднее полагали атомисты), а, скорее, физиологическими, тем самым перенося процессы метаболизма в организмах на неживую материю.

В медицине, по Эмпедоклу, равновесие понимается как особенно гармоничная связь. Таким образом, здоровье означает индивидуальный баланс противоположных компонентов, а болезнь возникает тогда, когда один из компонентов берет верх. Если вспомнить современную бактериологию с ее знанием о существовании антител в человеческом организме, то этот взгляд Эмпедокла покажется удивительно современным.

Анаксагор (499–426 гг. до н. э.) развивал взгляды, во многом представлявшие усовершенствование учений его предшественников. Вслед за Эмпедоклом он разрабатывал теорию смешивания материи. Но Анаксагор заменил четыре элемента Эмпедокла неограниченным числом субстанций, состоящих из семян (σπερματα) или частиц одинаковых размеров (σμοιομερη (σωματα)). Число этих частиц и степень их малости ничем не ограничены, т. е. предполагается, что материя бесконечно делима. На ум неизбежно приходит идея зернистого континуума. Анаксагор пытался таким об-

разом объяснить и смешивание цветов, говоря, что снег в определенной степени черный, хотя белизна в нем доминирует. Во всем заключается часть всего, и существуют лишь различия в пропорциях смешивания.

Анаксагор попытался в своей философии природы дать более отчетливые, чем ряд его предшественников, физические объяснения небесным явлениям и движениям, которые в математической астрономии греков описывались лишь кинематически. Так, в своей космологии он исходил из сингулярного начального состояния, представляющего однородную смесь материи. Нематериальное первоначало, названное Анаксагором «умом» «нус» (νους), приводит эту смесь в круговое движение, которое производит отделение различных вещей, в зависимости от скорости каждой из них. Земля держится в середине вихря, а более тяжелые куски камней выбрасываются наружу и образуют звезды. Их свет объясняется свечением их масс, обусловленным большой скоростью вращения. Теория вихрей Анаксагора вновь возникла в наше время у Декарта и в более усовершенствованной форме в теории механического происхождения планетных систем Канта—Лапласа.

В современном естествознании атомизм оказался чрезвычайно успешной исследовательской программой. В истории философии атомную теорию Демокрита часто излагают как следствие философии изменчивости Гераклита и принципа неизменного бытия Парменида. Демокритовское различие между «полным» и «пустым», мельчайшими неделимыми атомами (ατομος) и пустым пространством, соответствует различию между «бытием» и «небытием» у Парменида. Сложность и изменчивость у Гераклита вытекала из различных перераспределений атомов. Пустое пространство считалось однородным и изотропным.

Атомы отличаются по форме (μορφη), положению (θεσις) и различным конфигурациям (ταξις) в материальных комбинациях. Для сравнения комбинации атомов сопоставляется последовательность букв в словах, и это привело к гипотезе, что атомистические идеи развивались только в цивилизациях с фонетическим алфавитом. Действительно, в Китае, где фонетического алфавита нет и его заменяют иероглифические знаки, идея частиц была неизвестна, а преобладала полевая и волновая концепции процессов в природе. Атомы Демокрита двигались по необходимости (ανανχη) в постоянном круговороте (δινος или δινη). Здесь, в противоположность позднейшим представлениям Аристотеля, движение означает только изменение положения в пустом пространстве. Все явления, все рождающееся и погибающее, возникают из слияния (συγχρισις) и разделения (διαχρισις). Агрегатные состояния материи — газообразное, жидкое и твердое — объясняются разными плотностями атомов и их потенциальными возможностями к движению. С точки зрения современной кристаллографии, заслуживает внимания идея Демокрита о том, что даже атомы в твердых телах совершают колебания в пространстве.

Платон в диалоге «Тимей» предложил первую математическую модель атомизма. Изменения, смешивания и разделения элементов, о которых говорили досократики, были сведены к неизменным математическим закономерностям. В случае четырех элементов Эмпедокла, а именно огня, воздуха, воды и земли, классификация была под руками и непосредственно доступна восприятию. Еще Теэтет полностью описал все правильные

многогранники, возможные в трехмерном (евклидовом) пространстве: тетраэдр, октаэдр, икосаэдр, куб и додекаэдр. Поэтому то, что предложил Платон, заключалось в сопоставлении четырех элементов Эмпедокла этим геометрическим строительным блокам.

Платон сознательно избегал использования для своих элементов демокритовского названия «атом», так как они могут быть разложены на отдельные плоские фигуры. Так, грани тетраэдров, октаэдров и икосаэдров представляют собой равносторонние треугольники, и если эти грани рассечь пополам, то получаются прямоугольные треугольники с длинами сторон 1, 2 и $\sqrt{3}$, в то время как квадратные грани кубов при рассечении пополам по диагонали образуют прямоугольные треугольники с длинами сторон 1, 1 и $\sqrt{2}$. Как следствие, «жидкости» типа воды, воздуха и огня могут объединяться друг с другом, в то время как твердое тело, составленное из элементов земли, из-за разницы в треугольниках может превращаться только в другое твердое тело.

Затем Платон развивает нечто вроде физики элементарных частиц, в рамках которой отдельные элементы преобразуются друг в друга, а между «элементарными частицами» (т. е. соответствующими базовыми треугольниками) могут иметь место «обратимые явления» в соответствии с геометрическими законами. Например, преобразования элементов происходят в результате разрезания тел вдоль ребер. По Платону, такая возможность зависит от остроты углов в вершинах многогранников. С помощью более острых плоских углов при вершинах можно построить все правильные многогранники. Так, по порядку, каждый тетраэдр, куб, октаэдр и икосаэдр может в каждом случае создать не предыдущий в этом ряду или тот же самый, а только последующий многогранник. Вывод, следующий из этих рассуждений для философии природы, заключается в том, что огонь может разделить или растворить все элементы, земля — только воздух и воду, а воздух — только воду.

Платон решительно настаивал на том, что не все элементы имеют одинаковый размер. Например, чтобы объяснить, почему огонь может перевести воду из твердой формы в жидкую, он полагал, что в жидком состоянии элементы меньше и более подвижны, а в твердом состоянии они больше.

Избавление от огня называется охлаждением, а состояние после искоренения огня — отвердеванием. Огонь и воздух могут беспрепятственно проникать сквозь щели в строительных блоках из земли (кубах), не растворяя элементы земли. Сжатый воздух не может раствориться без разрушения элемента. Так, сжатие воздуха означает накопление октаэдров в самой идеальной из всех возможных конфигурации. Даже огонь не может, не разрушив октаэдров, проникнуть сквозь обязательно оставшиеся щели, плоские углы которых меньше, чем у всех элементов. В случае воды только огонь способен разрушить сильнейшую конденсацию. Щели между соседними икосаэдрами образуют плоские углы, которые не позволяют проникнуть туда ни земле, ни воздуху. Только огонь (тетраэдр) может проникнуть и растворить эту комбинацию.

На самом деле Платон развил внутренне согласованную математическую модель, позволявшую объяснить существование различных агрегатных состояний веществ и обратимых про-

цессов, если только для интерпретации элементов принять его более или менее произвольные начальные условия. Естественно, что ряд следствий такой схемы для философии природы кажутся странными и забавными. Однако здесь мы имеем первую в истории науки попытку объяснить материю и ее состояния с помощью простых геометрических законов. Высшей точкой развития этих идей до сегодняшнего дня является современная теория элементарных частиц. Гейзенберг по этому поводу сказал:

> ...Элементарные частицы имеют ту форму, которую им приписал Платон, так как это математически самая красивая и простая форма. Следовательно, корни всех явлений не в материи, а в математическом законе, симметрии, математической форме [2.8].

В Античности и Средних веках математический атомизм Платона находил мало поддержки. Для его последователей была очевидна основная проблема такой геометрической теории материи, ясно высказанная еще в диалоге «Тимей». Как можно объяснить функционирование живых организмов? Гипотеза о том, что определенные телесные формы имеют такой вид для того, чтобы исполнять определенные физиологические функции (так, глотка в форме воронки нужна для поглощения пищи), не может в общем случае быть выведена из теории правильных многогранников. Кроме того, сама идея объяснения изменяющихся и пульсирующих жизненных процессов с помощью «жестких» и «мертвых» геометрических фигур должна была казаться современникам Платона глубоко неестественной, спекулятивной и надуманной. Наши современники до сих пор затрудняются понять те окольные пути, которые выбирают научные объяснения, используя сложные и абстрактные математические теории. Именно здесь начинается философия природы Аристотеля.

Аристотель сформулировал свою концепцию баланса или «равновесия» в природе главным образом на основе того, как функционируют живые организмы — растения и животные. Течение жизненных процессов известно нам из повседневного опыта. Что может быть очевиднее, чем попытка сравнить и объяснить устройство остального, неизвестного и странного, мира через знакомые явления? Согласно Аристотелю, задача науки — объяснить принципы и назначение сложности и изменчивости в природе. Здесь Аристотель критиковал тех философов природы, которые отождествляли свои принципы с индивидуальными субстанциями. Отдельное растение или отдельное животное не являются простой суммой своих материальных строительных блоков. Аристотель называл то общее, которое придает отдельному сущему то, чем оно является, формой (ειδος). То, что принимает форму, называется материей (υλη). Но форма и материя не существуют сами по себе, а представляют принципы природы, выводимые из абстракций. Поэтому материя характеризуется также как потенция (δυναμις) к обретению формы. Реальность (ενεργεια) наступает только после того, как материя обретает форму.

Наблюдаемые нами реальные живые существа подвергаются постоянным изменениям. В этом вопросе был прав Гераклит, а Парменид, для которого изменения были иллюзорны, ошибался. Изменения реальны. Но, согласно Аристотелю, Гераклит ошибался при сопоставлении изменений конкретной субстанции (огню). Аристотель объяснял такие изменения с

помощью третьего, кроме материи и формы, принципа, а именно, недостатка формы (στερνσις), который восполнялся соответствующим изменением. Молодые растение или ребенок малы, слабы и недоразвиты. Они растут потому, что в соответствии с их естественными тенденциями (формой) подразумевается, что они станут большими, сильными и зрелыми. Отсюда делался вывод, что движение (χινεσις) в общем случае является изменением, переходом от возможности к реальности, «актуализацией потенции» (как сказали бы ученые Средних веков).

Задача физики — исследовать движение в природе в указанном всеобъемлющем смысле. Природа (φυσις), в противоположность создаваемому человеком произведению искусства или техническому инструменту, понималась как все, что несет в себе самом принцип движения. Если аристотелевские понятия заставят нас, прежде всего, задуматься о тех жизненных процессах у растений, животных и людей, которые знакомы нам из повседневного жизненного опыта, то эти понятия покажутся нам весьма правдоподобными и удачными. Природа — это не каменоломня, из которой каждый может по своему желанию забирать отдельные куски. Сама природа представляется рациональным организмом, движения которого одновременно необходимы и целенаправленны. Аристотель различал несколько типов движения, а именно, количественное изменение за счет увеличения или уменьшения по величине, качественное изменение за счет изменения характеристик, и пространственное изменение за счет изменения местоположения. Аристотель выделял четыре проявления причинности, приводящей к изменениям. Почему растет растение? Оно растет, так как: 1) его материальные компоненты делают рост возможным (*causa materialis*); 2) его физиологические функции определяют рост (*causa formalis*); 3) рост побуждается внешними обстоятельствами (питательными веществами в земле, водой, солнечным светом и пр.) (*causa efficiens*); 4) в соответствии с окончательной целью оно должно созреть и принять идеальную форму (*causa finalis*).

Затем Аристотель применил те же принципы, которые очевидным образом выводятся из рассмотрения жизненных циклов растений, животных и людей, к объяснению материи в более узком смысле, т. е. объяснению того, что позднее получило название неживой природы. Здесь Аристотель также исходил из непосредственного опыта. То, что мы наблюдаем, это не какое-то большое количество элементов, выступающих в качестве изолированных строительных блоков природы. На самом деле мы наблюдаем такие характеристики, как теплота и холод, влажность и сухость. Комбинации этих свойств приводят к следующим парам характеристик, определяющим элементы: теплый — сухой (огонь), теплый — влажный (воздух), холодный — влажный (вода), холодный — сухой (земля). Пары теплый — холодный и влажный — сухой как одновременные условия исключаются. Поэтому существуют только четыре элемента. Подобный вывод позднее критиковали как произвольный, но он демонстрирует метод Аристотеля, заключающийся в том, чтобы исходить не из абстрактных математических моделей, а непосредственно из чувственного опыта. Огонь, воздух, вода и земля в той или иной степени, с большей или меньшей интенсивностью, содержатся в реальных телах, которые вовлечены в постоянный круго-

ворот превращений. Согласно Аристотелю, устранение холодности воды путем нагревания приводит к воздуху, а устранение влажности воздуха приводит к огню. Изменения в природе интерпретируются как процессы созревания и преобразования.

Каким образом такая, по преимуществу органическая, философия природы приводила к физическим объяснениям математической естественной науки, какой бы она ни была в то время? Были известны только два элементарных пространственных движения — по прямой линии и по окружности. Поэтому должны были существовать определенные элементы, для которых такие элементарные движения были естественными. Движения других тел определялись этими элементами и их естественными движениями и зависели от того, какое из этих движений преобладает в движении тела. Самым идеальным считалось движение по окружности. Только оно могло происходить бесконечно долго, поэтому такое движение было приписано неуничтожимому элементу. Это был пятый элемент (квинтэссенция), из которого были образованы неизменные небесные сферы и звезды. Непрерывные изменения в земном (подлунном) мире должны были противопоставляться неизменной регулярности, царящей в звездном (надлунном) мире. Процессы преобразований связывались с четырьмя элементами, для которых характерно прямолинейное движение, в частности, прямолинейное движение, направленное к центру мира, куда тяжелые элементы вода и земля стремятся, как к своему естественному местопребыванию, и прямолинейное движение к периферии лунной сферы, куда легкие элементы воздух и огонь устремляются, как к своему естественному местопребыванию.

К числу естественных движений относилось и свободное падение. Однако Аристотель не поступил, как Галилей, и не начал с изучения изолированных движений в идеализированных экспериментальных ситуациях. Падающее тело наблюдалось в сложной окружающей среде без выделения сил трения («диссипативных» сил). В процессе свободного падения тело погружается в воздушной среде, как камень в воде. Таким образом, Аристотель представлял себе свободное падение как гидродинамический процесс, а не как ускорение тела в пустоте. Он предполагал постоянную скорость падения v, прямо пропорциональную весу тела p и обратно пропорциональную плотности среды d (например, воздуха). В современных обозначениях $v \sim p/d$. Это соотношение в то же время дало Аристотелю аргумент против пустоты атомистов. В вакууме с плотностью $d = 0$ все тела падали бы бесконечно быстро, чего, очевидно, не происходит.

Типичный пример вынужденного (вызванного человеком) движения — бросание тела, которое опять рассматривается в сложном окружении «диссипативных» сил. Согласно Аристотелю, неживое тело может двигаться только при наличии постоянной внешней причины движения. Представьте себе телегу на каменистой дороге в Древней Греции, которая немедленно останавливается, если осел (или раб) прекращают ее тянуть или толкать. Но почему брошенный камень продолжает двигаться после того, как рука отпускает его? Согласно Аристотелю, не может быть действия на расстоянии в пустом пространстве (дальнодействия). Поэтому, говорит Аристотель, метатель не-

редает движение непрерывной среде, окружающей камень, и эта среда проталкивает камень дальше. Аристотель полагает, что скорость v бросательного или толкательного движения пропорциональна приложенной силе K, т. е. $v \sim K/p$. Конечно, это не математические уравнения, связывающие измеримые величины, а всего лишь отношения пропорциональности качественных определяющих факторов, которые впервые возникли в такой алгебраической записи у средневековых физиков — последователей школы перипатетиков. Таким образом, в аристотелевской динамике, в отличие от динамики Галилея—Ньютона, каждое изменение положения (по прямой линии) требует причины движения (силы). Средневековая теория импетуса изменила динамику Аристотеля, приписав причину движения «импетусу» внутри брошенного тела, а не передаче движения со стороны внешней среды.

Каким образом динамика перипатетиков объясняет космические законы, управляющие небесами? Центральная симметрия космологической модели была основана на (не вызванном силами) круговом движении сфер, которое считалось естественным для «небесного» элемента, и на теории естественного местоположения (локуса) в центральной точке космоса. Однако Птолемей вычислил положение Земли на основе изотропии модели и используя силлогизм достаточного основания. Если дана полная эквивалентность всех направлений, то нет причины, по которой Земля должна двигаться в том или другом направлении.

Учитель Аристотеля — Платон — сформулировал центрально-симметричную модель движения небесных тел с Землей в центре. Вокруг нее все небо поворачивается по часовой стрелке вокруг небесной оси, проходящей через Землю. Солнце, Луна и планеты вращаются против часовой стрелки, находясь на поверхностях сфер с разным расстоянием до Земли, расположенных в последовательности: Луна, Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер и Сатурн. Самая внешняя оболочка содержит сферу неподвижных звезд. Согласно представлениям Платона и Пифагора, периоды обращения связаны друг с другом целыми числами. У всех времен обращения существует общий множитель, так что по прошествии соответствующего времени все планеты вновь оказываются точно в том же месте. Движение каждой планеты порождает звук, так что все тоны движения сфер совместно образуют гармонию сфер в смысле упорядоченной музыкальной шкалы. Геометрические, арифметические и эстетические симметрии космоса звучат во Вселенной, как гармоничная музыка сфер. Вскоре в результате прямых наблюдений такая подчеркнуто симметричная модель космоса была поставлена под сомнение. Сложной проблемой стала нерегулярность орбит планет, особенно их попятные движения. Нерегулярности, наблюдающиеся на небе, вызывали беспокойство, особенно у философов пифагорейской школы, которые привыкли рассматривать небеса, в противоположность Земле, как царство вечной симметрии и гармонии.

С целью уменьшить сложность движений на небесах, Платон поставил знаменитый вопрос: с помощью каких регулярных, упорядоченных движений по окружности можно «спасти», т. е. кинематически объяснить планетные движения? Точная модель наблюдаемых орбит была получена

после того, как Аполлоний из Пергама (~ 210 г. до н. э.) порекомендовал отказаться от общего центра всех сфер. Но при этом сохранялись круговая форма планетных движений и одинаковая скорость сфер. Согласно этому предложению, планеты равномерно вращаются по сферам (эпициклам), воображаемые центры которых равномерно движутся по большим окружностям (деферентам) вокруг центральной точки (Земли). Должным образом подбирая отношение скорости и диаметра двух круговых движений и варьируя их направление, можно было построить неожиданные формы орбит, которые нашли частичное применение в астрономии от Птолемея до Кеплера. При этом сохранялась сферическая симметрия отдельных моделей, даже если у них отсутствовал общий центр, а было много разных центров.

Следующие примеры применения техники эпициклов-деферентов показывают, какое множество кажущихся форм движения можно получить, подбирая соответствующим образом равномерные движения по окружности [2.9]. Таким образом, более понятными становятся взгляды платоновской философии о том, что за изменениями в явлениях стоят вечные и неизменные формы. На рис. 2.1 путем комбинации движений по деференту и эпициклу воспроизведена эллиптическая орбита. На рис. 2.2 показана замкнутая циклоида. Таким образом можно также представить меняющиеся расстояния между планетами и Землей. В принципе, можно воспроизвести даже угловые фигуры. Когда диаметр эпицикла достигает диаметра деферента, возникает строго прямая линия. С помощью подходящих комбинаций движения по эпициклам и деферентам можно получить даже

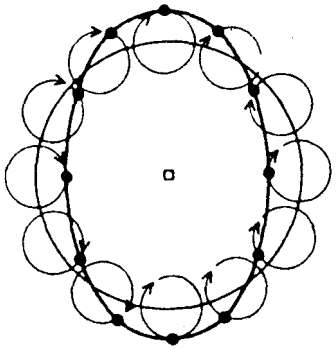


Рис. 2.1. Модель для эллипса на основе эпициклов-дифферентов

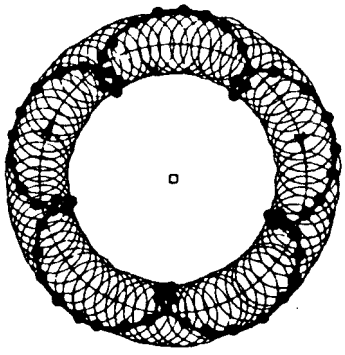


Рис. 2.2. Модель циклоиды на основе эпициклов-дифферентов

правильные треугольники и прямоугольники, если изменить скорость движущейся с востока на запад планеты, которая сама движется по эпициклу, вращающемуся с запада на восток.

Если позволить небесному телу двигаться по второму эпициклу, центр которого движется по первому эпициклу, то можно получить множество эллиптических орбит, кривых, обладающих симметрией относительно отражений, а также непериодических и асимметричных кривых. С чисто математической и кинематической точек зрения задача Платона по «спасению явления» полностью решена. Поэтому, в принципе, платоновская редукция сложности в духе сведения

к равномерному движению по окружности (модифицированная Аполлонием и Птолемеем) может до сих пор оказывать влияние на науку. В любом случае ее нельзя опровергнуть путем феноменологического описания кривых траекторий. В частности, с этой точки зрения, не только изменение ролей Земли и Солнца на противоположные в так называемой революции Коперника, но и переход Кеплера от круговых к эллиптическим орбитам представляются вторичными, так как обе инициативы можно свести к комбинации движений по окружности в согласии с техникой эпициклов-деферентов. Это ставит два вопроса:

1) Как можно математически обосновать это утверждение?
2) Если оно обосновано, то почему оно не играет роли в современных научных приложениях теории кривых?

Чтобы ответить на первый вопрос, следует обратиться к современной структуре аналитической геометрии. Но исторически Коперник и Кеплер тоже знали, каким образом используемые ими кривые (например, эллипсы) могут быть реконструированы с помощью техники эпициклов-деферентов.

Прежде всего, следует вспомнить, что точки на плоскости могут быть представлены комплексными числами $z = x + iy = re^{i\theta}$ с соответствующими декартовыми координатами (x, y) или полярными координатами (r, θ). Сложение комплексных чисел соответствует тогда сложению векторов [2.10]. Равномерное движение точки по окружности с центром c, радиусом ρ и периодом T можно представить в виде

$$z = c + x\rho e^{i((2\pi t/T)+\alpha)} = \\ = c + \rho e^{(2\pi it/T)+i\alpha}, \qquad (1)$$

где переменная t соответствует времени, а параметр α – начальной фазе. Рассмотрим точку A, движущуюся согласно уравнению $z = f(t)$. Пусть точка B движется относительно A по окружности радиусом ρ, периодом T и начальной фазой α. Тогда движение точки B описывается уравнением

$$z = f(t) + \rho e^{(2\pi it/T)+i\alpha}. \qquad (2)$$

Таким образом можно описать движение точки B по эпициклу, центр которого движется вокруг точки A. Добавление нового эпицикла математически описывается добавлением нового слагаемого $\rho e^{(2\pi it/T)+i\alpha}$ в выражение для z. Ясно, что

$$\rho e^{(2\pi t/T)+i\alpha} = \rho e^{i\alpha} e^{(2\pi it/T)} = ae^{ikt},$$

где $a \neq 0$ – комплексное число, а k – действительное число. В случае обратного движения T или k, соответственно, берутся отрицательными. Движение, возникающее в результате наложения n эпициклов, выражается уравнением

$$z = a_1 e^{ik_1 t} + a_2 e^{ik_2 t} + \ldots + a_n e^{ik_n t}. \qquad (3)$$

Рассмотрим сначала периодическое движение на плоскости $z = f(t)$ (например, с периодом 2π). Математически мы предполагаем, что f непрерывна и ограничена. Тогда функцию f можно представить в виде разложения в равномерно сходящийся ряд:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{int}. \qquad (4)$$

Отсюда можно строго математически доказать, что $f(t)$ можно приблизить (аппроксимировать) суммами

$$S_N(t) = \sum_{n=-N}^{N} c_n e^{int} \qquad (5)$$

с любой желаемой степенью точности, растущей с ростом N.

Функция f равномерно сходится. Поэтому для произвольно малого $\varepsilon > 0$ можно найти такой индекс N_0,

что для всех $N \geqslant N_0$ и всех t выполняется неравенство

$$\left|f(t) - S_N(t)\right| < \varepsilon. \qquad (6)$$

С астрономической точки зрения, этот результат означает, что траектория периодического движения (с ограниченной вариацией) может быть аппроксимирована с любой степенью точности с помощью конечной суперпозиции движений по эпициклам.

Ясно, что до сих пор мы использовали только слагаемые с периодами эпициклов $+2\pi$, $\pm\pi$, $\pm\frac{2}{3}\pi$, $\pm\frac{1}{2}\pi$, $\pm\frac{2}{5}\pi$, ... Поэтому, в частности, *использовались только соизмеримые* периоды, которые можно, в духе пифагорейской традиции, выразить с помощью отношений целых чисел. Но на самом деле непериодические кривые также можно аппроксимировать суперпозицией эпициклов, если допустить несоизмеримые периоды. Этот результат находит математическое обоснование в теореме Гаральда Бора о почти периодических функциях (1932) [2.11].

На второй вопрос, вопрос о том, почему для объяснения траекторий движения отвергнута техника эпициклов-деферентов, нельзя ответить, указав на наблюдение пропущенных в рамках *этого подхода* кривых. Математически наблюдаемые кривые, *сколь бы экзотичными* они ни были, могут быть в принципе объяснены (в рамках указанных выше очень широких математических *ограничений*) с помощью использования в духе Платона и Аполлония древней стратегии сведения сложных движений к простым.

Однако в этом случае решающим вопросом является то, какие же движения совершают планеты «на самом деле», являются ли эти движения сложной комбинацией равномерных и ничем не вынуждаемых движений по окружности, которые с Земли кажутся эллиптическими траекториями, или определенные силы на самом деле вынуждают планеты следовать по эллиптическим траекториям. Решение вопроса может быть найдено не геометрически или кинематически, а только динамически, т. е. с помощью соответствующей теории сил, следовательно, с помощью физики.

Помимо техники эпициклов-деферентов Птолемей использовал мнимые точки равновесия, относительно которых предполагалось, что планеты совершают равномерные движения по окружностям, кажущиеся неравномерными относительно Земли как центра. Эта техника оказалась полезной при вычислениях, но она утверждала нарушение центральной симметрии и поэтому сводилась к сделанному *ad hoc* предположению, мало приемлемому с точки зрения философии природы, как это специально отметил Коперник. Причины того, что Коперник поменял местами Землю и Солнце, были в основном кинематические. Действительно, на этом пути, обладающем большей симметрией, можно было достичь определенных кинематических упрощений. Так, в гелиоцентрической модели можно было интерпретировать кажущиеся обратные движения планет на небосводе как эффекты, *обусловленные* годовым движением Земли, которая, *согласно* Копернику, двигалась медленнее, чем внешние планеты — Марс, Юпитер и Сатурн, но быстрее, чем внутренние планеты — Венера и Меркурий. Но Коперник оставался глубоко консервативным философом, так как он рассматривал бóльшую простоту в смысле «естественного» кругового движения как знак приближения к реальности.

При Иоганне Кеплере, первом *великом* математике современной астрономии, вера в простоту оставалась

неизменной. В мемуаре «*Mysterium cosmographicum*» (1596) Кеплер вновь пытается обосновать расстояния в планетной системе с помощью правильных многогранников, попеременно вписанных в сферы и описанных вокруг них. Планеты Сатурн, Юпитер, Марс, Земля, Венера и Меркурий соответствуют шести сферам, вписанным одна в другую и разделенным в указанной последовательности кубом, тетраэдром, додекаэдром, икосаэдром и октаэдром. Конечно, умозрительные построения Кеплера нельзя было расширить так, чтобы учесть последующие открытия Урана, Нептуна и Плутона.

Однако Кеплер был уже в достаточной степени естествоиспытателем, чтобы не позволить себе надолго затеряться в платоновских догадках. Книга Кеплера «*Astronomia nova*» (1609) является уникальным документом, позволяющим шаг за шагом проследить постепенное исчезновение старой платоновской концепции простоты под постоянным давлением результатов точных измерений. В противоположность Копернику, Кеплер дополняет свои кинематические исследования оригинальными динамическими аргументами. Солнце уже не рассматривается по Кеплеру как лишенное физических функций тело в кинематически центральной точке, а считается динамической причиной движения планет. Таким образом, возникла новая задача математического определения этих сил. Кеплеровская динамическая интерпретация с помощью магнитных полей была лишь первой (ошибочной) попыткой. Успех пришел позже в теории тяготения Ньютона.

Простота звездного («надлунного») мира и сложность земного («подлунного») мира были часто встречающимися темами рассуждений в других культурах. Посмотрим на философию природы даосизма в древнем Китае. Откровенно говоря, эта философия окружена мифами и менее логично обоснована, чем греческая философия природы, а также требует больше интуиции и сопереживания. Тем не менее между двумя философиями существуют параллели. Даосизм описывает природу как большой организм, управляемый циклическими движениями и ритмами, такими как жизненные циклы поколений, династий и отдельных людей от рождения до смерти, пищевые цепочки, состоящие из растения, животного и человека, смена времен года, день и ночь, восход и заход звезд и т. п. Все связано со всем. За каждым следуют ритмы, как волны на воде. Какие же силы являются первопричиной такой картины природы? Как и в учении Эмпедокла, в даосизме различаются две противоположные силы, называемые инь и ян, ритмическое увеличение и уменьшение которых управляет миром. В книге «Кей Ку Дзу» (IV в. до н. э.) говорится: «Ян периодически возвращается к первоначалу. Инь достигает максимума и прокладывает путь для ян» [2.12]. В то время как, согласно Аристотелю, все индивидуумы несут в себе свои естественные цели и движения, инь и ян в даосизме определяют внутренние ритмы отдельных личностей, энергия которых всегда возвращается к своим первоисточникам. Модель кругового вращения в даосизме позволяет объяснить создание календарей в астрономии, круговорот воды в метеорологии, пищевые цепочки и систему кровообращения в физиологии. Она черпает большую убедительность в жизненных ритмах природы, которые люди каждодневно ощущают и могут ис-

пользовать для своего приспособления к жизни. Природа представляется целенаправленным организмом.

Примечательно, что в китайской философии природы отсутствуют понятия атомных частиц, и поэтому в ней не получила развития математическая механика в духе западного Возрождения. Вместо этого центральным пунктом является гармоничная модель природы с ритмичными волнами и полями, которые связуют все со всем. В рамках такой философии природы становятся понятными предпочтения, отдаваемые вопросам акустики, и ранние предрассудки, касающиеся явлений магнетизма и электростатики. Взгляды даосистов больше напоминают не взгляды Аристотеля, а философию природы стоиков. Все рассуждения стоиков сосредоточены на явлениях, развертывающихся в большом континууме и напоминающих волны на воде. Этот континуум у стоиков называется пневмой. Ее напряжения и колебания определяют различные состояния природы. Разнообразные формы природы являются всего лишь мимолетными картинами, возникающими за счет меняющихся натяжений пневмы. Конечно, современные рассуждения связывают это с картинами стоячих волн на воде, звуковыми волнами или картинами силовых линий магнитного поля. Тем не менее ни стоические, ни даосистские эвристические предпосылки не привели к созданию физической теории акустических явлений или магнитных полей, сравнимой с галилеевской механикой, основанной на атомистической философии природы. Возникновение порядка из сложных, нерегулярных и хаотичных состояний материи получило только качественное описание с помощью разных моделей Земли и неба.

2.2. Вселенная Ньютона и Эйнштейна и демон Лапласа

С античных времен астрономы и философы были убеждены, что небесные движения управляются простыми геометрическими законами. Простота понималась не только как требование эффективности методологии, но уже для Коперника она являлась свойством истины. Так, астрономическая доктрина от Платона до Коперника призывала: сведите кажущуюся сложность небесной системы к простой схеме истинных движений! Простые строительные блоки определялись основными понятиями евклидовой геометрии: окружность (циркуль) и прямая линия (линейка). В противоположность простоте надлунного мира, подлунный земной мир казался действительно сложным. Соответственно его динамика не могла быть математизирована, по крайней мере, в рамках евклидовой геометрии. Это и стало причиной того, что платоновский математический атомизм был забыт, и все научные исследования вплоть до Возрождения были омрачены верой Аристотеля в сложную качественную динамику природы, которую в принципе нельзя математизировать.

Первые физики, подобные Галилею, преодолели границу между надлунным («простым») и подлунным («сложным») мирами. Они были убеждены, что динамика природы на Земле и на небе управляется одними и теми же простыми математическими законами. Формально Галилей упростил динамику, например, свободного падения, отобрав несколько наблюдаемых и измеримых величин и отбросив другие ограничения. По существу, он построил упрощенную математи-

ческую модель идеализированной экспериментальной ситуации. Конечно, даже астрономические модели античности рассматривали лишь несколько параметров, вроде угловой скорости и положения планет, и пренебрегали сложным многообразием других ограничений (например, плотностью, массой, трением небесных сфер). С современной точки зрения даже философы-досократики рассматривали качественные «модели» сложной динамики в природе, отобрав ряд основных «параметров» (например, воду, огонь, воздух и землю).

В общем случае система, будь то физическая, биологическая или социальная, наблюдается в различных состояниях. Возможно, что стратегии построения моделей наблюдаемых явлений изменились со времен античности, но цель такого моделирования, по существу, осталась прежней: объяснение и предсказание динамики меняющихся состояний в наблюдаемых системах. Очевидно, что с помощью только нескольких наблюдаемых параметров нельзя описать реальные состояния, однако предполагается, что в принципе, в отдельных случаях такое возможно. На ранних этапах развития астрономии и механики это было первым шагом в математической идеализации и приводило к геометрической модели множества идеализированных состояний, которое в наши дни называют пространством состояний модели. Досократовские «модели» природы отличаются от современных моделей не только из-за математизированности и измеримости последних, но также и потому, что в древности считалось онтологически необходимым наличие непосредственной связи между действительными состояниями реальной системы и точками геометрической модели, в то время как в современных системах это опосредованная связь, поддерживающая теорию, предсказание и т. п.

Простейшей схемой описания является однопараметрическая модель. Давний опыт работы врачей с млекопитающими показывает, что состояние здоровья или болезни можно сопоставить с температурой их тела. Наблюдаемое поведение многих животных коррелирует с их эмоциональным состоянием. Так, положение ушей собаки соответствует степени ее испуга, а обнаженные клыки представляют «качественный» параметр степени ее озлобленности. Комбинация обеих факторов является более адекватной характеристикой эмоционального состояния собаки. Состояние планеты в средневековой космологии можно было определить по ее угловой скорости и местоположению. Состояния других систем могут требовать для своего описания более двух переменных (например, температуры, кровяного давления и частоты пульса для характеристики состояния здоровья млекопитающего).

В любом случае, если эти параметры заданы численно, то соответствующие пространства состояний можно представить как геометрические пространства. Так, значения двух числовых параметров можно представить одной точкой в двумерном пространстве состояний, которое соответствует плоскости в евклидовой геометрии. Наблюдаемые изменения в реальном состоянии системы можно представить как кривую линию в пространстве состояний. Если каждой точке этой кривой присвоена метка, указывающая время наблюдения, то мы получаем траекторию для модели. Иногда полезно вводить временну́ю координату и представлять меняющиеся параметры состояний системы как временной ряд. Такой способ пред-

ставления данных называется построением графика траектории.

Средневековые динамические концепции включали описания обоих типов. В 1350-е гг. парижский схоласт Николь Орезм ввел понятие графических представлений или геометрических конфигураций интенсивностей качеств. Орезм главным образом обсуждал случай линейного качества, протяженность которого измеряется интервалом или отрезком линии в пространстве или во времени («долгота качества»). Он предложил измерять интенсивность качества в каждой точке интервала перпендикулярной к отрезку ординатой в этой точке («широта качества»). Количество линейного качества наглядно изображается комбинацией обеих параметров. В случае равноускоренного движения интервалу времени соответствует долгота AB на рис. 2.3, широта в каждой точке P отрезка AB равна ординате PQ, длина которой равна скорости в соответствующий момент времени [2.13]. Прямая DC конфигурации есть график траектории, представляющий состояние скорости. С помощью геометрической проверки на рис. 2.3 немедленно выводится так называемое правило Мертона, т. е. из формулы для площади трапеции на рис. 2.3 следует, что полное пройденное расстояние равно

$$s = \frac{1}{2}(v_0 + v_f)t.$$

Возможно, что такая интерпретация была найдена на основании рассмотрения площади трапеции как составленной из очень большого числа вертикальных сегментов («неделимых»), каждый из которых представляет скорость, изменяющуюся за очень короткий («инфинитезимальный») промежуток времени. Правило Мертона показывает, что даже на

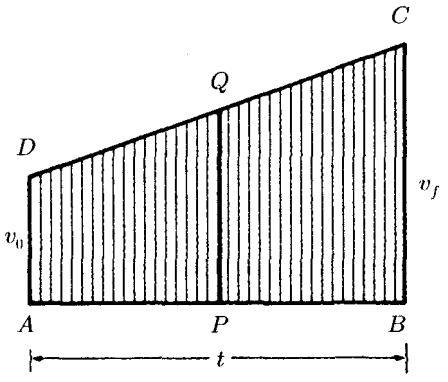


Рис. 2.3. Координаты Орезма для линейного качества

заре использования подхода, основанного на пространстве состояний, геометрическая интерпретация являлась не просто полезным наглядным способом изображения, но и позволяла глубже проникнуть в суть понятий динамики. Конечно, Орезм и ученики Мертоновского колледжа хотели сначала всего лишь математизировать физику качеств, которая напоминала аристотелевскую физику. Но их работа широко распространилась по Европе и повлияла на работу Галилея. В своих знаменитых «Беседах» (1638) Галилей ввел основные понятия современной механики и получил хорошо известную формулу для расстояния $s = \frac{1}{2}at^2$ при равноускоренном движении из состояния покоя (свободное падение), причем доказательство и сопутствующие геометрические чертежи напоминали идеи Орезма.

С появлением Ньютона и Лейбница в теорию динамических систем добавилось много нового. Дифференциальное исчисление позволяет вычислить мгновенную скорость $\vec{v}(t)$ как производную от функции координаты $\vec{x}(t)$ и изобразить ее в виде касательного вектора к соответствующей кривой (рис. 2.4 *а*). Векторное

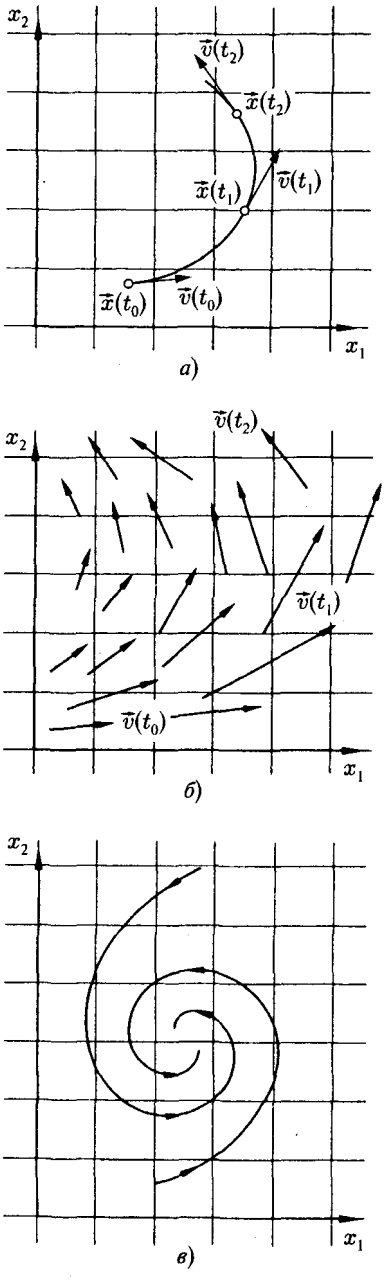


Рис. 2.4. Геометрическое представление динамической системы в случае, когда пространство состояний (фазовое пространство) двумерно, $\vec{x} \equiv (x_1, x_2)$: *а* — мгновенная скорость как касательный вектор; *б* — векторное поле скоростей; *в* — фазовый портрет

поле скоростей стало одним из основных понятий теории динамических систем (рис. 2.4 *б*). В дифференциальном исчислении была решена задача нахождения вектора скорости $\vec{v}(t)$ по известной траектории $\vec{x}(t)$ (операция дифференцирования) и задача нахождения траектории по заданному вектору мгновенной скорости (операция интегрирования).

Моделирование динамических систем начинается с выбора пространства состояний, в котором наблюдения могут быть представлены набором точек. Продолжительные наблюдения приводят к многим траекториям в пространстве состояний. В духе дифференциального исчисления Ньютона—Лейбница в каждой точке этих кривых можно определить вектор скорости, чтобы описать присущую каждой точке динамику изменения. Векторное поле скоростей определяется путем приписывания каждой точке пространства состояний определенного вектора скорости. Пространство состояний (фазовое пространство), заполненное траекториями, называется «фазовым портретом» динамической системы (рис. 2.4 *в*). Это основное понятие теории динамических систем было впервые введено Анри Пуанкаре. Векторное поле скоростей получается из фазового портрета с помощью дифференцирования.

Конечно, векторное поле скоростей наглядно изображает динамику конкретной моделируемой системы. На самом деле для того чтобы установить динамику системы, представленной соответствующим векторным полем скоростей, нужны многочисленные наблюдения в течение долгого времени. Процедура моделирования может считаться адекватной лишь тогда, когда мы предположим, что:

а) вектор скорости для наблюдаемой траектории в каждой точке в точности тот же, что и вектор, задаваемый динамической системой;

б) векторное поле модели гладкое.

Слово «гладкое» интуитивно означает, что в поле нет скачков или острых углов. В случае одномерного пространства состояний векторное поле задается графиком на плоскости. Следовательно, график гладкий, если он и его производная непрерывны. Исторически условие *б*) соответствует знаменитому принципу непрерывности Лейбница, который играет важнейшую роль в классической физике.

В целом можно следующим образом суммировать процесс моделирования. Динамическая модель строится для определенной экспериментальной ситуации. Можно вообразить для наглядности лабораторные установки физиков вроде Галилея или Ньютона, или биологов, наблюдающих какие-то организмы, или даже социологов, анализирующих определенные социальные группы. Динамическая модель состоит из пространства состояний и векторного поля. Пространство состояний является геометрическим пространством (например, евклидовой плоскостью или, в общем случае, топологическим многообразием), соответствующим экспериментальной ситуации. Векторное поле определяет тенденции изменяющихся состояний и называется динамикой системы. Как нам найти траектории, иначе говоря, поведение системы? Формально эта проблема решается путем построения фазового портрета системы. Это означает, что мы должны построить траектории динамической системы. Если задано пространство состояний и («гладкое») векторное поле, то кривая в пространстве состояний является траекторией динамической системы, если ее вектор скорости согласуется с векторным полем, построенным с помощью касательных векторов (рис. 2.5). Точка, соответствующая нулевому моменту времени, называется начальным состоянием траектории. Предполагается, что все траектории описывают по-

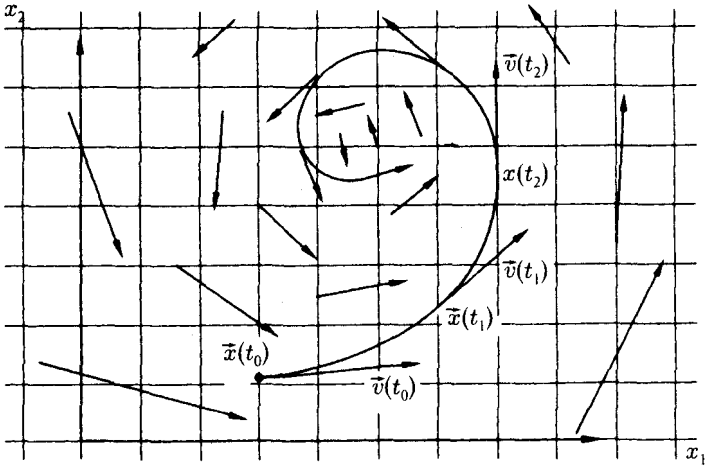


Рис. 2.5. Траектория динамической системы и векторное поле в пространстве состояний (фазовом пространстве)

ведение систем, наблюдаемых в течение некоторого интервала времени. Более того, физики достаточно амбициозны и стремятся делать предсказания, уходящие бесконечно далеко в будущее, и вычислять течение событий в природе так, как будто она является громадными часами.

Окинем взглядом космос Ньютона, оказавшийся успешным применением теории динамических систем, получившей развитие с помощью разработанных Ньютоном, Лейбницем, Эйлером и другими исследователями математических средств. Ньютон сформулировал три закона, определяющие поведение материальных тел. Первый закон («закон инерции») утверждает, что если на тело не действует никакая сила, то оно продолжает двигаться равномерно по прямой. Если на тело действует сила, то она равна произведению массы тела на его ускорение (второй закон). Основная структура завершается третьим законом: каждому действию всегда соответствует равное по величине и противоположное по направлению противодействие. Ньютоновский космос состоит из частиц, движущихся всюду в пространстве, подчиняющемся законам евклидовой геометрии. Ускорения этих частиц определяются действующими на них силами. Сила, действующая на каждую частицу, получается путем сложения всех сил со стороны остальных частиц по правилам векторного сложения. Если сила гравитационная, то она действует как сила притяжения между двумя телами, причем величина этой силы пропорциональна произведению масс двух тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Но, конечно, могут существовать и другие типы сил.

На самом деле второй закон Ньютона всегда понимался как универсальный закон для всех сил природы как в макро-, так и в микромире. При заданном конкретном законе силы ньютоновская схема превращается в точную систему динамических уравнений. Если в какой-то момент времени заданы положения, скорости и массы различных частиц, то их положения и скорости для всех последующих моментов времени определяются строго математически. Другими словами, состояние тела в ньютоновском космосе задается двумя параметрами — положением и скоростью. Ньютоновские траектории определяются динамическими уравнениями движения. Если известны начальные состояния, то поведение ньютоновского космоса представляется полностью *детерминированным* (в котором будущее однозначно определяется настоящим). Такая форма детерминизма оказала огромное влияние на философию XVIII и XIX вв. Ньютоновская динамика считалась основной наукой для построения моделей природы. Однако, конечно, механистические модели справедливы только в ограниченном случае исчезающе малого трения и никогда полностью не подтверждались экспериментально[2)]. Природа столь сложна, что физики предпочитали наблюдать неестественные («искусственные») предельные случаи. Ниже мы увидим, что, благодаря вере в простые законы, физики полностью пренебрегали сложностью начальных условий и ограничений и тем самым создавали иллюзорную модель детерминированной и к тому же вычислимой природы.

[2)] Речь идет о моделях так называемых гамильтоновых систем, в которых не рассматриваются диссипативные процессы (в частности трение). — *Прим. ред.*

Согласно Ньютону, существует только один реальный мир материи в рамках единственного абсолютного пространства-времени, в котором мы можем выбирать относительные системы отсчета. Это означает, что для любых двух событий считается объективно разрешимым вопрос о том, являются ли эти события одновременными и происходят ли они в одном и том же месте. Математически ньютоновское абсолютное пространство представляется трехмерным евклидовым пространством, метрика которого измерима с помощью линеек, а время считается одномерным евклидовым пространством с координатой t, измеряемой стандартными часами.

В силу абсолютности одновременности ньютоновское четырехмерное пространство-время расслаивается на максимальные подпространства одновременных событий. Каждый слой представляет возможную трехмерную гиперплоскость $t = t(e)$ события e, которая отделяет его причинное будущее со слоями $t > t(e)$ от причинного прошлого со слоями $t < t(e)$. На рис. 2.6 *а* отброшена третья пространственная координата, с тем чтобы изобразить каждый слой как двумерную плоскость. Такая причинная структура включает гипотезу Ньютона о том, что существуют бесконечно быстрые сигналы, обусловленные мгновенным действием на расстоянии [2.15].

М. Ланге[3)] дал точное определение ньютоновским относительным пространствам как *инерциальным системам*, обозначающим системы отсчета для свободного тела, движущегося с постоянной скоростью по прямой. Не оговаривается, какие из многих возможных инерциальных систем используются. Конкретные преобразования (преобразования Галилея) от одной инерциальной системы к другой дают соответствующие координаты в новой системе. Механические законы сохраняют свой вид (являются инвариантными) относительно этих преобразований. Поскольку каждое галилеевское преобразование описывается десятью непрерывными параметрами (один параметр для времени и трижды три параметра для вращения, постоянной скорости и переноса), можно вывести десять законов сохранения. Так, например, галилеевское преобразование временно́й координаты влечет за собой закон сохранения энергии. В тех системах отсчета, которые не являются инерциальными, возникают типичные эффекты. Так, вращающийся, по отношению к неподвижным звездам, диск испытывает действие радиальных сил, которые не могут быть устранены галилеевскими преобразованиями. Коротко, в ньютоновском пространстве-времени равномерные движения рассматриваются как абсолютно выделенные по сравнению с ускоренными. Структура этих движений определяется группой галилеевских преобразований.

В начале XX в. Эйнштейн доказал, что ньютоновская модель пространства-времени ограничена механическими движениями со скоростью, малой по сравнению со скоростью света c. Постоянство c, независимо от выбора любой равномерно движущейся системы отсчета, вытекает из электродинамики Максвелла. Отсюда следует, что в электродинамике не могут выполняться ньютоновский закон сложения скоростей и галилеевская инвариантность. В специальной теории относительности (1905) Эйнштейн предположил постоянство

[3)] М. Ланге (M. Lange) – современный философ науки. – *Прим. пер.*

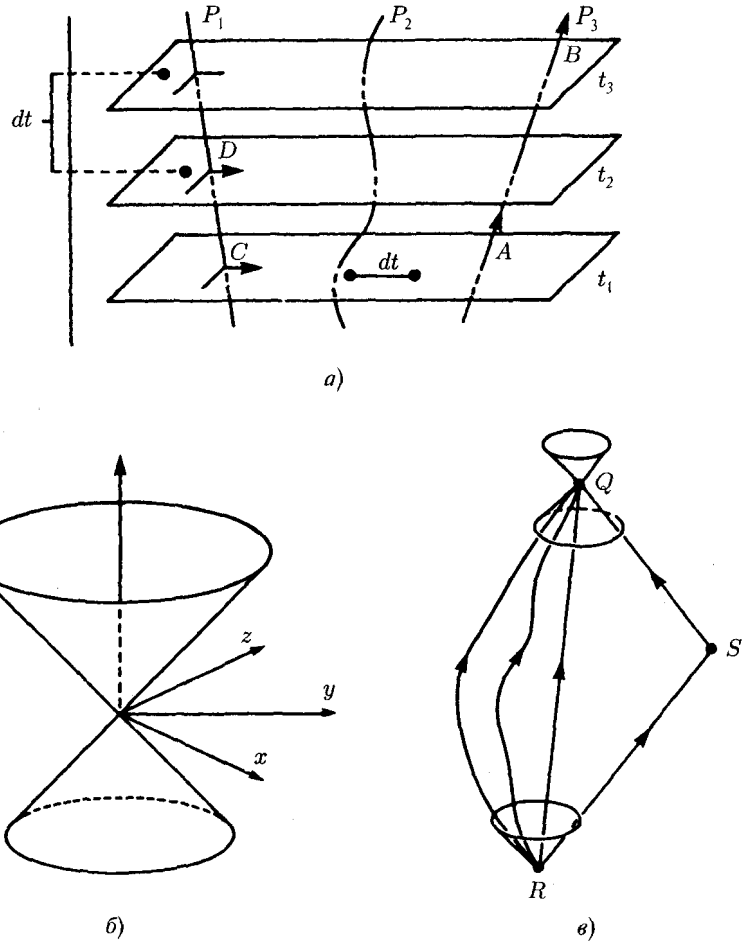


Рис. 2.6. Модель ньютоновского пространства-времени с пространственными слоями одновременных событий и траекторий (*а*); пространственно-временной конус Минковского в специальной теории относительности (*б*); парадокс близнецов специальной теории относительности — расстояние RQ в пространстве Минковского больше, чем сумма расстояний RS и SQ (*в*)

скорости света и инвариантность физических законов относительно всех инерциальных систем отсчета («специальный принцип относительности») и установил единую структуру пространства-времени для электродинамики и механики. Моделью пространства-времени специальной теории относительности Эйнштейна стала четырехмерная геометрия Минковского. Нас не должна удивлять четырехмерность, так как в ньютоновском пространстве-времени тоже имеются три (декартовы) пространственных координаты и одна временна́я.

Для простоты единицы выбраны так, что скорость света равна единице, и поэтому единицы длины и времени могут взаимно меняться. Каждая точка в таком пространстве-времени представляет событие, т. е. некоторую точку в пространстве в опре-

деленный момент времени. Частица, продолжающая существовать во времени, представляется не точкой, а линией, которая называется *мировой линией* частицы. Чтобы наглядно представить модель Минковского, изобразим пространственно-временную систему со стандартной временной координатой, измеряемой в вертикальном направлении, и двумя пространственными координатами, измеряемыми в горизонтальном направлении (рис. 2.6 *б*) [2.16].

Равномерно движущиеся частицы представляются прямыми линиями, ускоренные частицы — кривыми. Так как частицы света (фотоны) движутся с постоянной скоростью c, их мировые линии представляют прямые, наклоненные под углом 45° к вертикали. Эти прямые образуют световой конус с началом в общем начале координат 0. Система световых конусов во всех пространственно-временных точках рассматривается как модель релятивистского пространства-времени Минковского.

В то время как мировая линия фотона всегда находится в каждой точке на световом конусе, мировая линия любой ускоренно или равномерно движущейся со скоростью, меньшей c, материальной частицы должна находиться внутри конуса. Так как материальные частицы или фотоны не могут двигаться быстрее света, физически определены только мировые линии на поверхности или внутри светового конуса. Событие называется произошедшим позднее события 0, если оно находится в конусе будущего над 0; событие называется произошедшим ранее события 0, если оно находится в конусе прошлого под 0. Таким образом, световые конусы определяют причинную структуру релятивистского пространства-времени.

Существенным отличием модели Минковского от обычных представлений евклидовой геометрии является тот факт, что длина мировых линий интерпретируется как время, измеренное физическими часами. Следовательно, в противоположность ньютоновской гипотезе об абсолютном времени, измерение времени становится зависящим от траектории. Это явление ярко проявляется в так называемом «парадоксе близнецов». На рис. 2.6 *в* один близнец остается на Земле R, движущейся с постоянной очень малой скоростью, в то время как другой близнец совершает путешествие к ближайшей звезде S с большой скоростью, близкой к скорости света. Геометрия Минковского приводит к предсказанию, что путешествующий близнец останется молодым после возвращения в Q, в то время как оставшийся на Земле близнец сильно постареет. Конечно, это не научная фантастика, а следствия измеряемых временем длин мировых линий в пространстве Минковского: в противоположность обычной евклидовой интерпретации, расстояние RQ в таком пространстве больше, чем сумма расстояний RS и SQ. В наши дни эти эффекты хорошо подтверждены экспериментально в опытах с элементарными частицами, движущимися со скоростями, близкими к c.

В рамках пространства-времени Минковского инвариантность физических законов относительно конкретных инерциальных систем реализуется преобразованиями Лоренца. Ньютоновское пространство-время и галилеевская инвариантность сохраняются как предельный случай для систем отсчета типа движения планет на небе или бильярдных шаров на Земле, движущихся со скоростями, много меньшими скорости света c. В этом

смысле, по сравнению с революционным прорывом Ньютона, эйнштейновское пространство-время является кульминацией классической физики.

Важным понятием, впервые введенным в классическую физику Лейбницем, является энергия, складывающаяся из кинетической энергии T и потенциальной энергии U системы. Механическая работа, совершаемая над точечной массой, которая смещается из положения 1 в положение 2, соответствует разности кинетических энергий в положениях 1 и 2. Если механическая работа не зависит от траектории между точками 1 и 2, то соответствующее силовое поле называется *потенциальным (консервативным)*. Силы трения неконсервативны. Если пренебречь трением, то в одномерном случае все силы должны быть консервативными, так как существует единственная траектория от одной точки к другой по прямой линии. В поле консервативных сил полная энергия $T + U$ постоянна.

Важным приложением ньютоновской механики является гармонический осциллятор, например маятник, раскачивающийся с малой амплитудой, или груз, колеблющийся на пружине. Гармонический осциллятор может служить моделью явлений во всех разделах физики и даже в химии и биологии. Например, вспомним электромагнитные волны, в которых колеблются энергии электрического и магнитного полей. Гармонические колебания хорошо известны также в технике, например колебания электрического тока в цепи, состоящей из катушки и конденсатора, роль трения в цепях играет электрическое сопротивление. В философии XVIII и XIX вв. маятник был символом механистической модели Вселенной, которая считалась полностью детерминированной и вычислимой с помощью ньютоновских уравнений движения.

Таким образом, маятник можно рассматривать как классический пример процедуры динамического моделирования. Эта модель предполагает, что стержень маятника очень легкий, но жесткий. В шарнире наверху полностью отсутствует трение. Груз на нижнем конце стержня тяжелый, но очень маленький. Действующая на него сила тяжести всегда направлена вертикально вниз. На рис. 2.7 *а* представлен маятник на двумерной евклидовой плоскости, причем α — угол отклонения, F — сила тяжести, $F\cos\alpha$ — сила натяжения, направленная вдоль стержня, а сила $F\sin\alpha$ заставляет маятник качаться. Чтобы сделать наглядным динамическое поведение маятника, нужно рассмотреть динамическую модель с пространством состояний и фазовым портретом. Состояние маятника полностью определяется угловой переменной α (причем $\alpha = 0$ и $\alpha = 2\pi$ обозначают один и тот же угол) и угловой скоростью ω. Следовательно, получаем двумерное пространство состояний, которое можно изобразить как круговой цилиндр (рис. 2.7 *б*). Вертикальная окружность в центре этого цилиндра изображает состояния с нулевой угловой скоростью $\omega = 0$. Прямая линия, идущая по дну цилиндра от начала до конца, представляет ось нулевого отклонения с $\alpha = 0$, соответствующую наинизшему положению маятника. В начале координат $(\alpha, \omega) = (0, 0)$ маятник находится в состоянии покоя в наинизшем положении [2.17].

Так как трение и сопротивление воздуха отсутствуют, то небольшое смещение маятника из этого положения влево приводит к продолжающимся бесконечно долго колебаниям. Пол-

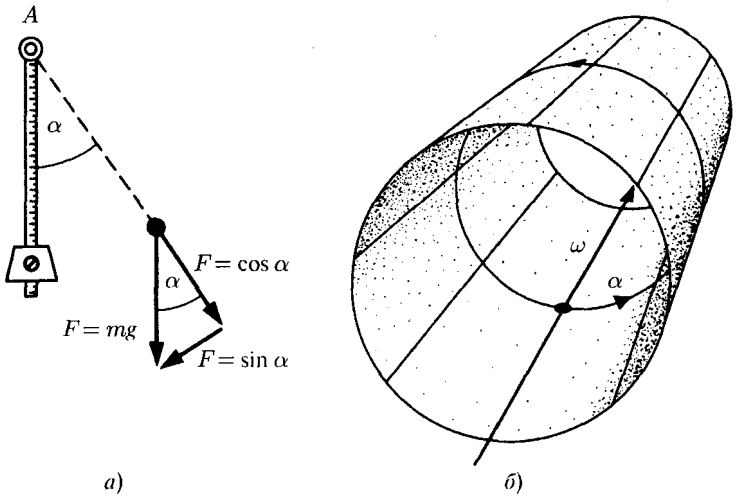


Рис. 2.7. Динамическая система (маятник) (а); двумерное пространство состояний (круговой цилиндр) (б) [2.17]

ная траектория в пространстве состояний, отвечающая такому колебательному движению, представляет собой цикл или замкнутую петлю. В другом случае маятник балансирует в верхнем положении в состоянии неустойчивого равновесия. Легкий толчок слева приводит к падению маятника вправо с набором скорости. Угловая скорость достигает максимума, когда маятник проходит нижнюю точку равновесия. На обратном пути к верхней точке маятник замедляется. Затем он снова достигает точки равновесия в верхнем положении. Однако, когда в начале вращения маятник резко толкается вправо, его угловое ускорение довольно велико. Возвращаясь назад, маятник замедляется, но недостаточно для того, чтобы остановиться на вершине. Таким образом, маятник будет бесконечно долго вращаться по часовой стрелке. Соответствующая траектория в цилиндрическом пространстве состояний есть цикл. В противоположность медленным колебаниям, быстрый цикл обвивает цилиндр. Фазовый портрет этой динамической модели подтверждает большое количество экспериментов (рис. 2.8 *а*). Имеются две точки равновесия. Наверху — седловая точка. В начале координат — точка типа центр, не являющаяся предельной точкой соседних траекторий. Фазовый портрет легче понять, если разрезать цилиндр вдоль прямой линии, проходящей от начала до конца через седловую точку на вершине (рис. 2.8 *б*).

Если система не замкнута и учитывается трение, как это и есть в физической реальности, тогда точка равновесия в начале координат уже не является особой точкой типа центр (рис. 2.8 *в*). Она превращается в особую точку динамической системы типа фокус. Поскольку из-за трения любое движение маятника переходит в состояние покоя, всякая траектория, представляющая медленное движение маятника вблизи нижнего положения, асимптотически стремится к этой предельной точке.

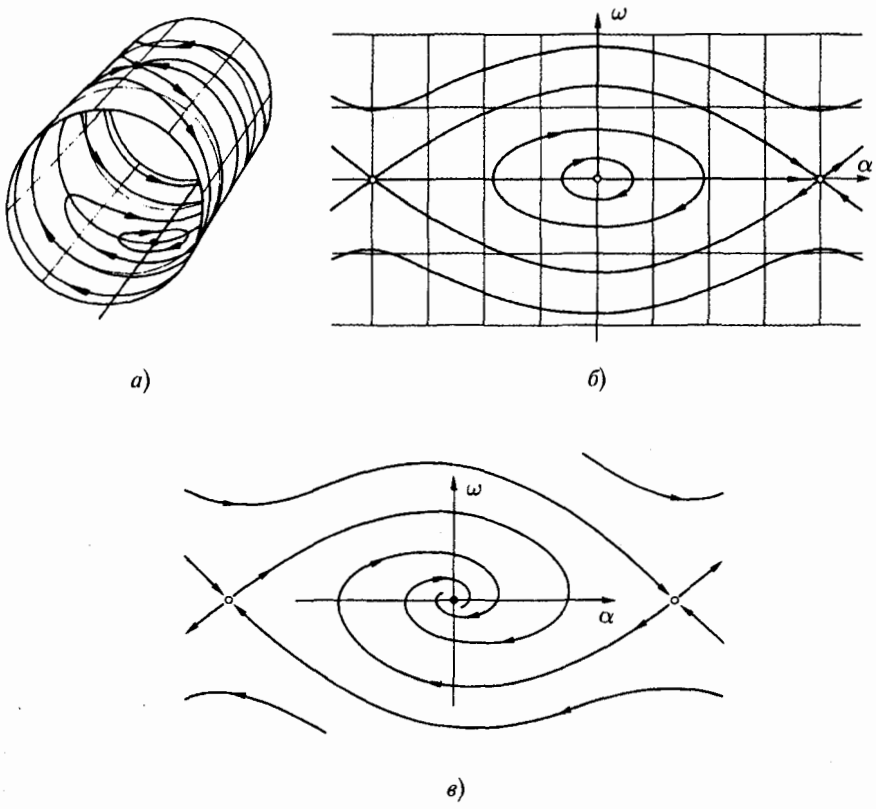


Рис. 2.8. Фазовый портрет маятника в цилиндрическом пространстве состояний (*а*); разрез и разворачивание на плоскость (*б*); фазовый портрет маятника с трением (*в*)

В двух или более измерениях могут возникать другие типы траекторий и предельных множеств. Например, для траектории рис. 2.9 асимптотическим предельным множеством может быть цикл, а в трехмерной системе в качестве предельных могут возникать тор или еще более странные множества.

Предельные множества позволяют описывать стремление системы к ее состояниям равновесия, выход на установившиеся режимы. Ключевыми понятиями здесь являются предельные множества, называемые «аттракторами» [2.18]. Математически предельное множество (особая точка, цикл, тор и т. д.) называется *аттрактором*, если множество всех траекторий, асимптотически приближающихся к этому предельному множеству, открыто. Грубо говоря, аттракторы притягивают большинство траекторий в окрестности предельного множества. Устойчивые особые точки являются самыми известными из всех предельных множеств. В случае особой точки аттрактор описывает статическое состояние равновесия, а предельный цикл описывает устойчивое колебательное движение (см. рис. 2.9). Колебания маятника, пружины, струны музыкального инструмента — всего лишь несколько меха-

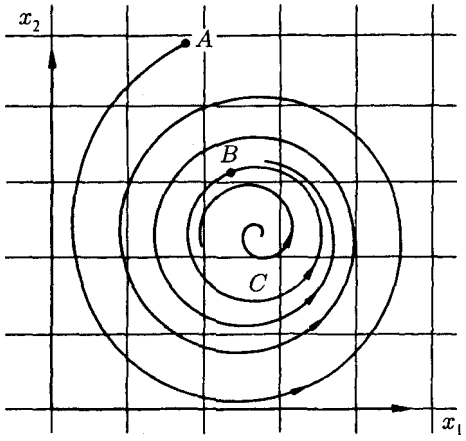


Рис. 2.9. Предельный цикл как асимптотическое предельное множество для траектории. Аттрактор в фазовом пространстве — окружность, на которой лежит точка B. Точка C — неустойчивый фокус. Точка A лежит на траектории, стремящейся к аттрактору

нических примеров колебаний. Как будет видно ниже, предельные циклы динамических систем играют важную роль в физике, химии, биологии и социальных науках.

На типичном фазовом портрете имеется более одного аттрактора. Фазовый портрет разделяется на различные области траекторий, стремящихся к разным аттракторам (области притяжения аттракторов). Границы, разделяющие эти области, называются сепаратрисами. На рис. 2.10 видны две устойчивых особых точки с их областями притяжения и разделяющая их сепаратриса.

В действительности динамическую систему нельзя рассматривать в изоляции от других динамических систем. Для того чтобы получить более адекватные модели, изучим две связанные системы. Простым примером может служить связь двух часов. Исторически именно эта конкретная система изучалась в XVII в. Христианом Гюйгенсом. Он заметил, что двое маятниковых часов, висящих на одной стене, стремятся синхронизировать свои колебания. Это явление вызвано связью, возникающей благодаря упругости стены. На самом деле любые две динамические системы могут быть объединены в одну путем построения прямого произведения двух соответствующих пространств состояний. Малое возмущение этой комбинированной системы называется свя-

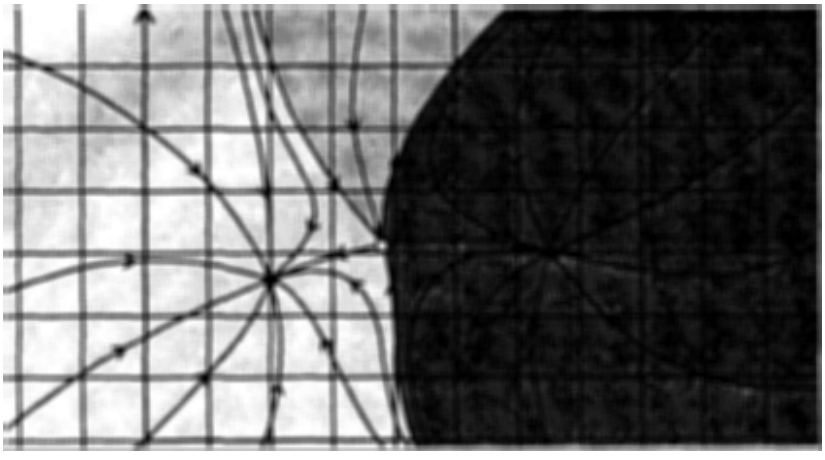


Рис. 2.10. Фазовый портрет с двумя аттракторами, представляющими устойчивые особые точки их областями притяжения и сепаратрисой

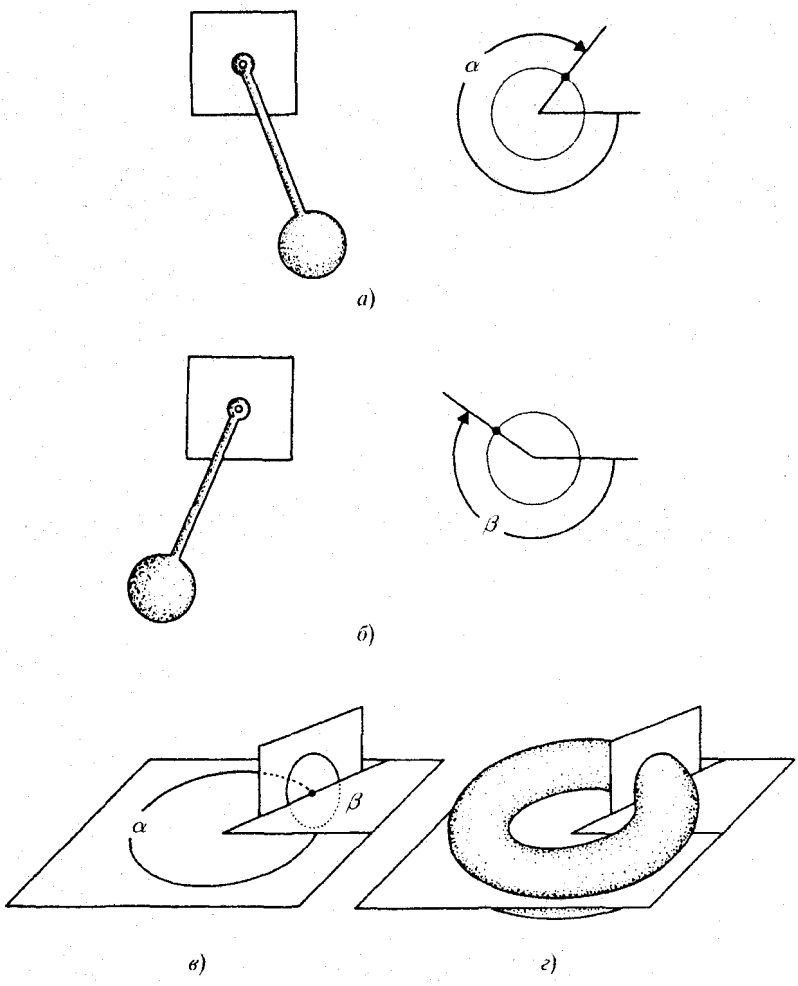


Рис. 2.11. Двое часов как осцилляторы и соответствующие два цикла как их пространства состояний (*а*, *б*). Пространство состояний комбинированной системы двух осцилляторов (тор как прямое произведение двух циклов) (*в*, *г*)

зью двух систем. Геометрическая модель состояний такой комбинированной системы строится следующим образом [2.19].

Каждые часы A и B представляют собой некоторый осциллятор. Чтобы сделать более наглядной картину асимптотического поведения обоих осцилляторов, пренебрежем переходным режимом и заменим двумерную модель состояний на евклидовой плоскости с предельным циклом вокруг начала координат для двух параметров смещения и скорости на один предельный цикл. Состояние осциллятора A задается углом α, соответствующим его фазе (рис. 2.11 *а*), а состояние осциллятора B — углом β (рис. 2.11 *б*).

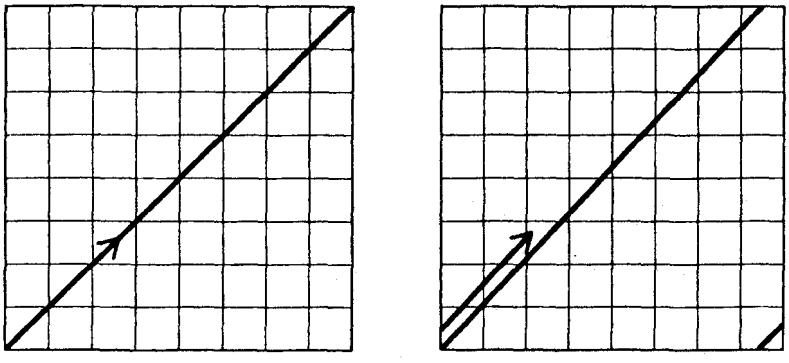
Чтобы построить пространство состояний для комбинированной системы двух осцилляторов, рассмот-

рим предельный цикл часов A в горизонтальной плоскости. Каждая точка этого горизонтального цикла представляет фазовое состояние A. Рассмотрим такую точку как центр предельного цикла часов B, построенного перпендикулярно горизонтальной плоскости для часов A (рис. 2.11 *в*). Каждая точка этого вертикального цикла представляет фазовое состояние часов B. Пара фаз (α, β) представляет состояние комбинированной системы [2.20].

Если фаза α осциллятора A фиксирована, а осциллятор B совершает полный цикл, то общая фазовая точка проходит вертикальный цикл на рис. 2.11 *в*. Если осциллятор A также движется по полному циклу, то вертикальный цикл на рис. 2.11 *в* продвигается по полному горизонтальному циклу, заметая тор на рис. 2.11 *г*. Таким образом, пространство состояний комбинированной системы двух осцилляторов — это тор, представляющий прямое произведение двух циклов. Конечно, реальная модель состояний для двух осцилляторов четырехмерна, а не двумерна, как на наших упрощенных рисунках.

Чтобы получить фазовый портрет динамического поведения комбинированной системы, нужно изучить векторное поле и траектории в пространстве состояний тора. Предположим сначала, что состояния одних часов полностью безразличны к состоянию других. В этом случае часы не связаны. Траектория точки на торе, соответствующей временно́й фазе каждых часов, закручивается вокруг тора. Если скорость хода каждых часов постоянна, тогда на плоской прямоугольной модели тора траектория представляет прямую линию (рис. 2.12). Наклон этой линии равен отношению скорости хода часов B к скорости хода часов A. Если двое часов идут с одинаковой скоростью, отношение равно единице. Это означает, что одинаковые показания часов A и B отвечают одинаковым фазам обеих часов. Тогда траектория на развернутом торе является диагональной линией на рис. 2.12 *а*.

Малое изменение в системе приводит к малому изменению отношения скоростей хода или частот осцилляторов. Тогда траектория на торе переходит от периодической к почти



а) *б)*

Рис. 2.12. Фазовые портреты комбинированной системы двух осцилляторов: *а* — с одинаковыми фазами; *б* — со слегка различающимися фазами

периодической, или к периодической траектории, совершающей вместо ровно одного много оборотов вокруг тора (рис. 2.12 *б*). Если два осциллятора связаны (например, с помощью общей стены у двух часов Гюйгенса), то к динамической модели, описывающей несвязанную систему, нужно добавить малое векторное поле. Существует примечательная теорема, говорящая о том, что пучок траекторий на торе структурно устойчив в том смысле, что малое возмущение не приводит к существенным изменениям фазового портрета. Экспериментально этот результат был подтвержден Гюйгенсом при наблюдении явления синхронизации колебаний двух часов, висящих на одной стене.

Осцилляторы — это главный динамический образ для процесса моделирования природных явлений. Они совершенно не ограничиваются механическими приложениями. В XIX в. Герман фон Гельмгольц изобрел электрический колебательный контур, а лорд Рэлей изучал колебания в связанных системах электронных ламп, использовавшихся в первых радиопередатчиках. В XX в. Ван дер Поль использовал для изучения связанных осцилляторов дальнейшие достижения радиочастотной электроники.

В ньютоновской вселенной связанные осцилляторы служат примерами задач многих тел. Что можно в общем случае сказать о механике систем точечных масс, некоторые из которых движутся, испытывая действие сил между составляющими их телами? Для систем из двух точечных масс имеются простые и точные решения. В задаче двух тел с двумя точечными массами и изотропными центральными силами двенадцать неизвестных определяются десятью законами сохранения и ньютоновскими законами движения для двух частиц. Эта задача успешно приводится к уже решенной проблеме движения одной точечной массы в поле сил, если рассмотреть закон движения Ньютона для вектора разности координат $\boldsymbol{r}$ и ввести приведенную массу $m = m_1 m_2/(m_1 + m_2)$ двух точечных масс m_1 и m_2. Исторически Галилей предполагал, что Земля движется вокруг Солнца, которое покоится. Таким образом, он свел небесные движения к простому случаю задачи двух тел. Как мы все знаем, Солнце на самом деле движется вокруг общего центра масс системы Земля–Солнце, который находится под поверхностью Солнца. Конечно, это предположение все равно неточное, так как вокруг Солнца одновременно движется много планет, и все она оказывают силовое воздействие друг на друга.

Другим примером проблемы многих тел является тройное соударение трех бильярдных шаров. Если предположить, что шары сталкиваются только парами и не существует тройных или более сложных соударений, то ситуация сводится к задаче двух тел. Результат непрерывным образом зависит от начального состояния. Достаточно малые изменения начального состояния приводят только к малым изменениям конечного состояния. Если же три шара соударяются одновременно, то результирующее поведение критически зависит от того, какие шары ударятся друг о друга первыми. Таким образом, результат разрывным образом зависит от начального состояния, что противоречит принципу непрерывности Лейбница, который он использовал в основном для критики декартовских исследований удара.

В ньютоновской вселенной проблемы многих тел в связи с бильярдными шарами и планетами можно описать детерминированными моде-

лями в том смысле, что физическое поведение математически полно определено для всех моментов времени в будущем и прошлом путем задания положений и скоростей шаров или планет. Но модели могут оказаться неустойчивыми: малые погрешности в задании начальных данных просто не позволят определить состояние системы на больших временах. В случае теории планетных движений численное моделирование на компьютерах с целью описать и спрогнозировать эволюцию Солнечной системы на времена многих миллионов лет приведет к очень большим ошибкам, поскольку начальные координаты и скорости неизвестны точно. Малейшее изменение начальных данных может быстро породить колоссальное изменение результата. Такие неустойчивости в поведении типичны для проблем многих тел. Даже в полностью детерминированном мире предположение о демоне Лапласа, который может рано или поздно рассчитать ньютоновскую вселенную, заглядывая сколь угодно далеко в будущее и прошлое, оказалось иллюзией.

2.3. Гамильтоновы системы, небесный хаос и квантовый мир

В XVIII и XIX вв. казалось, что ньютоновская механика раскрыла вечный порядок в природе. С современной точки зрения, ньютоновские системы являются лишь удобным типом динамических систем для моделирования реальности. Чтобы задать начальное состояние ньютоновской системы, необходимо знать положения и скорости всех входящих в нее частиц. В середине XIX в. математик Уильям Гамильтон предложил очень элегантный и эффективный формализм [2.21]. Его плодотворная идея заключалась в том, чтобы характеризовать консервативную систему так называемой функцией Гамильтона H, представляющей собой выражение для полной энергии системы (равной сумме кинетической и потенциальной энергий), записанной через положения и импульсы всех входящих в ее состав частиц. В то время как скорость частицы есть просто скорость изменения ее положения со временем, импульс частицы равен произведению скорости на массу. Ньютоновские системы описываются с помощью второго закона Ньютона через ускорения, представляющие собой скорость изменения скорости изменения положения. Математически это означает, что ньютоновские системы определяются уравнениями второго порядка. В гамильтоновой формулировке имеется два набора уравнений. Один набор описывает, как импульсы частиц изменяются со временем, а другой — как изменяются со временем положения частиц. Очевидно, гамильтоновы уравнения описывают скорости изменения величин (т. е. положений и импульсов). Следовательно мы сводим математическое описание к уравнениям первого порядка, которые, конечно, детерминированы. Для динамических систем, состоящих из n несвязанных частиц в пространстве с тремя независимыми направлениями, имеется $3n$ координат, описывающих положения, и $3n$ координат, описывающих импульсы.

При подходящем выборе гамильтоновой функции H, уравнения Гамильтона можно использовать для описания не только ньютоновских систем, но и любой классической динамической системы. Даже в электродинамике Максвелла гамильтоноподобные уравнения определяют скорость

изменения со временем электрических и магнитных полей через значения этих полей в любой заданный момент времени. Единственная разница заключается в том, что уравнения Максвелла являются уравнениями поля, а не уравнениями для частиц, и требуют для описания состояния системы не конечного числа параметров с тремя координатами для положения и тремя для импульса каждой частицы, а бесконечного числа параметров с векторами поля, заданными в каждой точке пространства. Гамильтоновы уравнения верны также и в специальной теории относительности и (в несколько модифицированном виде) в общей теории относительности. Даже решающий шаг при переходе от классической механики к квантовой механике был осуществлен с помощью принципа соответствия Бора в рамках гамильтонова формализма. К этим проблемам мы вернемся ниже. Пока что достаточно напомнить, что уравнения Гамильтона предоставляют универсальный формализм для моделирования динамических систем в физике.

Соответствующие пространства состояний позволяют наглядно представить эволюцию динамических систем в каждой «фазе». Поэтому они называются фазовыми пространствами. Для систем из n частиц фазовые пространства имеют $3n + 3n = 6n$ измерений. Каждая точка фазового пространства представляет все состояние, возможно, сложной системы из n частиц. Уравнения Гамильтона определяют траекторию *фазовой точки* в *фазовом пространстве*. Глобально, эти уравнения описывают скорости изменения в каждой фазовой точке, и поэтому задают векторное поле фазового пространства, определяющее всю динамику соответствующей системы.

Из практики хорошо известно, что состояния динамических моделей нельзя измерить с произвольной точностью. Измеренные значения какой-то величины могут чуть-чуть отличаться друг от друга, что вызвано измерительной аппаратурой, ограничениями, связанными с окружающей средой и т. п. Соответствующие фазовые точки концентрируются в малых областях по соседству друг с другом. Возникает ключевой вопрос: являются ли траектории, начинающиеся в соседних начальных состояниях, *локально устойчивыми в том смысле*, что конечные состояния у них оказываются так же близки, как и начальные? На рис. 2.13 *а* область фазового пространства начальных состояний R_0 в нулевой момент времени переводится динамической системой в область R_t, отвечающую последующему моменту времени t (конечно, при таком наглядном изображении фазового пространства нужно пренебречь реальным большим числом координат) [2.22].

В этом случае близкие начальные состояния приводят к близким конечным состояниям. Это предположение есть не что иное, как классический *принцип причинности* на языке гамильтоновой динамики: *похожие причины приводят к похожим следствиям*. Исторически философы и физики от Лейбница до Максвелла верили в этот принцип, который, казалось, обеспечивал устойчивость процесса измерения и возможность предсказаний несмотря на заметный интервал погрешности.

Примечательно, что переход к гамильтоновому формализму позволяет высказать общее утверждение о причинности для классических динамических систем. В силу знаменитой теоремы математика Лиувилля, объем любой области фазового пространства

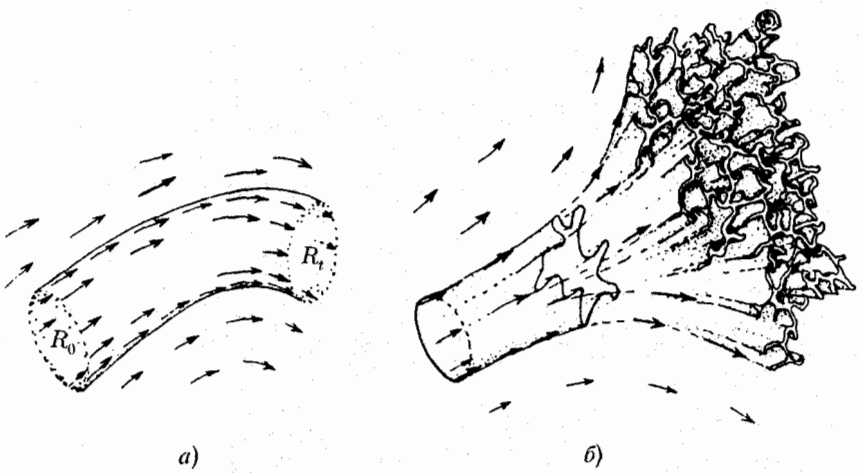


Рис. 2.13. Область фазового пространства начальных состояний R_0 переводится динамической системой в момент времени t в R_t (*а*) [2.22]; согласно теореме Лиувилля, объем области в фазовом пространстве сохраняется с течением времени в гамильтоновых системах, хотя сама эта область может изогнуться, вытянуться и расшириться (*б*) [2.22]

должен оставаться постоянным для любой гамильтоновой системы. Следовательно, размер области R_t на рис. 2.13 не может вырасти при любой гамильтоновой динамике, если слово «размер» понимать как объем фазового пространства, и будет равен R_0. Однако сохранение этого объема не исключает того, что на больших расстояниях в фазовом пространстве форма этой области может изогнуться и вытянуться (рис. 2.13 *б*) [2.22].

Можно представить себе каплю чернил, размешивающуюся в большом объеме воды в сосуде. Такой возможный эффект размазывания в фазовом пространстве означает, что локальная устойчивость траекторий ни в коей мере не обеспечивается теоремой Лиувилля. Ничтожное изменение начальных данных может привести к большим изменениям на выходе. Задачи многих тел в небесной механике и описания движения бильярдных шаров обладают теми же свойствами, хотя их динамика детерминирована. Тем не менее из теоремы Лиувилля вытекают некоторые общие следствия, касающиеся конечных гамильтоновых систем. Вспомним фазовый портрет маятника с трением на рис. 2.8 *в* (который не является консервативной системой) с точкой равновесия типа фокус в начале координат (рис. 2.14 *а*). В ее окресности фазовый объем уменьшается. У консервативной системы появляется особая точка типа центр (рис. 2.14 *б*), не являющаяся аттрактором [2.23].

На рис. 2.14 *б* траектории вращаются вокруг центра, и объем начальной области сохраняется. Таким образом, в силу теоремы Лиувилля, можно сделать общий вывод, что в любой консервативной системе должны быть исключены притягивающие особые точки. Эффект сжатия фазовых объемов можно также наглядно увидеть и для систем с предельными циклами. Поэтому, по тем же математическим (априорным) соображени-

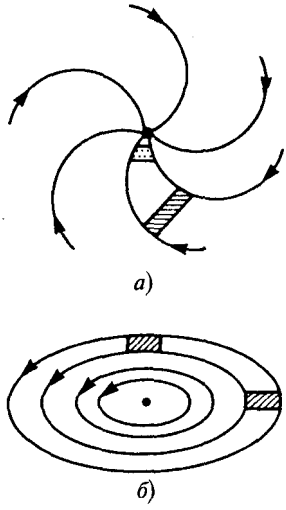


Рис. 2.14. Особая точка типа фокус в неконсервативной системе (без сохранения фазового объема) (*а*); особая точка типа центр в консервативной системе (с сохранением объема) (*б*)

ям, в консервативных системах невозможны аттракторы типа предельных циклов.

Эти результаты выводятся априори с помощью глубокой математической теоремы, касающейся поведения гамильтоновых систем. Нужно отдавать себе отчет в том, что консервативные физические системы – планетные системы, маятники, свободно падающие тела и т. п. – всего лишь некоторые конкретные приложения гамильтоновых систем. Они описываются определенным типом математических уравнений (уравнений Гамильтона). Свойства гамильтоновых систем выводятся из математической теории соответствующих уравнений. Следовательно, моделирование реальности с помощью гамильтоновых систем означает, что мы можем эпистемологически предсказать некоторые априорные свойства таких систем, например, отсутствие статического равновесия с аттрактором типа фокуса или узла или периодического устойчивого движения с аттрактором типа предельного цикла.

С философской точки зрения, этот взгляд, очевидно, подтверждает в несколько измененном смысле эпистемологию Канта. Предполагая математическую структуру некоторых динамических систем, мы, конечно, можем высказать ряд априорных утверждений о наших математических моделях независимо от их эмпирических приложений в разных науках. Но эпистемология Канта и подход, основанный на динамических системах, различаются в следующем смысле: существует не единственная категориальная структура (например, консервативные системы), а много разных типов систем, более или менее успешно моделирующих реальность. Поэтому в дальнейшем не нужно быть физиком или редукционистом, чтобы применять консервативные системы даже в науке о мышлении или экономике.

Следующий априорный результат изучения гамильтоновых (консервативных) систем утверждает, что существуют нерегулярные и хаотические траектории. Физики и философы XVIII и XIX вв. были убеждены, что природа описывается уравнениями движения ньютоновского или гамильтонового типа, и поэтому будущие и прошлые состояния Вселенной могут быть, хотя бы в принципе, рассчитаны, если хорошо известны начальные данные (скорости и координаты всех частиц). На философском уровне эта вера была наглядно представлена демоном Лапласа, который, как гигантский компьютер, без всяких физических ограничений может хранить и вычислять все необходимые состояния. Математически вера в демона Лапласа должна пред-

полагать, что классические механические системы интегрируемы, а следовательно их решения можно найти аналитически, без помощи компьютера, так же, как в задаче двух тел. В 1892 г. Пуанкаре уже знал, что неинтегрируемая задача трех тел в классической механике может приводить к полностью хаотическим траекториям [2.24]. Примерно шестьдесят лет спустя Колмогоров (1954), Арнольд (1963) и Мозер (1967) доказали знаменитую теорему Колмогорова–Арнольда–Мозера (КАМ) о том, что движение в фазовом пространстве классической механики не является ни полностью регулярным, ни полностью нерегулярным, а тип траектории существенно зависит от выбранных начальных условий [2.25].

Поскольку небесная механика является эмпирически хорошо подтвержденной динамической моделью гамильтоновой системы, теорема КАМ опровергает некоторые традиционные взгляды, касающиеся «надлунного» мира. Небо не является миром вечной регулярности, ни в смысле аристотелевского космоса, ни в смысле демона Лапласа. Очевидно, это не престол богов. Тем не менее оно и не полностью хаотично. Насколько можно судить по гамильтоновым системам, оно в равной степени регулярно и нерегулярно. Похоже, что небо в большей степени напоминает повседневную жизнь человека, чем считали наши предки. Для писателей это может стать поводом заинтересоваться гамильтоновыми системами. Однако обратимся к некоторым математическим фактам.

Одним из простейших примеров интегрируемой системы является гармонический осциллятор. Практически уравнения движения любой интегрируемой системы с n степенями свободы имеют тот же вид, что и система уравнений для n несвязанных гармонических осцилляторов. Соответствующее фазовое пространство имеет $2n$ измерений, отвечающих n координатам и n импульсам. В случае гармонического осциллятора с $n = 1$ получаем окружность, а для двух гармонических осцилляторов с $n = 2$ – тор (см. рис. 2.11 *г*). Таким образом, существование n интегралов движения (сохраняющихся с течением времени величин) ограничивает траектории в $2n$-мерном фазовом пространстве интегрируемой системы n-мерным многообразием с топологией n-тора. Для интегрируемой системы с двумя степенями свободы и четырехмерным фазовым пространством траектории можно наглядно изобразить на торе. Замкнутые орбиты возникают только в случае, если отношение частот двух соответствующих осцилляторов является рациональным числом (рис. 2.15). В случае иррациональных отношений частот орбита никогда не повторяется, а проходит бесконечно близко от любой точки тора [2.26].

Неинтегрируемая система в небесной механике изучалась Хеноном и Хейлесом в 1964 г. Эта модель представляет собой интегрируемую пару гармонических осцилляторов, связанных неинтегрируемыми кубичными по координатам слагаемыми. Если

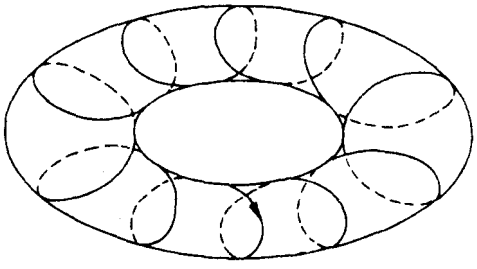


Рис. 2.15. Интегрируемая система с двумя степенями свободы на торе и замкнутая орбита

известно начальное состояние модели с двумя пространственными координатами q_1, q_2 и двумя импульсными координатами p_1, p_2, то полная энергия E определяется соответствующей функцией Гамильтона H, зависящей от указанных координат. Траектории системы проходят в четырехмерном фазовом пространстве по трехмерной гиперплоскости, определяемой уравнением $H(q_1, q_2; p_1, p_2) = E$.

Значения E можно использовать для изучения сосуществования регулярных и нерегулярных движений, предсказываемых теоремой КАМ. При малых значениях E динамическая система обладает регулярным поведением, а при больших значениях становится хаотичной. Чтобы наглядно представить такое изменяющееся поведение, рассмотрим пересечения траекторий с двумерной плоскостью координат q_1 и q_2 (отображение Пуанкаре). При $E = \frac{1}{24}$ (рис. 2.16 *а*) и $E = \frac{1}{12}$ (рис. 2.16 *б*) отображения Пуанкаре показывают пересечения несколько деформированных торов, что свидетельствует о регулярном движении. Выше критического значения $E = \frac{1}{9}$ бóльшая часть всех торов разрушается и возникают случайные пятна нерегулярных точек. При $E = \frac{1}{8}$ (рис. 2.16 *в*) карта Пуанкаре демонстрирует состояние перехода, в котором сосуществуют и регулярные, и нерегулярные движения. При $E = \frac{1}{6}$ (рис. 2.16 *г*) движение оказывается полностью нерегулярным и хаотичным [2.27].

Пример сходной динамики в прикладной задаче дается следующей неинтегрируемой системой трех тел в небесной механике. Рассмотрим движение Юпитера, возмущающего движение астероида вокруг Солнца (рис. 2.17).

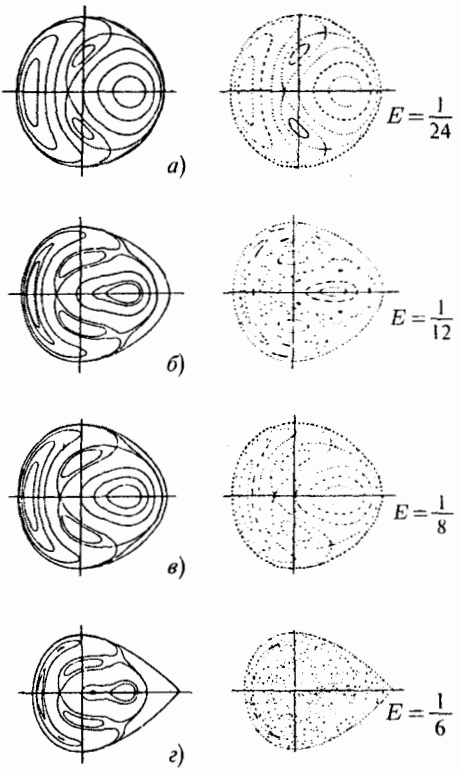


Рис. 2.16. Отображения Пуанкаре для системы Хенона—Хейлеса [2.27]



Рис. 2.17. Возмущение движения астероида Юпитером

Юпитер и астероид интерпретируются как два осциллятора с определенными частотами. Согласно теореме КАМ, в зависимости от отношения

частот, существуют устойчивые и неустойчивые движения астероида.

В общем случае мы можем быть уверены, что как устойчивые, так и неустойчивые траектории математически хорошо описаны и представляют решения одних и тех же уравнений. Следовательно, даже неинтегрируемые задачи многих тел описывают детерминированные модели мира. Метафорически выражаясь, можно сказать, что Бог Лейбница и Ньютона мог бы без труда предсказывать регулярные и нерегулярные траектории *sub specie aeternitatis* (с точки зрения вечности) и при этом ему не требовалось бы рассчитывать их эволюцию шаг за шагом. Наблюдаемое хаотическое поведение не связано ни с большим числом степеней свободы (в задаче трех тел в астрономии число степеней свободы невелико), ни с неопределенностью человеческих знаний. Причиной нерегулярности является нелинейность уравнений Гамильтона, благодаря которой первоначально близкие траектории экспоненциально быстро расходятся в ограниченной области фазового пространства. Так как начальные условия можно измерить только с конечной точностью, а ошибки нарастают экспоненциально быстро, то долговременное поведение таких систем предсказать невозможно. Математически начальные условия характеризуются действительными величинами, которые могут быть иррациональными числами с бесконечными непериодическими последовательностями цифр. Поэтому при вычислениях с помощью компьютера использование уточненных данных измерений со все большим и большим числом цифр не будет приводить к существенному улучшению прогноза.

Макрокосмос небесной механики, мир астероидов, планет, звезд и галактик, определяется сосуществованием регулярного и нерегулярного поведения. В небесах детерминированный хаос встречается не везде, но он возможен локально, и поэтому может приводить к космическим катастрофам, которые в принципе нельзя исключить. Что можно сказать о микрокосмосе квантовой механики, квантовом мире фотонов, электронов, атомов и молекул? Существует ли хаос в квантовом мире? Чтобы ответить на этот вопрос, мы должны сначала напомнить читателю некоторые основные понятия гамильтоновых систем и фазовых пространств, имеющие отношение к объектам в квантовом мире [2.28].

В 1900 г. Макс Планк предположил, что электромагнитные колебания совершаются только в виде квантов, энергия которых E определенным образом связана с частотой ν и постоянной h («планковский квант») соотношением $E = h\nu$. Согласно физике XX в., помимо огромной по величине эйнштейновской константы c (скорости света), крохотная планковская константа h является второй фундаментальной постоянной природы. Формула Планка получила экспериментальное подтверждение, например, при исследовании излучения черного тела. В 1923 г. Луи де Бройль предположил, что даже частицы вещества могут иногда вести себя как волны. Частота волны де Бройля ν для частицы массой m удовлетворяет соотношению Планка. В комбинации со знаменитым соотношением Эйнштейна $E = mc^2$ специальной теории относительности («масса — это конкретное состояние энергии и может поэтому превращаться в энергию излучения») получаем соотношение, показывающее, что ν связано с m формулой $h\nu = mc^2$. Отсюда следует, что в квантовом мире

осциллирующие с определенной частотой поля могут возникать только в дискретных по массе состояниях, зависящих от постоянных Планка и Эйнштейна. Очевидно, что в квантовом мире все явления можно рассматривать и как волны, и как частицы. Этот так называемый корпускулярно-волновой дуализм был хорошо подтвержден многими экспериментами, которые обнаружили в зависимости от созданных экспериментальных условий свойства волн или частиц у квантовых систем типа фотонов или электронов.

В 1913 г. Нильс Бор предложил «планетарную» модель атома, позволившую с удивительной точностью объяснить наблюдаемые и измеренные дискретные уровни энергии и спектры атомов. Постулаты Бора требовали, чтобы момент импульса электрона на орбите вокруг ядра мог принимать только целые значения, кратные величине $\hbar = h/2\pi$. Успешные, хотя взятые несколько *ad hoc*, постулаты стали основой приближенной геометрической модели, которую следовало вывести из динамической теории квантового мира, соответствующей ньютоновской или гамильтоновой классической механике, способной объяснить законы движения планет Кеплера. Основы динамики квантового мира были заложены квантовой механикой Гейзенберга и Шрёдингера, которая стала фундаментальной теорией материи в физике XX в.

Если принять во внимание некоторые необходимые изменения, зависящие от постоянной Планка, то основные принципы квантовой механики можно ввести эвристически по аналогии с соответствующими понятиями гамильтоновой механики. Эта процедура определяется *принципом соответствия* Бора (рис. 2.18). Так, в квантовой механике классические векторы, типа векторов координаты и импульса, должны быть заменены на некоторые операторы, удовлетворяющие (неклассическому) соотношению некоммутативности, зависящему от постоянной Планка. Если h обращается в нуль ($h \to 0$), мы получаем хорошо известные классические соотношения коммутации, например, для координаты и импульса, позволяющие измерить оба вектора одновременно с произвольной точностью. Немедленное следствие некоммутативных соотношений в квантовой механике — это соотношение неопределенностей Гейзенберга

$$\Delta p \Delta q \geqslant \frac{h}{2\pi}.$$

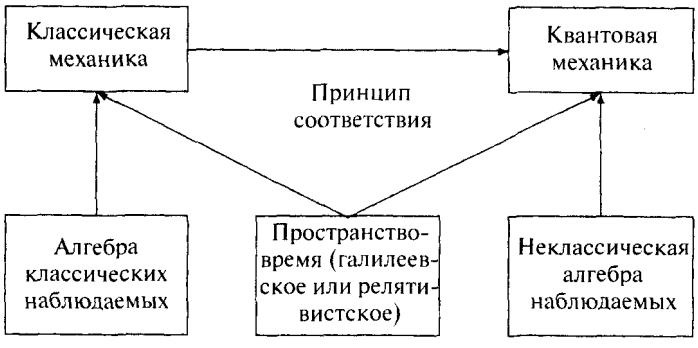


Рис. 2.18. Принцип соответствия Бора

Если производится измерение координаты q с точностью Δq, то импульс p может быть измерен с погрешностью Δp. Таким образом, очевидно, что в квантовом мире нет траекторий или орбит, поскольку они требуют знания точных значений как координаты, так и импульса частицы. Известные боровские орбиты электронов представляют собой лишь очень грубую геометрическую наглядную картину [2.29].

Согласно принципу соответствия Бора, классические системы, описываемые функциями Гамильтона, должны быть заменены квантовыми системами (например, электронами или фотонами), которые описываются оператором Гамильтона, зависящим не от векторов, а от операторов (координаты и импульса). В классической физике состояния гамильтоновых систем определены точками в фазовом пространстве. В квантовой механике подходящим аналогичным понятием является гильбертово пространство. Состояния квантовой системы описываются векторами в гильбертовом пространстве[4)], натянутом на собственные векторы его оператора Гамильтона.

Чтобы несколько подробнее пояснить это математическое замечание, представим одну квантовую частицу. С классической точки зрения, частица определяется своим положением в пространстве и своим импульсом. В квантовой механике каждое отдельное положение, которое могла бы занимать частица, есть отдельная альтернатива, объединенная с другими в собрание всех возможных положений с комплекснозначными весовыми множителями. Таким образом, мы получаем комплексную функцию положения — так называемую волновую функцию $\psi(x)$. Для каждого положения x значение $\psi(x)$ означает амплитуду вероятности нахождения частицы в точке x. Вероятность обнаружения частицы в малом фиксированном интервале в окрестности этого положения получается образованием квадрата модуля амплитуды $|\psi(x)|^2 \cdot \Delta x$, где Δx — величина этого интервала. Волновая функция определяет также различные амплитуды вероятности для разных возможных импульсов. Таким образом, гильбертово пространство есть комплексное пространство состояний квантовой системы.

Причинная динамика квантовых состояний определяется дифференциальным уравнением в частных производных, называемым уравнением Шрёдингера. В то время как классические наблюдаемые коммутативны и всегда имеют определенные значения, неклассические наблюдаемые квантовых систем некоммутативны и, вообще говоря, не имеют общих собственных векторов и, следовательно, определенных собственных значений. Для наблюдаемых в квантовой механике можно вычислить только статистические математические ожидания.

Важным свойством формализма, основанного на уравнении Шрёдингера, является *принцип суперпозиции*, следующий из линейности этого уравнения. Например, рассмотрим две квантовые системы, которые однажды провзаимодействовали (например, пара фотонов вылетела из общего источника в противоположных направлениях). Даже когда их физическое взаимодействие стремится к нулю на больших расстояниях, они остаются

[4)] Это аналог обычного евклидова пространства, в котором вектор имеет бесконечно много координат и в котором, как и в обычном пространстве, можно определить угол между векторами. — *Прим. ред.*

в общей суперпозиции состояний, которые не могут быть разделены или локализованы. В таком перепутанном (чистом) квантовом состоянии суперпозиции наблюдаемая двух квантовых систем может иметь только неопределенные собственные значения. Принцип суперпозиции или линейности в квантовой механике утверждает существование коррелированных (перепутанных) состояний составных систем, что полностью подтверждается экспериментами ЭПР-типа, названными так в связи с парадоксом, сформулированным в работе Эйнштейна, Подольского, Розена. С философской точки зрения, (квантовое) целое больше, чем сумма его частей. Фундаментальным свойством квантового мира, отличающим его от классических гамильтоновых систем, является нелокальность [2.30]. Мы вернемся к этому вопросу при обсуждении возникновения разума-мозга и искусственного интеллекта (гл. 4–6).

Принцип соответствия Бора позволяет поставить вопрос о том, приводит ли существование хаотического движения в классических гамильтоновых системах к нерегулярностям в соответствующих квантовых системах [2.31]. Наша сводка основных положений квантовой механики дает намеки на те изменения, которых следует ожидать при переходе от классических хаотических систем к их квантово-механическим аналогам. В противоположность классической механике, квантовая механика допускает только статистические предсказания. Несмотря на то что уравнение Шрёдингера линейно и может быть точно решено, например, для гармонического осциллятора, и несмотря на то что волновая функция строго определяется из уравнения Шрёдингера, это не означает, что можно точно вычислить свойства квантовых состояний. Мы можем вычислить только плотность вероятности обнаружения фотона или электрона в данной пространственно-временной точке.

В силу соотношения неопределенностей Гейзенберга траектории в 3квантовом мире не существуют. Поэтому для квантовых систем невозможно определение хаоса как экспоненциально быстрого расхождения близких траекторий. Заслуживает внимания и другой касающийся хаоса аспект соотношения неопределенностей. Вспомним классическое фазовое пространство с хаотическими областями типа показанных на рис. 2.16. Соотношение неопределенностей подразумевает, что нельзя различить точки внутри объема h^n в $2n$-мерном фазовом пространстве. Причина состоит в том, что квантовая механика не может описать хаотичное поведение в объеме меньшем h^n. Вне этих хаотичных областей можно ожидать только регулярное поведение. В этом смысле маленькое, но конечное значение постоянной Планка может подавить хаос.

В квантовой механике следует отличать не зависящие от времени стационарные системы от зависящих от времени гамильтоновых систем. Для систем со стационарными (не зависящими от времени) гамильтонианами уравнение Шрёдингера можно свести к так называемой линейной задаче на собственные значения, что позволяет вычислить уровни энергии, например, в атоме водорода. До тех пор пока уровни дискретны, волновая функция ведет себя регулярно, и хаотическое поведение отсутствует. Возникает вопрос о том, существуют ли различия между энергетическими спектрами квантовой системы с регулярным классическим пределом и квантовой системы, классическая версия которой проявляет хаотическое пове-

дение. Зависящие от времени гамильтонианы используются для описания временно́й эволюции, например, элементарных частиц и молекул.

Согласно принципу соответствия Бора, можно прийти к квантовому хаосу, если начать с исследования каких-нибудь классических гамильтоновых систем. Они могут быть интегрируемы, почти интегрируемы или хаотичны. Отсюда траектории в гиперплоскости энергии могут быть регулярными, почти регулярными или почти хаотическими. Квантуя функцию Гамильтона с помощью замены векторов координаты и импульса соответствующими операторами, получаем оператор Гамильтона аналогичной квантовой системы. На следующем шаге можно вывести уравнение Шрёдингера и уравнение на собственные значения. Теперь можно спросить, переносятся ли свойства классической системы с ее интегрируемым, почти интегрируемым и хаотическим поведением на соответствующую квантовую систему. Что можно сказать о спектре, собственных функциях и т. д.? Все эти вопросы объединяются под общим названием «проблемы квантового хаоса». Например, существуют вычисления, которые показывают, что энергетический спектр свободной квантовой частицы в бильярде, имеющем форму стадиона, для которой классическое движение хаотично, резко отличается от спектра свободной квантовой частицы в круге, для которой классическое движение регулярно.

На рис. 2.19 на двух примерах иллюстрируется распределение расстояний между соседними уровнями [2.32]. На рис. 2.19 *а*, *б* показана система, состоящая из двух связанных осцилляторов, для двух разных значений коэффициента связи. В то время как соответствующая классическая динамика на рис. 2.19 *а* регулярна, классическая динамика (рис. 2.19 *б*) почти хаотична.

На рис. 2.19 *в*, *г* в качестве примера показан атом водорода в однородном магнитном поле. Предельным классическим случаем для системы, показанной на рис. 2.19 *в*, является классическая регулярная динамика, показанная на рис. 2.19 *а*; а рис. 2.19 *г* соответствует классический аналог, показанный на рис. 2.19 *б*. Регулярный и хаотический случаи можно различить по разным распределениям уровней энергии (распределения Пуассона и Вигнера), которые можно вы-

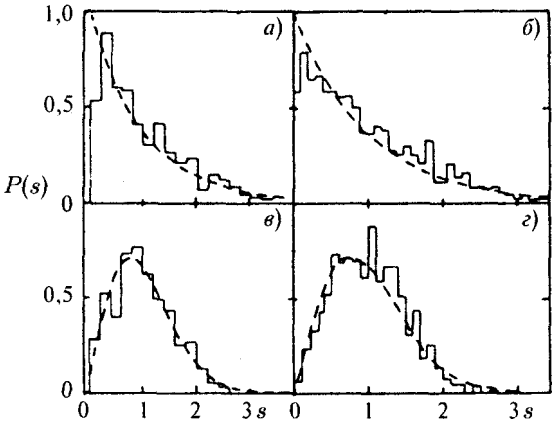


Рис. 2.19. Спектр мощности для двух связанных осцилляторов с: *а* — регулярной; *б* — почти хаотической классической динамикой. Наличие основной и кратной ей линий в спектре говорит об упорядоченности в этой системе, отсутствие таковой — о хаосе. Уровни энергии для атома водорода в однородном магнитном поле с соответствующей: *в* — регулярной; *г* — почти хаотической классической динамикой [2.32]

числить, решив соответствующее уравнение Шрёдингера. Эти распределения подтверждаются рядом численных моделей, а также лабораторными измерениями в лазерной спектроскопии. В этом смысле квантовый хаос — совсем не иллюзия, а сложное структурное свойство квантового мира. Гамильтоновы системы являются ключом к обнаружению хаоса в макро- и микромире. Однако мы, конечно, не должны смешивать сложную математическую структуру детерминированного хаоса с популярной идеей беспорядка.

2.4. Консервативные и диссипативные системы и возникновение порядка

С момента разработки новых методов небесной механики Пуанкаре (1892) было известно математическое утверждение, что некоторые механические системы, эволюция которых во времени определяется нелинейными уравнениями Гамильтона, могут совершать хаотическое движение. Однако до тех пор, пока в распоряжении ученых не появились соответствующие инструменты для изучения неинтегрируемых систем, детерминированный хаос рассматривался не более как диковинная редкость. В течение первых десятилетий XX в. было развито много численных процедур, позволяющих, по крайней мере приближенно, преодолевать математическую сложность нелинейных дифференциальных уравнений. Вычислительная мощь современных высокоскоростных компьютеров и улучшенная экспериментальная техника способствовали недавним успехам в применении сложных нелинейных систем в качестве математических моделей в естественных и общественных науках. Визуализация нелинейных моделей с помощью компьютерных технологий далеко продвинула междисциплинарные исследования во многих областях науки.

В рамках этого научного подхода метеоролог Эдвард Лоренц, ученик знаменитого математика Биркгофа [2.33] в 1963 г. обнаружил, что динамическая система трех связанных нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка может приводить к полностью хаотичным траекториям. С математической точки зрения, нелинейность является необходимым, но недостаточным условием хаоса. Она необходима, так как линейные дифференциальные уравнения можно решить с помощью хорошо известных математических методов (фурье-преобразований и т. д.), и при этом не возникает хаоса. Использованная Лоренцом для моделирования динамики погоды система отличается от гамильтоновых систем в духе Пуанкаре главным образом своей диссипативностью. Грубо говоря, диссипативная система не консервативна (энергия в ней не сохраняется), а «открыта». Обычно она содержит внешний управляющий параметр, который можно менять и прослеживать переход к хаосу.

Более точно, как консервативные, так и диссипативные системы характеризуются нелинейными дифференциальными уравнениями $\dot{\vec{x}} = \vec{F}(x, \lambda)$, содержащими нелинейную функцию $\vec{F}$ вектора $\vec{x} = (x_1, \ldots, x_d)$, зависящую от внешнего управляющего параметра λ. В то время как для консервативных систем, согласно теореме Лиувилля, элементы объема в соответствующем фазовом пространстве с течением времени меняют свою форму, но сохраняют объем, элементы объема для диссипативных систем с тече-

нием времени сжимаются (ср. рис. 2.13 и 2.14) [2.34].

Открытие Лоренцом детерминированной модели турбулентности возникло в процессе имитационного моделирования глобальных атмосферных процессов. Нагреваемая Солнцем Земля подогревает атмосферу снизу. Всегда холодное надатмосферное пространство поглощает теплоту из внешнего слоя атмосферы. Нижний слой стремится подняться, а верхний — опуститься. Это движение слоев моделировалось в ряде экспериментов Бенара. Движение конкурирующих масс теплого и холодного воздуха представляется циркуляционными вихрями, называемыми *ячейками Бенара*. В трех измерениях вихрь может содержать теплый воздух, поднимающийся по кольцу, и нисходящий к центру холодный воздух. Таким образом, атмосфера состоит из моря трехмерных ячеек Бенара, тесно упакованных в гексагональную решетку. Отпечатки такого моря атмосферных вихрей можно наблюдать в регулярной структуре возвышенностей и впадин в пустынях, снежных полях или айсбергах.

В типичном эксперименте Бенара слой жидкости нагревается снизу в гравитационном поле (рис. 2.20 *а*). Нагретая жидкость со дна стремится подняться вверх, а холодная жидкость наверху — опуститься вниз. Этим движениям противодействует сила вязкости. При малых разностях температур ΔT вязкость берет верх, жидкость остается в покое, а теплота переносится за счет однородной конвекции. Внешним управляющим параметром системы является безразмерный параметр, так называемое число Рэлея Ra, которое пропорционально ΔT. При критическом значении Ra неподвижное состояние жидкости, при котором скорость в каждой точке равна нулю, становится неустойчивым и возникает структура, состоящая из стационарных конвективных валов (рис. 2.20 *б*) [2.35].

При значениях Ra, больших критического, наблюдается переход к хаотичному движению. Сложные дифференциальные уравнения, описывающие эксперимент Бенара, были упрощены Лоренцом до трех нелинейных дифференциальных уравнений его знаменитой модели. Дифференциальные уравнения описывают скорости изменения переменной X, пропорциональной скорости циркуляции потока жидкости, переменной Y, характеризующей разность температур между восходящими и нисходящими элементами жидкости, и переменной Z, пропорциональной отклонению вертикального профиля температуры от равновесного значения. Из этих уравнений можно вывести, что произвольный элемент объема в фазовом пространстве экспоненциально сжимается с течением времени. Таким образом, модель Лоренца диссипативна.

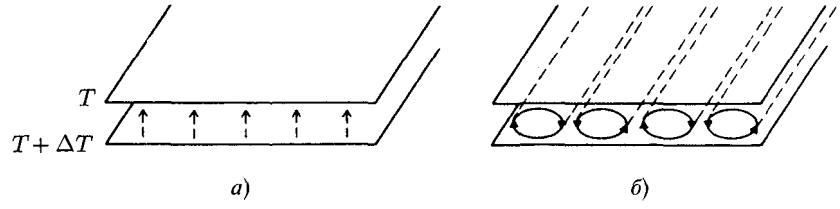


Рис. 2.20. Эксперимент Бенара. Нагретый слой жидкости внизу, холодный — вверху

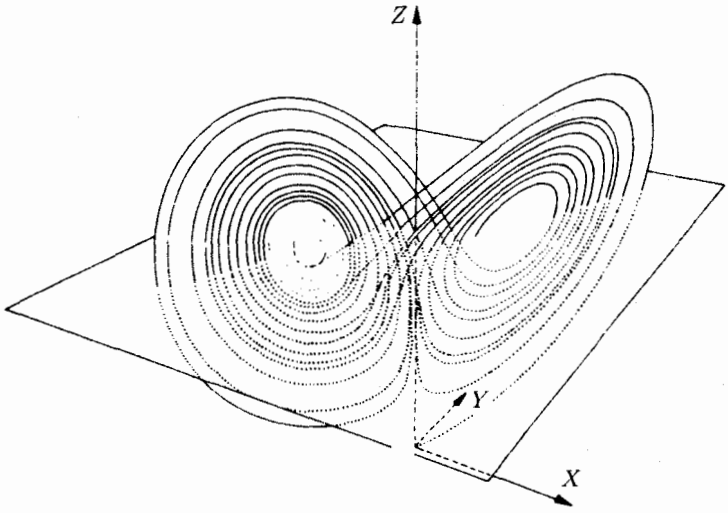


Рис. 2.21. Аттрактор Лоренца

Все это можно проиллюстрировать с помощью компьютерных расчетов для модели Лоренца. При определенных условиях траектории притягиваются к некоторой области трехмерного фазового пространства, делая одну петлю направо, затем несколько петель налево, затем снова направо и т. д. (рис. 2.21) [2.36].

Вид этих траекторий крайне чувствителен к начальным данным. Малейшие отклонения в значениях начальных условий приводят к траекториям, которые вскоре отклоняются от старой траектории и имеют другое число петель. Из-за странного вида, напоминающего два глаза совы, притягивающая область лоренцовской модели, описывающая непериодическое движение, получила название «странного аттрактора». Очевидно, странный аттрактор хаотичен. Но какова та геометрическая структура, к которой стремятся траектории, все более плотно накручиваясь и не пересекая друг друга? Этот пример иллюстрирует определение так называемой *фрактальной размерности* [2.37].

Пусть M — подмножество аттрактора в n-мерном фазовом пространстве. Фазовое пространство покрыто кубами, длина ребер которых равна ε. Пусть $N(\varepsilon)$ — число кубов, содержащих часть аттрактора M. Если ε стремится к нулю ($\varepsilon \to 0$), то взятое с отрицательным знаком отношение логарифма $N(\varepsilon)$ и логарифма ε, т. е.

$$D = -\lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon},$$

называется фрактальной размерностью.

Если аттрактор является точкой (рис. 2.14 *а*), то фрактальная размерность равна нулю. Для устойчивого предельного цикла (рис. 2.9) фрактальная размерность равна единице. Однако в случае хаотических систем фрактальная размерность — нецелое число. В общем случае эту размерность можно рассчитать только численно. Для модели Лоренца фрактальная размерность странного аттрактора $D \approx 2{,}06 \pm 0{,}01$.

Другая диссипативная система, в которой экспериментально изучалось хаотическое движение, это реакция

Белоусова–Жаботинского. В этом химическом процессе органическая молекула окисляется ионами бромата, причем окисление катализируется окислительно-восстановительной системой. Скорости изменения концентраций реагирующих веществ в системе химических реакций вновь описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений с нелинейной функцией. Переменная, которая сигнализирует о хаотическом поведении в реакции Белоусова–Жаботинского, — это концентрация ионов в окислительно-восстановительной системе. Экспериментально, при подходящей комбинации реагирующих веществ, наблюдаются нерегулярные колебания этих концентраций. Признаком колебаний являются разделенные окрашенные кольца. Такое разделение является прекрасной иллюстрацией нелинейности. Линейная эволюция удовлетворяла бы принципу суперпозиции. В этом случае колеблющиеся кольца проникали бы друг в друга, образуя суперпозицию.

Соответствующие дифференциальные уравнения автономны, т. е. не зависят от времени явно. Для наглядного изображения процесса с помощью компьютера часто удобно изучать *поток* (множество траекторий) в динамической системе, описываемой дифференциальными уравнениями, посредством дискретных отображений, которые строят, рассматривая точки пересечения траекторий с некоторой плоскостью с помощью $(d-1)$-мерного отображения Пуанкаре в соответствующем d-мерном фазовом пространстве (ср. рис. 2.16). Построенные точки, отвечающие последовательным моментам времени t_n [5)], обозначаются $\vec{x}(1)$, $\vec{x}(2)$, ..., $\vec{x}(n)$, $\vec{x}(n+1)$, ... Соответствующее отображение в простейшем случае имеет вид $\vec{x}(n+1) = \vec{G}(\vec{x}(n), \lambda)$. Классификацию консервативных и диссипативных систем можно обобщить, перейдя от потоков к отображениям Пуанкаре. Дискретное отображение называется диссипативным, если оно приводит к сокращению объема в фазовом пространстве.

Известным примером дискретного отображения является так называемое *логистическое отображение*, имеющее много приложений как в естественных, так и в общественных науках. С помощью этого отображения, используя довольно простые методы компьютерного анализа, можно проиллюстрировать основные понятия сложных динамических систем от нелинейности до хаоса. Поэтому коротко остановимся на этом примере. Математически логистическое отображение определяется квадратичным (нелинейным) рекурсивным отображением $x_{n+1} = \alpha x_n(1 - x_n)$ интервала $0 \leqslant x \leqslant 1$ на себя с управляющим параметром α, меняющимся в интервале $0 \leqslant \alpha \leqslant 4$. Значения функции для последовательности $x_1, x_2, x_3 \ldots$ можно вычислить с помощью простого карманного калькулятора. При $\alpha < 3$ последовательность сходится к неподвижной точке (рис. 2.22 *а*). Если α превышает некоторое критическое значение α_1 и продолжает расти, то значения последовательности после некоторого переходного интервала совершают периодические скачки между двумя значениями (рис. 2.22 *б*). Если α продолжает расти, превышая другое критическое значение α_2, величина периода удваивается. Если α продолжает расти дальше и дальше, то период удваивается каждый раз, когда достигается значение α из последовательности критических зна-

[5)] t_n — момент n-го пересечения траекторий с плоскостью Пуанкаре.

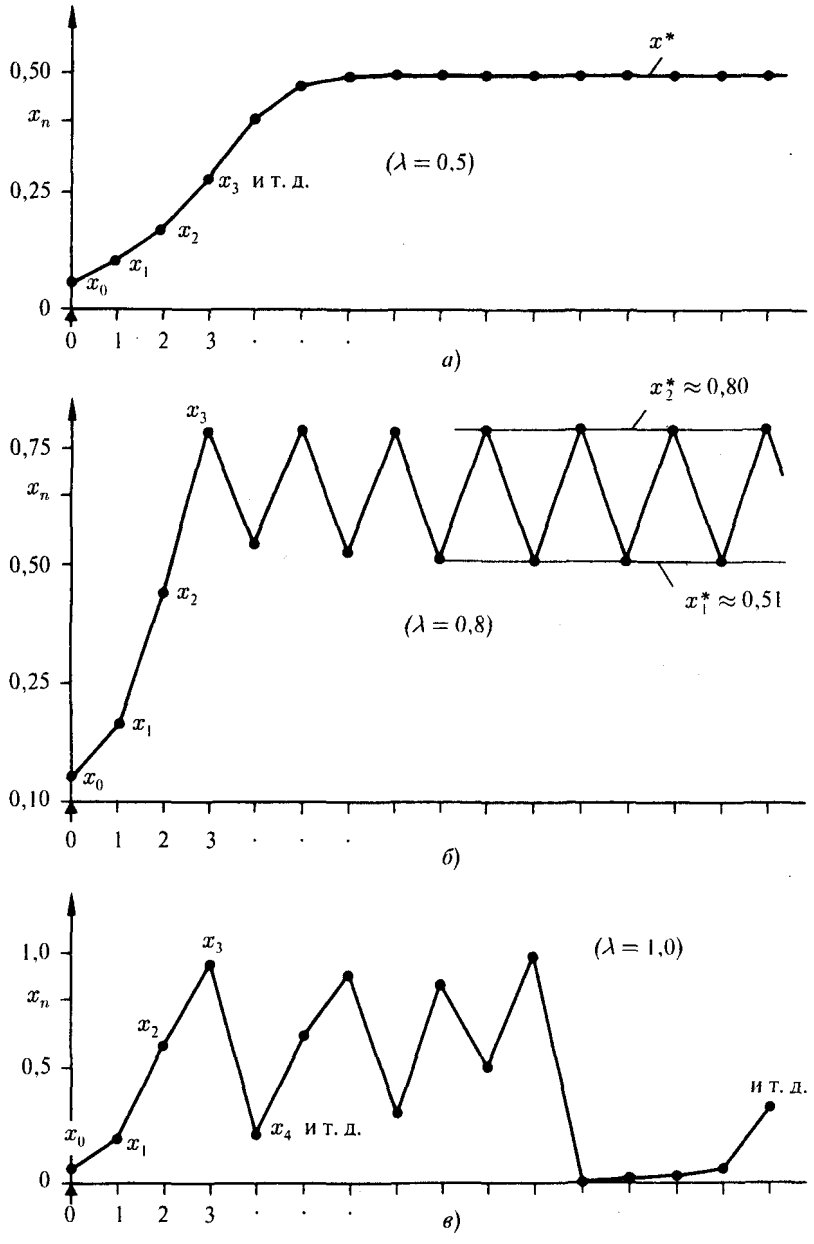


Рис. 2.22. Логистическое отображение как нелинейное рекурсивное отображение с управляющим параметром: $\alpha = 4\lambda = 2$ (*а*); $\alpha = 4\lambda = 3$ (*б*); $\alpha = 4\lambda = 4$ (*в*)

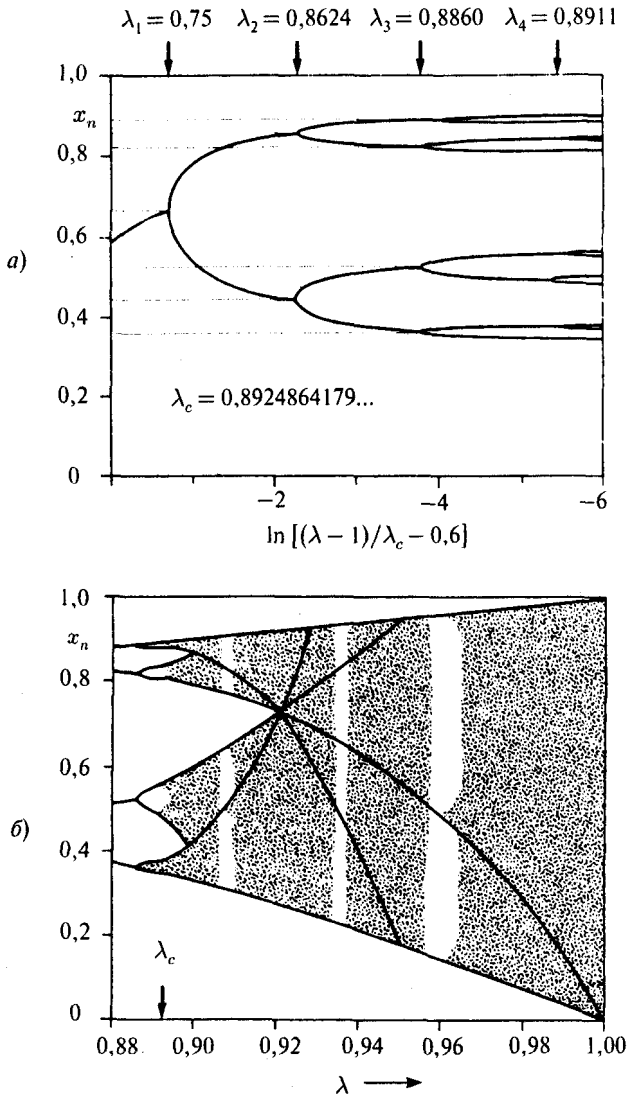


Рис. 2.23. Последовательность удвоения периода бифуркаций (*а*) и хаотичный режим логистического отображения при значении управляющего параметра выше $\alpha_c = 4\lambda_c$ (*б*)

чений $\alpha_1, \alpha_2, \ldots$. Однако при критическом значении, превышающем α_c, динамика (последовательность x_n) становится нерегулярной и хаотической (рис. 2.22 *в*) [2.38].

Показанная на рис. 2.23 *а* последовательность удваивающих период бифуркаций (*бифуркаций удвоения периода*) определяется законом постоянства, который был обнаружен Гроссманом и Томом для логистического отображения и установлен Фейгенбаумом в качестве универсального свойства целого класса отображений (теория универсальности Фейгенбаума) [2.39]. Хаотический режим в случае управляю-

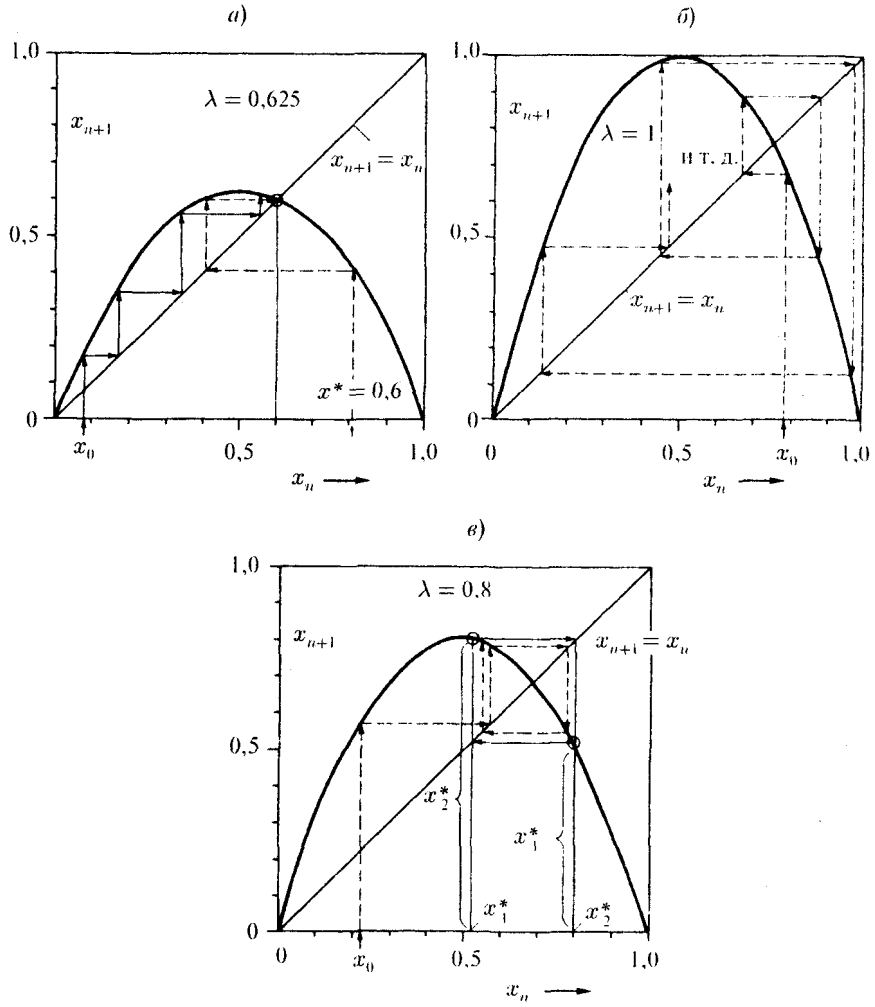


Рис. 2.24. Аттракторы логистического отображения для разных значений управляющего параметра: *а* — неподвижная точка; *б* — цикл; *в* — хаос

щего параметра, большего α_c, показан на рис. 2.23 *б*.

На рис. 2.24 *а–в* показаны отображения x_n на x_{n+1} при различных значениях управляющего параметра.

Поразительно, что такой простой математический закон, как логистическое отображение, приводит при увеличении параметра α к сложным бифуркациям и хаосу (рис. 2.23 *а*, *б*). Необходимой, но недостаточной причиной этого является нелинейность уравнения. В этом контексте, степень возрастания сложности определяется последовательными бифуркациями, приводящими к хаосу. Каждая бифуркация демонстрирует новую ветвь решения нелинейного уравнения. С физической точки зрения, эти бифуркации означают фазовые переходы от равновесного состояния к новым возможным равновесным состояниям.

С математической точки зрения, симметрия определяется как инвариантность определенных законов по отношению к различным преобразованиям между соответствующими системами отсчета наблюдателя. В этом смысле симметрия законов Кеплера определяется ее галилеевскими преобразованиями (см. рис. 2.6 *а*). Гидродинамические законы, описывающие нагреваемый снизу слой жидкости (рис. 2.20 *а*), инвариантны относительно всех горизонтальных переносов. Уравнения химических реакций (в бесконечной среде) инвариантны относительно всех переносов, вращений и отражений системы отсчета, используемой наблюдателем [2.40].

Тем не менее эти обладающие высокой симметрией системы допускают фазовые переходы в состояния с меньшей симметрией. Например, в случае эксперимента Бенара нагретый слой жидкости становится неустойчивым и возникают стационарные (не зависящие от времени) конвективные валы (рис. 2.20 *б*). Этот фазовый переход означает нарушение симметрии, потому что малые флуктуации приводят к тому, что валы «выбирают» одно из двух направлений вращения. Приведенные примеры показывают, что фазовый переход и нарушение симметрии вызваны изменением внешних параметров и приводят в конце концов к новой макроскопической пространственно-временной структуре системы и возникновению нового порядка.

Очевидно, что тепловые флуктуации несут в себе неопределенность или, более точно, вероятности изменений. Частица, которую случайным образом толкают туда-сюда (броуновское движение), может быть описана стохастическим уравнением, определяющим изменение распределения вероятности как функции времени. Одним из наиболее важных средств нахождения распределения вероятности процесса является так называемое *основное уравнение*, изучаемое в статистической физике. Чтобы сделать процесс наглядным, можно рассматривать частицу, движущуюся в трех измерениях на решетке.

Вероятность обнаружения системы в точке x в момент времени t возрастает за счет переходов из других точек x' в рассматриваемую точку («прибыль»). Эта вероятность уменьшается за счет переходов из этой точки («убыль»). Так как «прибыль» состоит из всех переходов из начальных точек x' в x, она составлена из суммы по всем этим начальным точкам. Каждый член суммы определяется вероятностью обнаружения частицы в точке x', умноженной на вероятность перехода (за единицу времени) из x' в x. Аналогично можно определить «убыль» для исходящих переходов. Следовательно, скорость изменения распределения вероятности процесса определяется стохастическим дифференциальным уравнением, записанным для разности между «прибылью» и «убылью».

Флуктуации возникают благодаря огромному числу хаотично движущихся частиц. Примером может служить жидкость, состоящая из молекул. Таким образом, бифуркация стохастического процесса может быть определена только при наблюдении за изменением вероятностного распределения. На рис. 2.25 показано, что при возрастании управляющего параметра и превышении соответствующих критических значений вероятностная функция меняется от резкого сосредоточения в области единственного аттрактора (рис. 2.25 *а*) до плоского распределения (рис. 2.25 *б*) и, наконец, до распределения с двумя

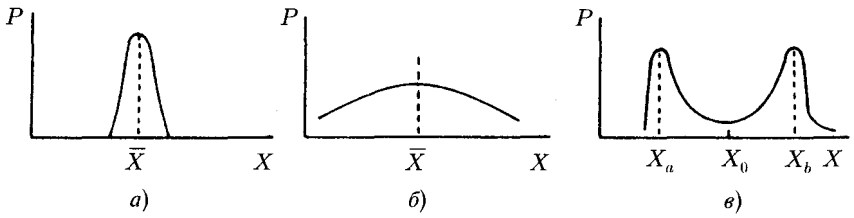


Рис. 2.25. Плотность вероятности для особой точки (*а*), плоского распределения (*б*) и двух аттракторов со стохастическим нарушением симметрии (*в*)

максимумами в области двух аттракторов (рис. 2.25 *в*). На рис. 2.25 *в* показано стохастическое нарушение симметрии [2.41].

В этом смысле сложность означает, что у системы имеется огромное число степеней свободы. Когда мы манипулируем системой снаружи, мы можем изменить ее степени свободы. Например, при большой температуре молекулы водяного пара движутся свободно, без взаимной корреляции. Когда температура понижается, образуется водяная капля. Это макроскопическое явление возникает тогда, когда молекулы за счет скоррелированного движения сохраняют среднее расстояние между собой. В точке замерзания вода превращается в кристаллы льда с фиксированным порядком расположения молекул. С этими фазовыми переходами человечество знакомо с самых первых дней своего существования. Возможно, различные агрегатные состояния могли стать причиной возникновения философских идей о воде как первоэлементе материи (см. разд. 2.1).

Другой пример относится к материаловедению. Когда ферромагнетик нагревают, то при температуре выше некоторой критической он теряет свою намагниченность. Однако при понижении температуры намагниченность восстанавливается. Намагниченность — это макроскопическое свойство, которое можно объяснить изменением числа степеней свободы на микроскопическом уровне. Ферромагнетик состоит из многих атомных магнитов. При повышенной температуре элементарные магниты ориентированы в случайных направлениях. Если сложить соответствующие магнитные моменты, то они компенсируют друг друга. Таким образом, на макроскопическом уровне никакой намагниченности не наблюдается. Ниже критической температуры атомные магниты выстраиваются в макроскопическом порядке, порождая макроскопическую намагниченность (рис. 4.9 *а*).

В обоих примерах возникновение макроскопического порядка вызвано понижением температуры. Структура формируется без потери энергии при низкой температуре. Следовательно, это пример консервативной (обратимой) самоорганизации. Физически это можно объяснить с помощью закона распределения Больцмана, который утверждает, что структуры с меньшей энергией реализуются в основном при низких температурах.

С другой стороны, существуют системы, упорядочивание и функционирование которых достигаются не за счет понижения температуры, а за счет поддержания проходящего через них потока энергии и вещества. Знакомыми примерами являются живые системы, такие как растения и животные, которые «питаются» биохимиче-

ской энергией. Процесс переработки этой энергии может приводить к образованию макроскопических структур — рост растений, миграции животных и т. п. Однако такое возникновение порядка никоим образом не присуще только живым системам (см. гл. 3). Это тип диссипативной (необратимой) самоорганизации вдали от термодинамического равновесия, который можно найти не только в биологии, но и в физике, и в химии.

Как хорошо известно из второго начала термодинамики, замкнутые системы, у которых отсутствует обмен энергией и веществом с окружающей средой, эволюционируют к неупорядоченным состояниям вблизи теплового равновесия. Степень неупорядоченности измеряется величиной, называемой *энтропией*. Второе начало утверждает, что в замкнутых системах энтропия всегда увеличивается до максимального значения. Например, когда холодное тело вступает в контакт с нагретым, обмен теплотой происходит таким образом, что оба тела приобретают равную температуру, т. е. достигается неупорядоченное и однородное распределение молекул. Если капля молока падает в чашку с кофе, то молоко распределяется таким образом, что в конце концов возникает неупорядоченная однородная смесь кофе с молоком. Обратный процесс никогда не наблюдался. В этом смысле процессы, происходящие в соответствии со вторым началом термодинамики, необратимы и развиваются в единственном направлении [2.42].

Примером из гидродинамики может служить неустойчивость Бенара, которая уже была описана в начале разд. 2.4. Когда нагретый слой жидкости (рис. 2.20 *а*) достигает критического значения, в нем возникает макроскопическое движение (рис. 2.20 *б*). Таким образом, до тех пор пока поддерживается определенный поток энергии, проходящий через систему, из неупорядоченного и однородного состояния возникает хорошо упорядоченная динамическая пространственная картина.

Еще один пример из гидродинамики — обтекание жидкостью цилиндра. Внешним управляющим параметром является число Рейнольдса Re, зависящее от скорости жидкости. При малых скоростях поток жидкости однороден (рис. 2.26 *а*). При увеличении скорости возникает новая макроскопическая структура с двумя вихрями (рис. 2.26 *б*). При дальнейшем увеличении скорости жидкости вихри начинают осциллировать (рис. 2.26 *в*, *г*). При определенном критическом значении скорости за цилиндром возникает нерегулярная и хаотическая картина турбулентного течения (рис. 2.26 *д*). На рис. 2.26 *а*–*д* дан обзор возможных типов аттракторов с одной и более неподвижными точками, бифуркациями, осциллирующими и квазиосциллирующими аттракторами и, наконец, хаосом [2.43].

Классическим примером самоорганизации из современной физики и техники является лазер. В твердотельном лазере имеется стержень из вещества с примесью определенных атомов. Каждый атом может быть возбужден поступающей извне энергией, что приводит к испусканию световых импульсов. Зеркала на торцевых гранях стержня служат для фокусировки этих импульсов. Если импульсы испускаются в направлении оси, то они несколько раз отражаются от зеркал и в результате остаются в лазере дольше, в то время как импульсы, распространяющиеся в других направлениях, покидают лазер. При малой мощности накачки лазер работает как лампа, поскольку атомы испускают световые

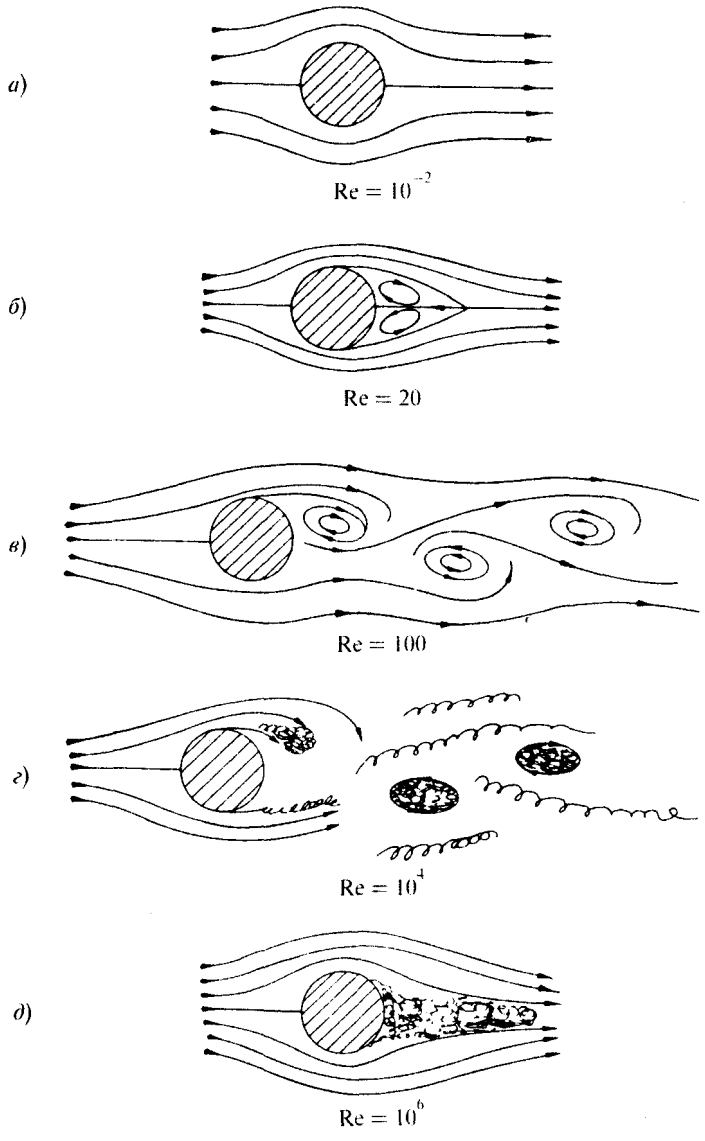


Рис. 2.26. Макроскопические структуры динамики жидкости за цилиндром в зависимости от увеличения скорости жидкости, выступающей в качестве управляющего параметра: *а* — однородное состояние; *б* — два вихря; *в* — осцилляции; *г* — квазиосцилляции; *д* — хаос

импульсы независимо друг от друга (рис. 2.27 *а*). При определенной мощности накачки атомы начинают колебаться в фазе, и возникает один упорядоченный импульс гигантской длины (рис. 2.27 *б*) [2.44].

Лазерный пучок представляет собой пример макроскопического порядка, возникающего за счет диссипативной (необратимой) самоорганизации вдали от теплового равновесия. Очевидно, что с учетом обмена и пе-

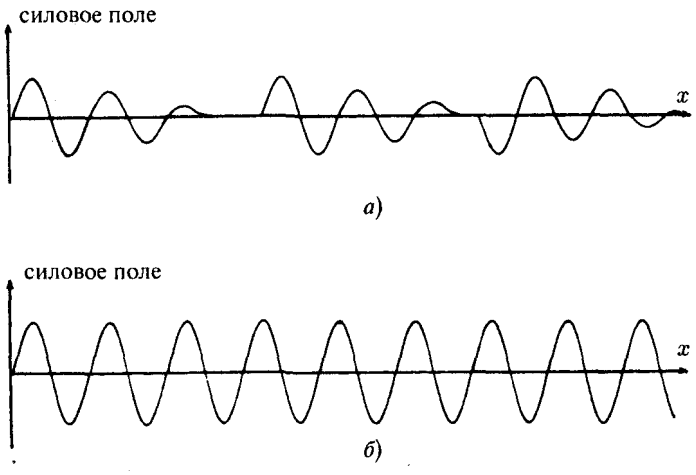


Рис. 2.27. Волновая картина излучения: *а* — лампы; *б* — лазера

реработки энергии лазер представляет собой диссипативную систему вдали от теплового равновесия.

В прошлом ученые вынуждены были постулировать существование каких-то демонов или мистических сил, которые приводили бы элементы таких систем к новым упорядоченным структурам. Однако, как и в случае с консервативной самоорганизацией, мы можем объяснить диссипативную самоорганизацию в рамках общей схемы, которая становится точной с помощью хорошо известных математических процедур. Начнем со структуры старого типа, например, однородной жидкости или случайно излучающего лазера. Неустойчивость старой структуры вызвана изменением внешних параметров, что приводит в конце концов к возникновению новой макроскопической пространственно-временной структуры. Вблизи точки неустойчивости следует различать устойчивые и неустойчивые коллективные движения или волны (моды). Неустойчивые моды начинают влиять на устойчивые моды и определять их изменения, поэтому они могут быть исключены из рассмотрения, как ведомые, зависящие от ведущих. Герман Хакен очень образно называет этот процесс «подчинением». Действительно, устойчивые моды выше определенного порога «подчиняются» неустойчивым модам.

Математически эта процедура хорошо известна под названием «адиабатического исключения» быстро релаксирующих переменных, например, из основного уравнения, описывающего изменения вероятностного распределения в соответствующей системе. Очевидно, что эта процедура исключения позволяет колоссально уменьшить число степеней свободы. Возникновение новой структуры вытекает из того факта, что остающиеся неустойчивые моды служат в качестве параметров порядка, определяющих макроскопическое поведение системы. Эволюция макроскопических параметров описывается дифференциальными уравнениями. В противоположность свойствам элементов системы на микроскопическом уровне (например, атомов, молекул и т. п.), параметры порядка определяют макро-

скопические свойства системы в целом. В случае лазера в качестве параметров порядка может служить ряд медленно меняющихся («незатухающих») амплитуд определенных мод, поскольку они начинают подчинять себе атомную систему. На языке биологии уравнения для параметров порядка описывают процессы «конкуренции» и «отбора» между модами. Конечно, все это лишь метафорические формулировки, которые могут быть уточнены с помощью упомянутых выше математических процедур [2.45].

Суммируем сказанное. В общем случае диссипативная структура при переходе через определенный порог может стать неустойчивой и разрушиться, приводя к возникновению новой структуры. Так как введение соответствующих параметров порядка является следствием исключения огромного числа степеней свободы, возникновение диссипативного порядка сопровождается резким уменьшением сложности. Диссипативные структуры являются фундаментальным понятием теории сложных систем, используемым в этой книге для моделирования процессов, изучаемых в естественных и общественных науках. Необратимость диссипативных структур может вызвать в памяти знаменитое высказывание Гераклита о том, что никто не может войти в одну и ту же реку дважды. Очевидно, что необратимость разрушает симметрию по отношению к обращению времени, характерную для классического (гамильтонового) мира Ньютона и Эйнштейна. Однако в постоянно меняющемся мире классическая точка зрения оказывается всего лишь частным случаем. С другой стороны, Гераклит верил в закон упорядочивания, гармонизирующий нерегулярные взаимодействия и создающий новые упорядоченные состояния материи. Следует выяснить, удовлетворяет ли математическая схема диссипативной системы универсальным характерным особенностям такого закона.

Общая схема эволюции материи могла бы основываться на единой теории всех физических сил (рис. 2.28). Стандартные модели космической эволюции, которые выводятся из общей теории относительности Эйнштейна, должны быть объяснены с помощью принципов квантовой теории. До сих пор существуют только несколько более или менее удовлетворительных математических моделей космической эволюции, которые можно лишь частично проверить и подтвердить наблюдениями. Тем не менее общей идеей этих моделей является то, что возникновение структур все большей сложности (элементарные частицы, атомы, молекулы, планеты, звезды, галактики и т. д.) можно объяснить космологическими фазовыми переходами или нарушением симметрии [2.46].

При космической эволюции начальное состояние предполагается практически однородным и симметричным в том смысле, что в общем случае нельзя различить никаких элементарных частиц, которые могут превращаться друг в друга. В процессе космической эволюции шаг за шагом достигаются критические значения величин, при которых за счет флуктуаций симметрии нарушаются и появляются новые частицы и силы. Как говорил Пьер Кюри: «Явление создается асимметрией» [2.47]. Однако мы должны сознавать, что космические процессы нарушения симметрии и фазовых переходов являются математическими экстраполяциями экс-

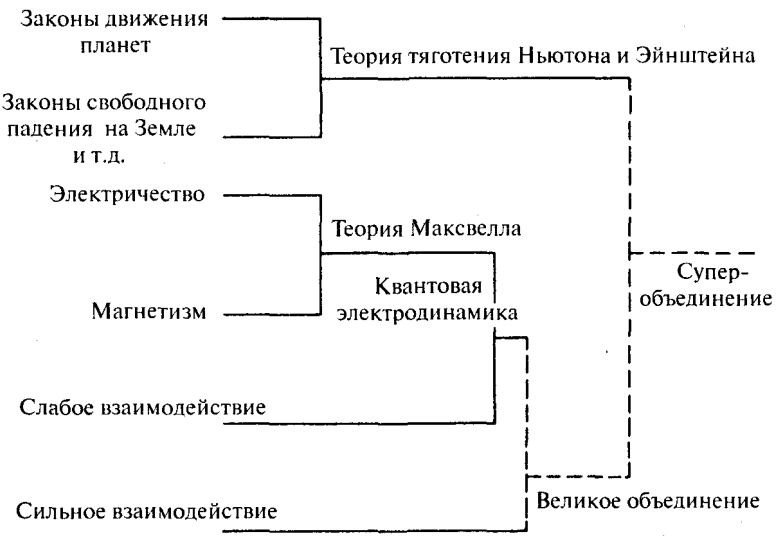


Рис. 2.28. Объединение физических сил

периментов и теорий в физике высоких энергий.

Сейчас в физике различают четыре фундаментальные силы — электромагнитную, сильную, слабую и гравитационную, которые математически описываются так называемыми калибровочными полями. Физика элементарных частиц стремится объединить четыре физические силы в одну фундаментальную силу, соответствующую начальному состоянию Вселенной. На кольцевом ускорителе в ЦЕРНе уже было установлено объединение электромагнитных и слабых сил при очень больших энергиях (рис. 2.28). Объединение означает, что при очень большой энергии частицы, «чувствующие» слабую силу (электроны, нейтрино и пр.), нельзя отличить от частиц, которые «чувствуют» электромагнитную силу. Эти частицы можно описать одной и той же группой симметрии ($SU(2) \times U(1)$), т. е. их взаимодействия инвариантны по отношению к преобразованиям этой группы. При определенном более низком критическом значении энергии симметрия нарушается, превращаясь в частичные симметрии ($U(1)$ и $SU(2)$), соответствующие электромагнитным и слабым силам.

С физической точки зрения такой тип нарушения симметрии означает фазовый переход, связанный с возникновением двух новых физических сил и соответствующих им элементарных частиц. Процесс спонтанного нарушения симметрии хорошо известен. Например, яйцо, которое мы едим за завтраком, неустойчиво в симметричном положении, когда оно стоит на одном из концов. Любая малая флуктуация приводит к тому, что оно спонтанно опрокидывается в устойчивое положение, отвечающее минимуму энергии. Фазовый переход ферромагнетика из немагнитного в намагниченное состояние вызван понижением температуры ниже критической точки. Элементарные диполи спонтанно принимают одну из двух возможных магнитных ориентаций, нарушая симметрию относитель-

но вращений спинов и приводя к возникновению нового макроскопического свойства (намагниченности).

Сложное многообразие барионов (протонов, нейтронов и пр.) и мезонов, взаимодействующих за счет сильных сил, построено из так называемых кварков, обладающих тремя степенями свободы — так называемыми «цветами»: красным, зеленым и синим. Например, барион построен из трех кварков, различающихся своими цветами. Эти три цвета дополнительны в том смысле, что адрон[6] нейтрален (не имеет цвета) по отношению к своему окружению. Математическая группа симметрии $SU(3)$, характеризующая цветовые преобразования кварков, хорошо изучена.

После успешного объединения электромагнитных и слабых взаимодействий физики пытаются осуществить «великое объединение» электрослабых и сильных взаимодействий, а на последнем этапе — «суперобъединение» всех четырех сил (рис. 2.28). Существует несколько исследовательских программ суперобъединения, например, супергравитация и теория суперструн. Математически все они описываются расширениями симметрии до более общих структур («калибровочные группы»), включающих частичные симметрии четырех основных сил. Технически этапы унификации должны проявиться с ростом значений очень больших энергий. Но «великое объединение» требует таких значений энергии, которые невозможно реализовать в лабораториях. Следовательно, физика великого объединения при высоких энергиях может быть подтверждена только определенными следствиями, которые можно проверить в лаборатории или наблюдать во Вселенной (например, распад протона). Суперобъединение всех сил требует состояний с бесконечно растущей энергией, физические свойства которых до сих пор неизвестны.

Теория так называемой «инфляционной Вселенной» предполагает, что существовало раннее состояние Вселенной очень малого размера, обладавшее очень большой энергией («квантовый вакуум»), которое очень быстро расширилось до макроскопических размеров за счет силы отталкивания квантового вакуумного состояния («антигравитация»). Этот космологический фазовый переход позволяет объяснить некоторые хорошо известные свойства наблюдаемой Вселенной, например, сравнительно однородное распределение звезд и материи. Во время периода инфляции некоторые крохотные отклонения от симметрии и однородности могли усиливаться, пока не становились достаточно большими, чтобы стать причиной наблюдаемых во Вселенной структур. В расширяющейся Вселенной плотность материи слегка менялась от места к месту. Следовательно, тяготение заставляло более плотные области замедлять свое расширение и начинать сжиматься. Такие локальные события привели к образованию звезд и галактик [2.48].

Вообще, возникновение структурного разнообразия во Вселенной от элементарных частиц до звезд и живых организмов объясняется фазовыми переходами, соответствующими нарушению симметрии равновесных состояний (рис. 2.29 и 2.30). В этом смысле космологическая эволюция материи понимается как процесс самоорганизации с возникновением консервативных и диссипативных структур. Однако мы должны понимать,

[6] Адроны — совокупность элементарных частиц (барионов и мезонов), способных к сильным взаимодействиям. — *Прим. пер.*

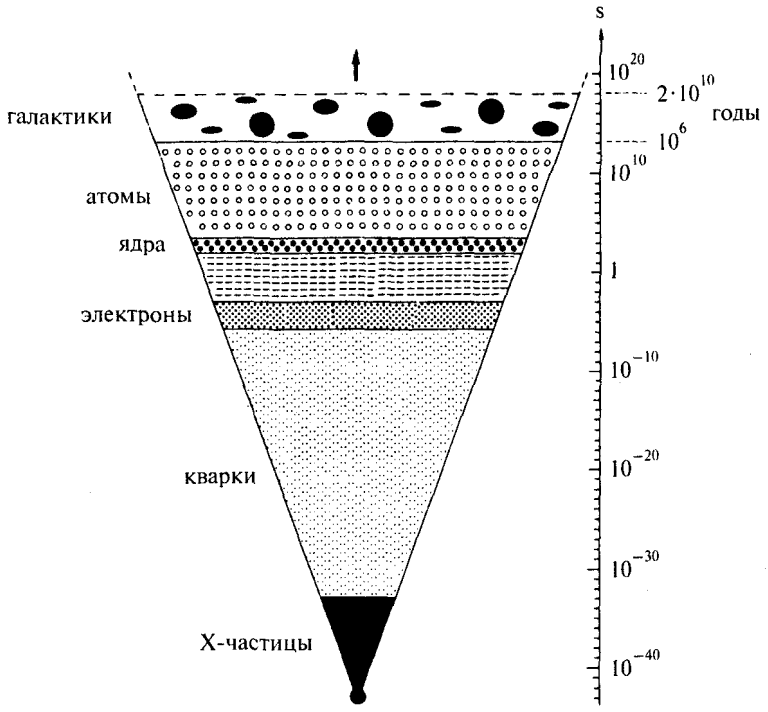


Рис. 2.29. Возникновение структурного разнообразия во Вселенной от элементарных частиц до галактик [2.48]

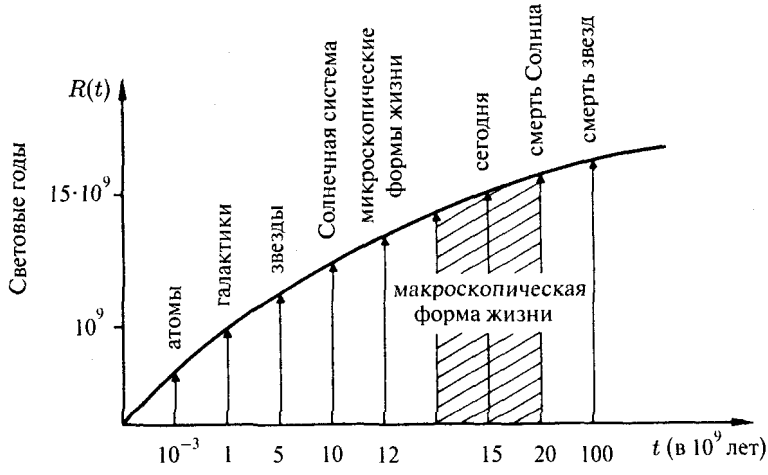


Рис. 2.30. Эволюция материи с увеличивающейся и уменьшающейся сложностью [2.51]

что космологическая самоорганизация в наши дни есть всего лишь «регулятивная идея исследования» (как говорил Кант): у нас есть более или менее приемлемые динамические модели, которые более или менее подтверждаются эмпирически. Самое начало космической эволюции все еще неизвестно.

Если мы предположим справедливость классических принципов общей теории относительности Эйнштейна, то, как математически доказали Роджер Пенроуз и Стивен Хокинг, стандартные модели космической эволюции имеют начальную сингулярность, которую можно интерпретировать как Большой взрыв, т. е. рождение Вселенной из математической точки. Однако если мы предположим объединение общей теории относительности (т. е. релятивистской теории тяготения Эйнштейна) и квантовой механики с мнимым (вместо действительного) временем, то, как математически доказал Хокинг, оказывается возможной «гладкая» космологическая модель без всякого начала, которая просто существует в согласии с математическими принципами единой релятивистской квантовой физики [2.49].

Теоремы о сингулярностях Пенроуза и Хокинга начинаются с гипотез о существовании малых областей пространства, в которых пространство-время так деформировано, что гравитация становится бесконечно большой. Существование подобных сингулярностей, например в форме черных дыр, ведет к серьезным методологическим проблемам: классические и релятивистские законы физики неприменимы в областях с бесконечной кривизной, так что невозможно предсказывать развитие событий во времени. Такой вывод, конечно, существенно более драматичен, чем экспоненциально нарастающие трудности в предсказании долговременного будущего хаотических систем. Именно поэтому Джеймс Хартл и Стивен Хокинг предложили свободную от сингулярностей модель Вселенной, в которой квантовая теория объединена с общей теорией относительности, а ось действительного времени заменена на мнимую ось (в смысле действительных и мнимых чисел) [2.50]. В противоположность релятивистской теории Эйнштейна, в модели Хокинга три пространственные оси совместно с мнимой осью времени приводят к замкнутой ранней квантовой Вселенной, у которой нет границ и краев. Такое пространство-время не только должно было бы существовать всегда, но и любое физическое событие можно было бы объяснить по его законам. В этой модели традиционные представления о том, что все должно было когда-то «начаться» или «быть создано», методологически неприемлемы, и оказываются на самом деле человеческими грезами, происходящими от того, что мы приспособились к ограниченным пространственно-временным сторонам нашего повседневного опыта.

Теория Хокинга не только математически непротиворечива, но и, по крайней мере в принципе, экспериментально проверяема. Поэтому она является научной теорией, а не какой-то спекуляцией. Среди проверяемых следствий этой свободной от сингулярностей модели — предсказание черных дыр, в которых не все мировые линии фотонов («световые лучи») полностью исчезают, а излучаются обратно в измеряемых количествах. Как и при объяснении начальной сингулярности Вселенной, причина состоит в возможности квантовых флуктуаций, основанных на соот-

ношении неопределенностей. Но излучающие черные дыры теряют энергию и массу. Через какое-то время они полностью испарятся, и вместе с ними будет потеряна история породивших эти дыры звезд. На месте испарившихся черных дыр во Вселенной возникнут провалы памяти. После коллапса всех галактических структур бесструктурная Вселенная, расширяющаяся в пустоту, достигнет «космической болезни Альцгеймера».

С философской точки зрения, ранняя квантовая Вселенная Хокинга, не имеющая начала, напоминает мир неизменного бытия Парменида. Однако соотношение неопределенностей в квантовой механике подразумевает, что ранняя Вселенная не может быть полностью однородной, так как обязательно должны существовать неопределенности или флуктуации в положениях и скоростях частиц. Таким образом, Вселенная должна была пройти через период быстрого расширения, описываемого инфляционной моделью, который привел к продолжительному периоду развития нашей сложной Вселенной. Равновесие мира Парменида разрушилось, и сам этот мир изменился на эволюционный и сложный мир Гераклита, и это было обусловлено основными принципами квантовой физики в рамках гипотезы о «гладком» времени без сингулярностей.

Космологическая модель «вечной» Вселенной без начала и конца уже рассматривалась в 1948 г. Германом Бонди, Томасом Голдом и Фредом Хойлом. Эти авторы предположили не только пространственную однородность и изотропию Вселенной в любой момент времени («Космологический принцип» в стандартной модели Большого взрыва), но и временну́ю однородность и изотропию. Их «идеальный Космологический принцип» утверждает, что Вселенная глобально выглядит одинаково не только во всех точках и по всем направлениям, но во все моменты времени, что приводит к стационарной модели. Согласно Хабблу, существует корреляция между красным смещением и увеличением расстояний между расширяющимися галактиками. Поэтому, если среднее число галактик в единице собственного объема должна оставаться постоянным, должны возникать новые галактики, чтобы заполнить пустые места в расширяющейся сети сопутствующих координат. Специальной гипотезой стационарной космологии была необходимость непрерывного рождения материи.

В новейших квазистационарных космологических моделях странное предположение о случайном и нелокальном рождении материи объясняется локальным рождением новых галактик везде и в любой момент времени во Вселенной. Предполагается, что в сверхмассивных центрах старых галактик могут реализоваться условия для локальных Больших взрывов. Представляется, что красные смещения также указывают на возраст галактики. Однородная эволюция после глобального Большого взрыва с последовательным возникновением элементарных частиц, атомов, молекул, галактик, звезд и т. д. (рис. 2.29) заменяется на автокаталитически самовоспроизводящуюся Вселенную без глобального начала и без конца, в которой локально рождаются, растут и умирают галактики. В этом случае старые умирающие галактики создают материал для новых галактик, подобно тому как растения и животные несут в себе семена новой жизни. Универсальная динамика была бы гигантским, никогда не кончающимся нелинейным процессом воспроизводства материи [2.49].

Однако возможно, что законы квантовой механики открывают лазейки («червоточины»), позволяющие избежать судьбы нашей вселенной. Согласно общей теории относительности, путешествие во времени не может происходить со скоростью, большей скорости света. Так как свет отклоняется гравитационными полями, путешественники во времени должны двигаться по искривленным траекториям в пространстве-времени с большой скоростью, ограниченной скоростью света. Поэтому, чтобы преодолеть разрыв пространства-времени гравитационными полями, нужно исследовать пространственно-временные области, пользуясь огромными искривленными обходными путями. Согласно соотношению неопределенностей Гейзенберга, квантовые флуктуации могли бы открыть короткоживущие червоточины в пространстве-времени. Таким образом, законы квантовой механики делают, по крайней мере потенциально, возможным то, что червоточины можно использовать как мимолетные кратчайшие пути между искривленными областями. Однако, если наша Вселенная не одинока, а напротив, как считает Андрей Линде, вплетена во фрактальную мультивселенную вместе с многими другими испытывающими бифуркацию вселенными, то червоточины можно было бы использовать как пути спасения для бегства из состарившейся, теряющей энергию вселенной, страдающей космической болезнью Альцгеймера и растущей враждебностью к жизни.

С теологической точки зрения, этим моделям не нужен Создатель, так как их миры просто были и будут замкнутыми и самоорганизующимися, не имеющими ни начала, ни конца. С математической точки зрения, такие модели могут быть очень элегантными. Но с методологической точки зрения, мы должны заключить, что до сих пор у нас нет полной и согласованной теории, объединяющей квантовую механику и релятивистскую теорию тяготения, которая могла бы объяснить эволюцию материи с растущей сложностью. Таким образом, мы лишь уверены в некоторых свойствах гравитационных полей, которыми могла бы обладать такая объединенная теория. В наши дни существуют различные подходы для достижения такой унификации на уровне элементарных частиц, основанные на теории струн. Если все типы элементарных частиц, связанных гравитационным, сильным, электромагнитным и слабым взаимодействиями, порождаются осциллирующими струнами, то существует возможность избежать окончательной потери информации в черных дырах стареющей вселенной. Информация могла бы быть сохранена на более фундаментальном уровне структуры материи колеблющимися мембранами струн более высокой размерности [2.52].

2.5. Сложные системы наномира и самоконструирующиеся материалы

Рассматривая эволюцию материи, можно наблюдать процессы самоорганизации на всех уровнях от элементарных частиц до космических структур галактик. Эти процессы интересны не только эпистемологически, но и с точки зрения приложений к материаловедению и науке о жизни. В пограничной области между материаловедением и наукой о жизни колоссальную роль играют надмолекулярные системы. В этом случае молекулярная самоорганизация означает

спонтанное объединение молекул в условиях равновесия в стабильные и структурно хорошо оформленные конструкции размерами $1–10^2$ нм (1 нм (нанометр) = 10^{-9} м).

В зависимости от точки зрения в рассматриваемой области науки, наноструктуры можно рассматривать как малые, привычные по размерам или огромные. Для химиков наноструктуры — это молекулярные ансамбли атомов числом от 10^3 до 10^9 и молекулярной массой от 10^4 до 10^{10} а. е. м. Таким образом, это химически большие надмолекулы. Для молекулярных биологов наноструктуры имеют размеры знакомых объектов — от белков до вирусов и клеточных органелл. Однако для специалистов по материаловедению, занимающихся микроэлектроникой, наноструктуры соответствуют современному пределу микроконструирования и, следовательно, являются очень малыми [2.53].

Начало науки о наноструктурах ознаменовалось предвидением выдающегося физика. В статье, озаглавленной «Там, внизу, еще много места», Ричард Фейнман утверждал:

> Насколько я могу судить, законы физики не запрещают возможности манипулирования вещами атом за атомом. В принципе, физик мог бы... синтезировать любое химическое вещество, формулу которого запишет химик... Как? Поместите атомы туда, куда укажет химик, и вещество готово. Если в конце концов разовьется наша способность видеть то, что мы делаем, и делать вещи на атомном уровне, это необычайно поможет решению задач химии и биологии. Такое развитие представляется мне неизбежным [2.54].

Фейнман высказал свои физические идеи о наномире в конце 1950-х гг. Вера в новый мир требует новых инструментов для наблюдения и измерений для подтверждения. С начала 1980-х гг. стало возможным исследование наномира с помощью сканирующего туннельного микроскопа. В конце 1980-х гг. Эрик Дрекслер описывал революционное предвидение технологических приложений:

> Природа показывает, что молекулы могут служить в качестве машин, так как с помощью этого механизма живые существа совершают работу. Ферменты — это молекулярные машины, которые создают, разрушают и перестраивают связи, удерживающие вместе другие молекулы. Мускулы приводятся в движение молекулярными машинами, которые тянут одно за другим волокна. ДНК служит в качестве системы хранения данных, передающей цифровые инструкции молекулярным машинам — рибосомам, производящим белковые молекулы. Эти молекулы белка, в свою очередь, создают большинство только что описанных молекулярных механизмов [2.55].

С помощью нанотехнологий можно определенным образом разместить и связать между собой атомы на манер тех процессов, которые происходят в живых организмах. Сложные организмы, подобные растениям и животным, используют молекулярные механизмы для производства и починки на клеточном и субклеточном уровнях. Клетку можно рассматривать как завод наномашин, состоящий из молекулярных прототипов, таких как белок, нуклеиновая кислота, липид и полисахарид. Они используются для производства энергии, обработки информации, саморепликации, самовосстановления и движения. Например, рибосома является клеточной наномашиной, которая считывает инфор-

мацию с цепочки РНК, с тем чтобы построить входящие в состав белка аминокислоты. Это напоминает конвейерное производство автомобилей роботами в автомобильной промышленности.

Биологические микроорганизмы следует понимать как клеточные системы, приводящиеся в действие и контролируемые наномашинами. Например, бактерия вида *Escherichia Coli* для движения в жидкости использует хвосты, подобные крыльям ветряной мельницы. Хвосты, как пропеллеры, крутятся за счет поставляемого биохимическими наномашинами топлива. Эти наномашины состоят из белков в мембранах, генерирующих вращение хвостов — крыльев мельницы. При этом используются аналоги валов и роторов электромоторов. Конечно, сходство наномашин и электрических моторов всего лишь иллюстрация. Биохимические машины не используют электрический ток для генерации магнитного поля, а для того, чтобы крутить вал, изменяют форму молекул с помощью биохимических процессов, таких как разложение АТФ [2.56].

На создание новых материалов начали оказывать влияние генная инженерия и компьютерное моделирование. Используя специальные устройства для сборки объектов размером с бактерию, нанотехнология позволит осуществлять точный контроль и быстрое манипулирование молекулярными структурами. Быстрый фермент может обработать почти миллион молекул за одну секунду, даже без транспортеров и механизмов с механическим приводом забрасывая новую молекулу на место сразу же, как только его освобождает старая молекула. Дрекслер предположил, что манипулятор сборщика должен быть в пятьдесят миллионов раз короче, чем рука человека и, соответственно, должен быть способным двигаться туда-сюда примерно в пятьдесят миллионов раз быстрее. Согласно предвидению Фейнмана, такие машины должны захватывать отдельные атомы, используя выборочно липкие манипуляторы, затем собирать эти атомы вместе, как блоки в детском конструкторе Lego, до тех пор пока имеет место химическое связывание.

Используя нанотехнологию, с помощью компьютерного моделирования можно ожидать создания универсальных химических синтезаторов, действующих как универсальный компьютер. Желаемые молекулы будут моделироваться на мониторе компьютера, а соответствующий сборщик обеспечит массовое производство желаемых веществ. Возможно, что в один прекрасный день специально разработанные наноустройства размером с бактерию будут запрограммированы на разрушение холестериновых бляшек в артериях, или раковых клеток, или на восстановление поврежденных в результате старения клеток. Они могут быть внедрены в тело, имея инструкцию саморазрушиться или интегрироваться в клетки тела. Наконец, все еще кажется научной фантастикой, что распределенные по всему мозгу крохотные наноустройства позволят копировать мысленные образы и загрузку памяти, так что копию личности человека и его воспоминания можно будет разместить в хранилище или даже заставить работать как форму естественно созданного искусственного интеллекта.

Наноструктуры — это сложные системы, очевидно, относящиеся к области на грани между физикой твердого тела, супрамолекулярной химией и молекулярной биологией. От-

сюда следует, что исследование наноструктур может привести к догадкам о возникновении жизни и о производстве новых материалов. Однако конструированием наноструктур нельзя руководить традиционным способом, пригодным для конструирования механизмов. Не существует сделанных руками человека инструментов или машин для сборки наноструктур из стандартных блоков, похожих на элементы часов, мотора или компьютерного чипа. Следовательно, мы должны понять принципы самоорганизации, которые используются наноструктурами в природе. Затем нужно только систематизировать соответствующие ограничения, подчиняясь которым атомные элементы наноструктур связывают себя в процессе спонтанного самопостроения. Элементы подгоняют свои положения так, чтобы достичь термодинамического минимума без всяких манипуляций со стороны человека-инженера.

Исторически идея супрамолекулярных взаимодействий восходит к знаменитой метафоре Эмиля Фишера (1894), описавшего селективное взаимодействие молекул как принцип замка и ключа. В наши дни супрамолекулярная химия далеко ушла от своей исходной точки. Молекулярные самосборочные машины объединяют свойства ковалентного и нековалентного синтеза для создания больших и структурно хорошо оформленных упорядоченных структур из атомов. Интенсивности индивидуальных вандерваальсовых взаимодействий и водородных связей малы, по сравнению с типичными ковалентными связями и сравнимы с тепловыми энергиями. Поэтому, чтобы достичь стабильности молекул в самособранных совокупностях, нужно много таких слабых нековалентных взаимодействий. В биологии имеется много сложных систем, образованных из наноструктур путем самосборки, например белки и вирусы. В живых системах для производства больших структур суммируются многие слабые взаимодействия между химическими составными частями. Возникает вопрос, как построить структуры с размерами и сложностью биологических структур, не используя биологических катализаторов или информационных механизмов, закодированных в генах?

Многие небиологические системы также демонстрируют самоорганизующееся поведение и дают примеры полезных взаимодействий. Так, молекулярные кристаллы являются самоорганизующимися структурами. Жидкие кристаллы — самоорганизующиеся фазы, промежуточные по порядку между кристаллами и липидами. Мицеллы, эмульсии и липиды демонстрируют большое разнообразие самоорганизующегося поведения. Примером может служить генерация каскадных полимеров, приводящая к молекулярным бифуркационным суперструктурам фрактального типа [2.57]. Их синтез основан на архитектурной схеме деревьев. Поэтому такие супрамолекулы называют дендримерами (от греческого слова *дендрон* — дерево — и слова *полимер*). Генерация дендримеров удовлетворяет двум основным правилам добавления мономеров. Расходящаяся конструкция начинается в сердцевине и строится наружу путем увеличения числа повторяющихся бифуркаций (ветвлений). Сходящаяся конструкция начинается на периферии и строится вовнутрь с помощью постоянного числа преобразований. Расходящаяся конструкция переносит центры химической реакции от центра к периферии, генерируя вокруг центра сеть бифур-

кационных ветвей. Бифуркации экспоненциально нарастают до критического состояния максимального размера. Они приводят к молекулярным структурам типа молекулярных губок, которые могут содержать молекулы меньшего размера, способные затем рассеиваться контролируемым образом в целях медицинских приложений.

Примерами супрамолекул являются фуллерены, образующие огромные, полые внутри, шары из углерода [2.58]. Стабильность этих сложных кластеров поддерживается их высокой геометрической симметрией. Фуллерены получили свое название от конструкций крыш залов, имеющих вид сфер, созданных американским архитектором Ричардом Бакминстером Фуллером (1895–1983). Кластер C^{60} из 60 атомов углерода обладает высокой симметрией, подобной той, которой обладает футбольный мяч.

Полые супрамолекулы можно упорядочить, используя химические шаблоны и матрицы, и получить сложные молекулярные структуры. Путем самосборки было получено несколько гигантских кластеров, сравнимых по величине с небольшими белками. На рис. 2.31 показана составленная из шариков и палочек модель самого большого дискретного кластера (700 тяжелых атомов) из всех, до сих пор выявленных с помощью рентгеноструктурного анализа. Этот кластер, содержащий 154 атома молибдена, 532 атома кислорода и 14 атомов азота, имеет относительную молекулярную массу порядка 24 000. Ахим Мюл-

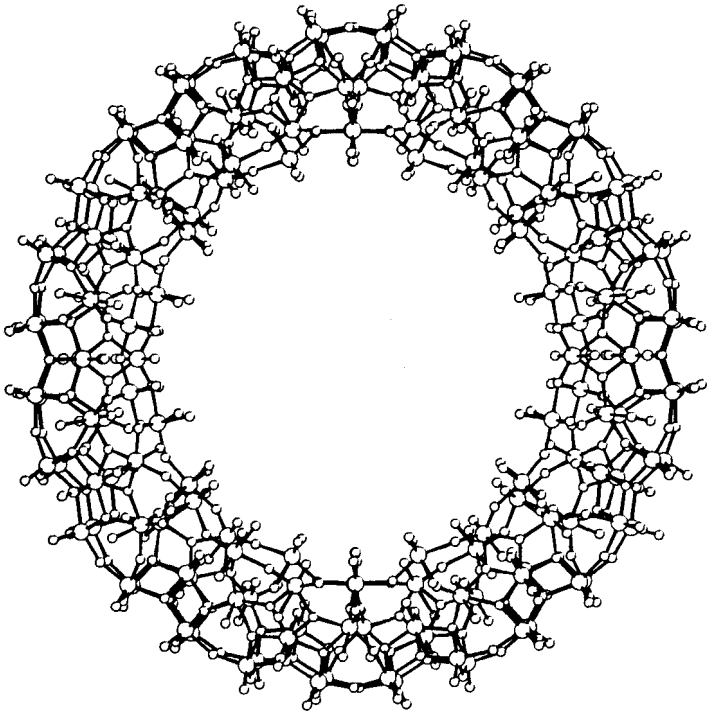


Рис. 2.31. Гигантский супрамолекулярный кластер («большое колесо»), представленный с помощью шариков и палочек, — пример сложной почти равновесной системы [2.59]

лер с сотрудниками синтезировал «большое колесо», обладающее высокой симметрией. Гигантские кластеры могут обладать новыми необычными структурными и электронными свойствами. У них есть типичные для специальных твердотельных структур плоскости разной намагниченности, играющие важную роль в материаловедении. Примечательным структурным свойством является наличие внутри гигантского кластера полости нанометрового размера. Использование в этом случае шаблонов и подбор подходящих молекулярных структур напоминает принцип замка и ключа Фишера.

Молекулярные полости можно использовать как контейнеры для других химических веществ и даже для медикаментов, которые нужно транспортировать внутрь организма человека. Во многих высших организмах встречается ферритин – сохраняющий железо белок. Это необычная система хозяин – гость, состоящая из органического хозяина (апротеин) и меняющегося гостя (железное ядро). В зависимости от внешних потребностей, железо может либо удаляться из этой системы, либо включаться в нее. Часто обнаруживается, что сложные химические соединения типа полиоксометалатов основаны на правильных выпуклых многогранниках, таких как платоновские тела. Однако коллективные электронные и/или магнитные свойства этих соединений не выводятся из известных свойств таких строительных блоков. Согласно популярному высказыванию «от молекул к веществам», химия супрамолекул применяет «чертежи» консервативной самоорганизации для построения сложных материалов нанометровых размеров, обладающих новыми каталитическими, электронными, электрохимическими, оптическими, магнитными и фотохимическими свойствами. Материалы с большим числом таких свойств необычайно интересны.

Исследование наномира и приложения в нанотехнологии зависят от улучшения качества инструментов для наблюдения и измерения. Дальнейшим развитием сканирующих туннельных микроскопов стали сканирующие силовые микроскопы, которые можно использовать, как авторучку для «записи» наноразмерных молекулярных структур. В качестве «наночернил» используется тонкий слой тиомолекул [7]. В крохотной капле воды тиомолекулы организуются в монослой. Нанокристаллы из нескольких сотен атомов могут организоваться вместе с ионами кадмия, селена и органическими молекулами в шаровидную структуру (рис. 2.32). В ультрафиолетовом свете эти структуры флуоресцируют определенным цветом. Следовательно, они могут быть использованы как маркеры («квантовые точки») молекул, клеток и веществ, например, в медицине. Сложные системы углеродных молекул, благодаря определенным катализаторам и шаблонам, могут самоорганизоваться в тонкие трубки диаметром 1 нм. Симметричный порядок связывания этих структур приводит к их высокой жесткости и прочности. Нанотрубки из углерода можно использовать в качестве проводников для миниатюрных чипов, размеры которых выходят за пределы возможностей кремниевых технологий.

Супрамолекулярные транзисторы являются примером, который может стимулировать новые революционные

[7] Тиолы или меркаптаны – органические вещества, сернистые аналоги спиртов. – *Прим. ред.*

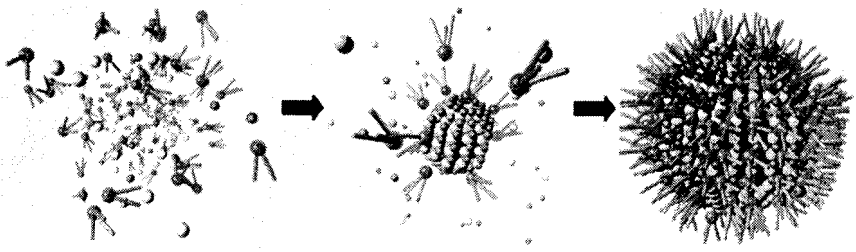


Рис. 2.32. Самоорганизующиеся нанокристаллы («квантовые точки») [2.60]

шаги в развитии химических компьютеров. Действительно, существует стремление к использованию наноструктур в электронных системах, что может привести к созданию маленьких быстрых устройств и хранилищ информации высокой плотности. Но можно представить и неэлектронные применения наноструктур. Их можно использовать в качестве компонент в микродатчиках или как катализаторы и устройства для распознавания образов, по аналогии с ферментами и рецепторами в живых системах. В природной эволюции очень большие сложные молекулярные системы также создаются за счет скачкообразных, направляемых генами, процессов. Консервативные процессы самоорганизации в наномолекулярной химии — это реакции, не контролируемые генами. Только искусная комбинация консервативной и неконсервативной самоорганизации может инициировать добиологическую эволюцию, до того как возникнут гены. Но даже в процессе эволюции сложных организмов должна происходить консервативная самоорганизация. Открытые («диссипативные») физические и химические системы теряют свою структуру, если приостанавливается или изменяется подача энергии и вещества (например, лазер, реакция Белоусова—Жаботинского). Организменные системы (такие как клетки) способны в основном сохранять свою структуру, по крайней мере достаточно долгое время. С другой стороны, чтобы сохранять свою структуру более или менее далеко от теплового равновесия в течение определенного промежутка времени, им нужны энергия и вещество. В процессе технической эволюции человечества были еще раз установлены принципы консервативной и диссипативной самоорганизации, открывшие новые пути для технических приложений.

Основанный на теории сложных систем подход позволяет инженерам наделять материалы свойствами, все более и более близкими к свойствам живых организмов. Саморегуляция и самоадаптация к изменениям окружающей среды — хорошо известные возможности живых систем. Их можно рассматривать как особые формы самоорганизующихся открытых систем в меняющейся окружающей среде. Аналогично, инженеры стремятся создать сложные материалы, способные ощущать свое собственное состояние, состояние своего окружения и реагировать на них. Поразительные примеры — материалы для мостов, которые способны определять и противодействовать коррозии, прежде чем прогнутся опоры, строения, которые скрепляют сами себя, противодействуя сейсмическим волнам, или обшив-

ка самолетов, способная спонтанно противостоять опасной усталости материала.

Актуаторы — материалы, способные изменять свои свойства в соответствии с изменяющимися состояниями системы [2.61]. Примерами являются пьезоэлектрические керамики и полимеры, действующие либо как датчики давления, либо как механические силовые приводы. Электрическая полярность их кристаллических или молекулярных структур позволяет трансформировать приложенные к ним механические силы в электрический ток или, наоборот, превращать электрические импульсы в механические колебания. Чтобы получить очень высокую чувствительность (например, для расшифровки брайлевского шрифта), пьезоэлектрические полимеры можно вмонтировать в оболочку искусственной руки.

Другими примерами веществ, которые можно использовать в качестве актуаторов, являются сплавы с так называемой памятью формы. Ниже определенного управляемого значения температуры перехода проволока с памятью формы примет любую форму, в которую ее согнут. Если проволока нагрета выше точки перехода, она возвращается к исходной форме. Инженеры предлагают включать металл с памятью формы в механическую систему в низкотемпературной фазе. При любом нагревании на систему начинает действовать сила. Порождающий силу переход происходит тогда, когда атомы в кристаллических гранулах сплава перебрасываются между разными геометрическими расположениями. Возможные приложения таких управляемых структур — стойкие к повреждениям мосты или крылья самолетов.

Существуют даже актуаторные вещества, способные обратимым образом переносить свои механические свойства от жидкого к твердому состоянию. Они состоят из мелких поляризуемых частиц керамики или полимера, взвешенных в жидкости, подобной силиконовому маслу. Под действием сильных электрических полей такие жидкости самоорганизуются, образуя нити и сети, укрепляющие вещество и превращающие его в гелеподобное твердое тело. При снятии электрического поля организованная структура разрушается и вещество снова превращается в жидкость. Из других приложений стоит упомянуть оптические волокна, действующие как вещества-датчики. На свойства этих волокон толщиной с человеческий волос оказывают влияние изменения температуры, давления или других физических или химических условий внутри вещества. Эти волокна можно рассматривать как «стеклянные нервы», подающие оптические сигналы о внутреннем «здоровье» вещества.

Иногда современные материаловеды называют созданные ими системы сообразительными или даже «умными» материалами. Цель исследований иногда описывается как «оживление неживого мира» [2.62]. С философской точки зрения, представляется, что такой девиз возвращает нас к традициям алхимии. Возможно, что кто-то из философов науки может критиковать словарь материаловедов как ненаучный анимизм. Но с точки зрения сложных систем, в нем есть твердое научное ядро. Свойства самоорганизации не обязательно соединяются с сознательным поведением на базе нервной системы. Они даже не обязательно зависят от биологических катализаторов или информационных устройств, закодированных в генах. Таким образом, между так называемыми неживой и живой природой нет разрыва. При эволюции

материи мы наблюдаем системы с более или менее высокими степенями организации. Ясно, что мы сделали лишь самые первые шаги в понимании таящегося в них потенциала.

При рассмотрении технологии будущего возникает вопрос о том, насколько реалистичны мечты о самовоспроизводящихся нанороботах? Ведь они будут эквивалентны новой паразитической форме жизни. Опасными примерами самовоспроизводящихся биологических систем являются патогенные бактерии и раковые клетки. Компьютерные вирусы с самодублирующимися битовыми строками являются первыми, по крайней мере виртуальными, примерами искусственных самоорганизующихся систем. Билл Джой, главный научный сотрудник фирмы «*Sun Microsystems*», уже высказал озабоченность по поводу социальных последствий распространения нанороботов [2.63]. Как утверждает Джой, при искусственной эволюции враждебные агенты могут эволюционировать, превращаясь в популяции материализованных биохимических наноразмерных тел. Представляя собой автономные эгоистичные существа, они могут атаковать основы человеческой жизни.

Ричард Смелли, получивший Нобелевскую премию по химии за открытие фуллеренов (1996), отвергает представление о вышедших из под контроля нанороботах [2.64]. Следуя девизу Фейнмана: «Там, внизу, еще много места», Смелли доказывает, что для последовательного манипулирования отдельными атомами с помощью наноразмерных атомных инструментов не требуется так уж много места. Он называет эти ограничения проблемой толстых и липких пальцев: «пальцы»-манипуляторы наноробота не только слишком большие («толстые»), но и слишком липкие, так как их атомы будут прилипать к тому атому, который нужно перенести. Образ пальцев у Смелли подчеркивает тот факт, что в нанометровой области нет никаких эквивалентов современной технологии. В живых системах эволюция создала примеры биохимических наномашин, и нет причин утверждать, что не может быть других машин, построенных на иных материальных основах. Но технологическая стратегия будет следовать не устаревшей механической идее захвата и переноса атомов с помощью наноразмерных пинцетов, а естественной идее *самоорганизации при соответствующих ограничениях*. Нам следует искать не сборщиков, а самосборщиков. С точки зрения теории вычислительных систем, не является странной идея универсального изготовителя структур любого типа[8)], включая самоизготовление. Универсальная машина Тьюринга, в некотором приближенном виде (см. разд. 5.2), уже реализована в наших домашних компьютерах, выполняющих все виды программ. Почему же это неосуществимо в наномасштабах?

2.6. Сбор сложных данных и анализ временны́х рядов

По-видимому, понимание сложных систем и нелинейной динамики в природе требует создания соответствующих моделей эволюции материи. Но как нам убедиться в том, что наши модели правильны? В нелинейной динамике используют разные

[8)] Эта идея стала широко обсуждаться после выхода книги К. Э. Дрекелера «Машины созидания». В этой книге рассмотрены разные аспекты создания наноассемблеров, репликаторов, универсальных изготовителей наноструктур. — *Прим. ред.*

типы уравнений, которые порождают разные типы поведения — неподвижные (особые) точки, предельные циклы и хаос.

В приложениях эти типы поведения связаны с природными системами, возникающими на разных пространственных масштабах в микро-, нано- и макромире. Чтобы написать соответствующее динамическое уравнение, мы используем наше понимание конкретных механизмов. Например, понимание Лоренцом динамики погоды привело к его знаменитым нелинейным уравнениям, которые затем были применены к биологическим и экономическим системам людьми, знакомыми с соответствующими областями знаний.

С методологической точки зрения, это построение моделей так называемым методом «сверху-вниз». Мы исходим из предполагаемой математической модели природной системы и выводим поведение этой системы путем решения соответствующих динамических уравнений при определенных начальных и граничных условиях. Решения можно представить геометрически как траектории в фазовом пространстве динамической системы и расклассифицировать по разным типам аттракторов. Они предсказывают типы поведения, которые мы, вероятно, будем наблюдать в конкретной области исследований. Если выполняются определенные критерии, то из заданных уравнений можно вывести хаотическую динамику.

Однако на практике мы часто вынуждены использовать обратный метод — «снизу-вверх». Физики, химики, биологи или медики начинают со сбора данных в неизведанной области исследований. Они получают конечные ряды измеренных данных, соответствующих зависящим от времени событиям, произошедшим в динамической системе. Исходя из этих данных, они должны реконструировать поведение системы, с тем чтобы угадать вид ее динамического уравнения. Поэтому подход «снизу-вверх» называется *анализом временных рядов* [2.65]. Во многих случаях мы что-то знаем о той системе, от которой поступили данные. Анализ временных рядов в таком случае направлен на построение черного ящика, воспринимающего измеренные данные на входе и дающего описывающую эти данные математическую модель или предсказывающую систему на выходе. На практике реалистичная стратегия исследований представляет собой комбинацию подхода «сверху-вниз» с построением модели и подхода «снизу-вверх» с анализом временных рядов.

Подход «снизу-вверх» начинается с анализа данных как результатов измерений, а не как идеализированных переменных модели. Измерения дают приближенные значения переменных динамической модели. Их погрешность называется ошибкой измерений, причиной которой могут быть разного рода шумы. Измерительный шум относится к флуктуациям данных, которые отличаются от хорошо определенного усредненного по времени поведения и возникают случайно. В то время как измерительный шум вызван внутренним поведением реальной системы, внешнее воздействие также порождает определенный тип шума. Многие переменные, связанные с внешним воздействием, необходимо исключить, чтобы уменьшить сложность построения модели. Внешнее воздействие на систему рассматривается как случайный шум, влияющий на измеренные переменные модели.

В классической теории измерений ошибка измерений анализируется статистическими методами, вычис-

ляются коэффициент корреляции и функция автокорреляции. Но эти стандартные процедуры не могут различить данные от линейных и нелинейных моделей. В нелинейном анализе данных измеренные данные используются на первом шаге для реконструкции динамики системы в реконструированном фазовом пространстве. Простой пример – логистическое отображение, рассматривавшееся нами в разд. 2.4. Нелинейное отображение $x_{t+1} = f(x_t)$ $(t = 1, 2, 3, \ldots)$ описывает связь между x_{t+1} и x_t. На рис. 2.24 показаны значения координат x_{t+1} как функций x_t. Если измерительный шум отсутствует, можно идентифицировать измеренные данные D_t с переменной x_t в момент времени t. Тогда неудивительно, что диаграмма разброса измеренных данных D_{t+1} в зависимости от D_t указывает на ту же взаимозависимость, что и модель[9)].

Если данные собраны от непрерывной по времени динамической системы, описываемой не отображениями, а дифференциальными уравнениями, то соответствующую фазовую плоскость следует реконструировать по измеренным данным непрерывной системы. Главная идея здесь состоит в том, что измеренные данные в реконструированном фазовом пространстве демонстрируют то же динамическое поведение, что и траектории в фазовом пространстве динамической модели. Рассмотрим, например, данные, порождаемые гармоническим осциллятором, который описывается дифференциальным уравнением второго порядка $d^2x/dt^2 = -bx$. Соответствующая фазовая плоскость задается переменными x и y, которые определяются двумя дифференциальными уравнениями первого порядка $dx/dt = y$ и $dx/dt = -bx$. Предположим, что временной ряд $D(t) = x(t)$ измерен без измерительного шума. Чтобы реконструировать фазовую плоскость по измеренным данным, вспомним, что состояние системы в каждый момент времени t представляется положением точки (x, y) в фазовой плоскости. Временной ряд измерений дает нам только одну координату $D = x$ в каждый момент. Но можно вычислить вторую координату $y = dD/dt$ из дифференциального уравнения первого порядка в фазовом пространстве. График dD/dt как функции D порождает непрерывную кривую. На реконструированной фазовой плоскости измеренных данных D_{t+1}, как функций D_t, траектория демонстрирует то же самое циклическое поведение, как и в непрерывной фазовой плоскости модели.

В общем случае динамика фазовой плоскости определяется парой связанных дифференциальных уравнений

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y) \quad \text{и} \quad \frac{dy}{dt} = g(x, y).$$

Иногда мы можем измерить только x. Но тогда можно вычислить dx/dt и получить значение функции $f(x, y)$, которая также содержит определенную информацию об y. Этой информации часто оказывается достаточно для реконструкции динамики траекторий в фазовой плоскости (x, y). Первая производная x по t вычисляется по хорошо известной формуле

$$\frac{dx(t)}{dt} = \lim_{h \to 0} \frac{[x(t+h) - x(t)]}{h}.$$

Временной ряд измерений

$$D(t) = x(t)$$

без шума состоит из измеренных данных $D_0, D_1, D_2, \ldots$ в дискретные моменты времени $t = 0, 1, 2, \ldots$. Производную x по t можно аппроксими-

[9)] Модель здесь задается функцией f, которая определяется по временно́му ряду. – *Прим. ред.*

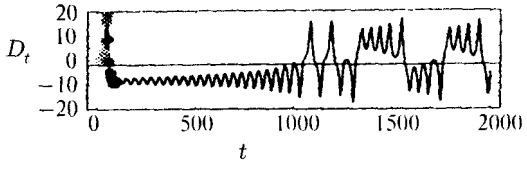
ровать разностями соответствующих измеренных данных

$$\frac{dD_t}{dt} = \frac{[D_{t+h} - D_t]}{h},$$

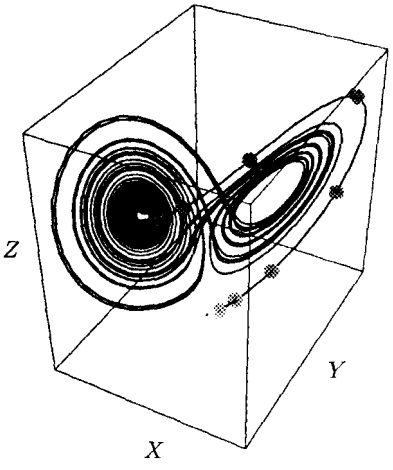
где $h = 1, 2, \ldots$.

Наименьшее пригодное значение h равно 1. Но иногда удобнее выбрать больший временной промежуток h. С помощью построения D_{t+h} в зависимости от D_t можно часто реконструировать динамику системы в фазовом пространстве, измеряя только D_t без непосредственного измерения переменной y модели. В этом случае динамика в реконструированной фазовой плоскости (D_t, D_{t+h}) аналогична исходной фазовой плоскости (x, y) динамической системы.

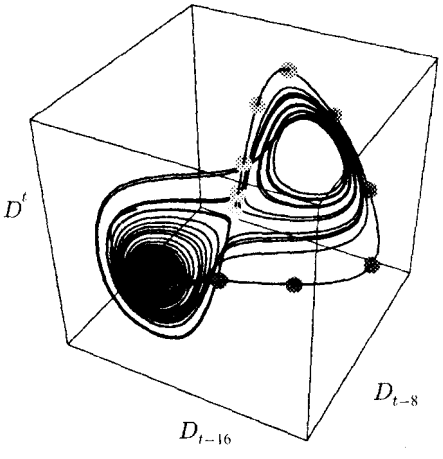
Нелинейные динамические системы в непрерывном времени, порождающие хаос, должны определяться по меньшей мере тремя дифференциальными уравнениями. Например, аттрактор Лоренца (рис. 2.21) порождается в фазовом пространстве с тремя координатами $X(t)$, $Y(t)$ и $Z(t)$, которые определяются тремя нелинейными дифференциальными уравнениями. На рис. 2.33 *а* показан временной ряд измеренных данных D_t для системы Лоренца. Если можно измерить *только одну переменную* $D(t) = x(t)$, то аттрактор Лоренца в фазовом пространстве (D_t, D_{t-h}, D_{t-2h}) (рис. 2.33 *в*) можно реконструировать



а)



б)



в)

Рис. 2.33. Измеренный временной ряд для системы Лоренца [2.67] (*а*); траектория в исходном фазовом пространстве (X, Y, Z) (*б*); реконструированная траектория в фазовом пространстве (D_t, D_{t-h}, D_{t-2h}) с временным промежутком h для аттрактора Лоренца [2.68] (*в*)

так, чтобы он имел очень большое сходство с исходным аттрактором Лоренца в исходном фазовом пространстве (X, Y, Z) (рис. 2.33 *б*).

В общем случае временной ряд можно вложить в p-мерное пространство с p-координатами

$$D_t = \left(D_t, D_{t-h}, D_{t-2h}, \ldots, D_{t-(p-1)h}\right)$$

и временным промежутком h. В соответствии с теоремой вложения Такенса [2.66], реконструированная динамика геометрически похожа на исходную как в дискретных, так и в непрерывных по времени системах [10]. Создаваемая вложением временно́го ряда последовательность точек называется *траекторией временно́го ряда*.

На практике вопросы о наличии хаотической динамики довольно трудны. Как можем мы установить, что временной ряд измеренных данных порожден не шумовой нерегулярностью, а сложными хаотическими аттракторами? Такой аттрактор определен в ограниченной области фазового пространства траекторией с апериодическим поведением и чувствительностью к начальных данным. Эти критерии — детерминизм, ограниченность, апериодичность и чувствительность — могут быть проверены разными методами анализа временны́х рядов. Система называется *детерминированной*, если будущие события причинно определены прошлыми. Например, отображение типа $x_{t+1} = f(x_t)$ детерминированно, если будущее значение x_{t+1} можно однозначно вычислить по прошлому значению x_t с помощью функции f.

Как можем мы решить, что измеренные данные прошлых событий D_t определяют будущие события D_{t+1}? Мы предполагаем, что измерения какой-то величины выполнены в момент времени T, и можно сделать предсказание о ее значении в момент времени $T + 1$. Мы снова используем описанную выше процедуру вложения временно́го ряда в p-мерное пространство с временны́м промежутком h. Вложенная точка в момент T, представляющая измерения прошлых событий, есть

$$D_T = \left(D_T, D_{T-h}, D_{T-2h}, \ldots, D_{T-(p-1)h}\right).$$

Мы просматриваем точки вложенного временно́го ряда в поисках ближайшей к D_T точки в момент времени c, которая обозначается D_c. Точка D_c представляет прошлые события по отношению к измерению D_{c+1}. Если D_T близко к D_c, то ожидается, что в случае детерминированной динамики измеренное значение D_{c+1} будет близко к D_{T+1}. Таким образом, предсказание D_{T+1} отождествляется с измеренным значением D_{c+1} [11]. Разность между предсказанием и значением D_{T+1} есть ошибка предсказания, указывающая на его качество. Более достоверный признак детерминизма использует среднее от многих ошибок предсказания.

Динамические величины ограничены, если они остаются в конечной области фазового пространства и с ростом времени не стремятся к бесконечности. В случае шума траектории могут быть хаотически разбросаны по всему фазовому пространству. Хаотический аттрактор всегда ограничен определенной областью фазового пространства. Но практически измеряемые данные, конечно, всегда находятся в конечном интервале значений, так как физическая Вселенная конечна. Таким образом, *ограниченность измеренных данных* связана с

[10] Еще более важно, чем внешнее сходство, совпадение многих количественных характеристик исходного и реконструированного хаотического аттрактора. — *Прим. ред.*

[11] Описанная процедура в отечественной литературе называется *методом аналога*. — *Прим. ред.*

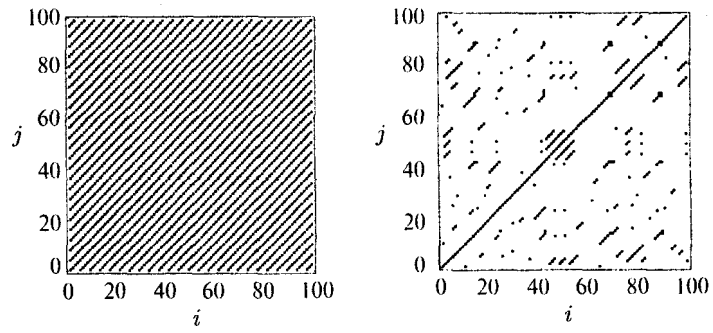


Рис. 2.34. Рекуррентные графики: а — с периодичностью для квадратичного отображения $x_{t+1} = 3{,}52x_t(1 - x_t)$ ($p = 2$, $r = 0{,}001$); б — с апериодичностью для хаотического отображения $x_{t+1} = 4x_t(1 - x_t)$ ($p = 2$, $r = 0{,}001$). На этом графике ставится точка P_{ij}, если $|D_i - D_j| < n$ [2.69]

понятием стационарности. Временной ряд *стационарен*, если среднее значение и стандартное отклонение одинаковы по всему ряду. *Апериодичность* означает, что состояния динамической системы никогда не возвращаются к своим прежним значениям. Но значения состояний могут возвращаться к значениям, более или менее близким к предыдущим. Следовательно, можно говорить о степени апериодичности. Как можно определить степень апериодичности в измеренных данных?

Мы снова вкладываем временной ряд измерений в p-мерное пространство с временны́м промежутком h. Каждая точка

$$D_t = \left(D_t, D_{t-h}, \ldots, D_{t-(p-1)h}\right)$$

представляет собой состояние динамической системы в момент времени t. Расстояние между двумя состояниями измеряется расстоянием между двумя точками в моменты времени i и j как $\delta_{ij} = |D_i - D_j|$ (рис. 2.34). Если временной ряд периодичен с периодом T, значения состояний повторяются после T значений для разных моментов времени (предполагается, что мы имеем дискретное отображение и T целое). В этом случае расстояние δ_{ij} между точками, представляющими времена i и j, равно нулю при $|i - j| = nT$, где $n = 0, 1, 2, \ldots$ [12]. Если расстояние между D_i и D_j меньше заданного расстояния r, то степени периодичности и апериодичности можно изучать на рекуррентных графиках точек (i, j).

Такие графики показывают, как возвращается или повторяет себя реконструированная траектория. Число точек на рекуррентном графике показывает, сколько раз траектория подошла на расстояние r к предыдущему значению. *Корреляционный интеграл* $C(r)$ определяет плотность точек (i, j) на рекуррентном графике, где измеренные временны́е ряды D_i и D_j ближе, чем r при $i \neq j$ (рис. 2.34). Корреляционный интеграл — эффективный инструмент анализа хаотических временны́х рядов [2.70]. Если расстояние r увеличивается, на рекуррентных графиках появляется больше точек с растущей плотностью $C(r)$. Характерный вид $C(r)$ — это пологая кривая для периодической системы

[12] В случае периодичности $\delta_{ij} = 0$, если $|i - j| = nT$.

с небольшим наклоном в случае хаотической системы и более сильным наклоном для случайной системы.

Существует важная связь между корреляционным интегралом и понятием фрактальной размерности (см. разд. 2.4). Рассмотрим точки, разбросанные в области на расстоянии не более r от точки отсчета в двумерном пространстве (например, круг радиусом r и площадью πr^2) или в трехмерном пространстве (например, шар радиусом r и объемом $\frac{4}{3}\pi r^3$). В общем случае, для точек, разбросанных внутри тела в ν-мерном пространстве, число точек, находящихся на расстоянии, меньшем чем r, от точки отсчета, пропорционально r^{ν}. Корреляционный интеграл был введен как мера плотности разбросанных точек на расстоянии, не превышающем r, от точки отсчета на рекуррентном графике. Таким образом, корреляционный интеграл для точек, разбросанных в n-мерном теле, пропорционален r^{ν}, т. е. $C(r) = qr^{\nu}$, где q — константа пропорциональности. Корреляционная размерность ν-мерного тела ν может быть получена взятием логарифма этого выражения:

$$\log C(r) = \nu \log r + \log q.$$

Чтобы найти корреляционную размерность ν, можно построить график $\log C(r)$ как функции $\log r$ и определить наклон получившейся линии. Эта же процедура может быть использована для нахождения фрактальной размерности изучаемого объекта.

При анализе временны́х рядов корреляционная размерность иногда используется для нахождения аттракторов. Хорошо известно, что хаотические аттракторы часто обладают масштабной инвариантностью — они выглядят одинаково в разных масштабах, являются фракталами. Если временной ряд порожден хаотической системой, траектория временно́го ряда, реконструированная из полученных при измерении данных путем вложения, имеет те же геометрические свойства, что и исходный аттрактор системы, до тех пор пока размерность вложения достаточно велика. Такенс обосновал метод нахождения соответствующей размерности вложения для реконструкции аттрактора. Если исходный аттрактор имеет размерность ν, то для реконструированного аттрактора достаточна размерность пространства вложения

$$p = 2\nu + 1.$$

Однако этот метод не определяет процедуры нахождения уравнений, описывающих хаотический аттрактор.

Другой способ охарактеризовать хаотические динамические системы состоит в измерении степени их чувствительности к изменению начальных данных. Рассмотрим две траектории, отвечающие двум практически совпадающим начальным данным. В случае хаотической динамики уже крохотная разница в начальных условиях может привести к тому, что через короткий промежуток времени две траектории в фазовом пространстве разойдутся экспоненциально быстро (рис. 2.35). В этом случае невозможно получить долгосрочный прогноз, так как начальные данные могут быть определены лишь с конечной степенью точности. Крохотные отклонения значений измеренных данных в десятичных знаках после запятой могут привести к совершенно разным прогнозам. По этой причине проваливаются попытки предсказать погоду в неустойчивой и хаотичной ситуации. В принципе, крылышко бабочки может стать причиной глобального изменения развития. Этот «эффект бабочки» можно измерить с помощью

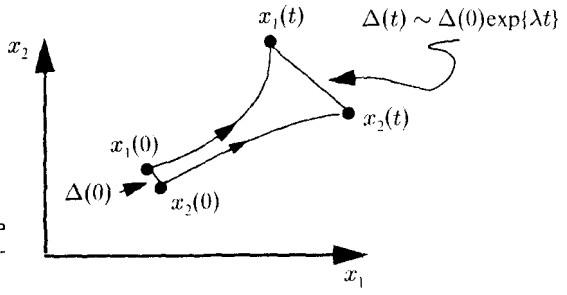


Рис. 2.35. Экспоненциальная зависимость от начальных условий, мерой которой является показатель Ляпунова Λ [2.71]

так называемого показателя Ляпунова. Пусть траектория $x(t)$ начинается в начальном состоянии $x(0)$. Если решение соответствующего дифференциального уравнения растет экспоненциально быстро, то приближенно траекторию можно записать в виде $|x(t)| \sim |x(0)|e^{\Lambda t}$. Показатель экспоненты Λ меньше нуля, если траектория стремится к аттракторам типа устойчивой особой точки или предельного цикла. Он больше нуля, если траектория экспоненциально расходится и чувствительна к очень малым возмущениям начального состояния.

Рассмотрим отображение

$$x_{t+1} = f(x_t)$$

с двумя близкими начальными положениями x_0 и y_0 в фазовом пространстве. Последовательными итерациями функции f получим

$$x_t = f(x_{t-1}) = f^t(x_0)\ ^{13)}$$

и

$$y_t = f(x_{t-1}) = f^t(y_0),$$

где $t = 0, 1, 2, \ldots$. Если положения x_t и y_t в результате итераций расходятся экспоненциально быстро, то расстояния между ними равны

$$|y_t - x_t| = |y_0 - x_0|e^{\Lambda t},$$

причем $\Lambda > 0$. Отсюда следует, что с ростом $t \to \infty$

$$\frac{1}{t}\ln\left(\frac{|y_t - x_t|}{|y_0 - x_0|}\right) \to \Lambda.$$

Если вся траектория находится внутри ограниченной области, экспоненциальное расхождение возможно только в случае, когда начальные положения очень близки друг к другу. В этом случае мы уменьшаем разность $|y_0 - x_0|$, прежде чем находить предел при $t \to \infty$. Тогда показатель Ляпунова траектории $x_t = f^t(x_0)$ можно определить как

$$\Lambda = \lim_{t\to\infty}\frac{1}{t}\lim_{|y_0-x_0|\to 0}\ln\frac{|y_t - x_t|}{|y_0 - x_0|} =$$

$$= \lim_{t\to\infty}\frac{1}{t}\lim_{|y_0-x_0|\to 0}\ln\frac{|f^t(y_0) - f^t(x_0)|}{|y_0 - x_0|} =$$

$$= \lim_{t\to\infty}\frac{1}{t}\ln|df^t(x_0)|,$$

где

$$df^t(x_0) = \lim_{|y_0-x_0|\to 0}\frac{|f^t(y_0) - f^t(x_0)|}{|y_0 - x_0|}.$$

Для непрерывных динамических систем, описываемых дифференциальными уравнениями, траектория есть вектор $\vec{x}(t)$, а показатель Ляпунова

$$\Lambda = \limsup_{t\to\infty}\frac{1}{t}\ln|d\vec{x}(t)|.$$

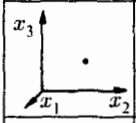
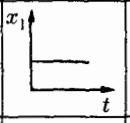
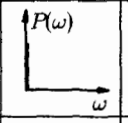
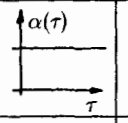
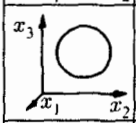
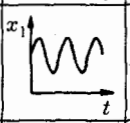
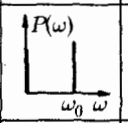
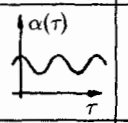
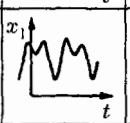
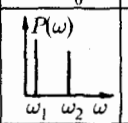
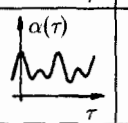
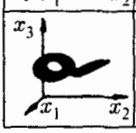
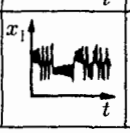
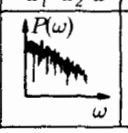
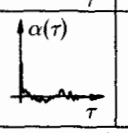
Показатель Ляпунова дает меру средней скорости сходимости и расходимости соседних траекторий динамической системы. Для n-мерной системы имеет место n показателей Ляпунова $\Lambda_1 \geqslant \Lambda_2 \geqslant \ldots \geqslant \Lambda_n$. Для нехаотических аттракторов можно различать асимптотически устойчивую особую точку с $\Lambda_i < 0$ $(i = 1, \ldots, n)$, асимптотически устойчивый предельный цикл с $\Lambda_1 = 0$ и $\Lambda_i < 0$ $(i = 2, \ldots, n)$ и асимптотически устойчивый 2-тор

---

[13] $x_t = f(x_{t-1}) = f(f(x_{t-2})) \equiv f^2(x_{t-2}) = f^3(x_{t-3}) = \ldots = f^t(x_0)$. — *Прим. ред.*

Таблица 2.1

Динамическая сложность аттракторов в трехмерных системах [2.72]

Фазовый портрет	Интегральная кривая	Спектр мощности	Автокорреляция	Показатели Ляпунова	(Фрактальная) размерность	Энтропия Колмогорова—Синая
				(−,−,−)	0	0
				(0,−,−)	1	0
				(0,0,−)	2	0
				(+,0,−)	$2 < h < 3$	$e_{KS} > 0$

с $\Lambda_1 = \Lambda_2 = 0$ и $\Lambda_i < 0$ $(i = 3, \ldots, n)$ и т. д. Хаотическая система должна иметь по крайней мере один положительный показатель Ляпунова. В трехмерном случае единственная возможность хаоса отвечает значениям

$$\Lambda_1 > 0, \quad \Lambda_2 = 0, \quad \Lambda_3 < 0,$$

где

$$\Lambda_3 < -\Lambda_1.$$

Динамические системы можно расклассифицировать по их аттракторам с увеличивающейся сложностью от неподвижных (особых) точек, периодических и квазипериодических аттракторов и до хаотического поведения. Тип аттрактора можно установить, рассматривая типичные структуры временны́х рядов, их спектр мощности, фазовые портреты, показатели Ляпунова, (фрактальную) размерность и меру их информационного потока (энтропия Колмогорова–Синая), о чем подробнее будет сказано в разд. 5.3. В табл. 2.1 дан обзор этих степеней динамической сложности. С этих позиций мы будем рассматривать многие другие объекты в книге.

Глава 3

Сложность и эволюция жизни

Как объяснить возникновение порядка в эволюции жизни по Дарвину? В истории философии и биологии жизнь объяснялась телеологически существованием непричинных («жизненных», витальных) сил, стремящихся к достижению определенных целей в природе. В знаменитой цитате Канта говорится, что может никогда не найтись «Ньютон, который сумел бы объяснить стебелек травы» (разд. 3.1). Больцману удалось показать, что живые организмы являются открытыми диссипативными системами, не нарушающими второе начало термодинамики: несмотря на растущие, согласно второму началу термодинамики, энтропию и беспорядок в замкнутых системах, для объяснения возникающего в жизни порядка не требуются максвелловские демоны. Тем не менее, согласно статистической интерпретации от Больцмана до Моно, возникновение жизни является лишь случайным событием, локальной космической флуктуацией на краю Вселенной (разд. 3.2).

В рамках теории сложных систем возникновение жизни не случайно, а необходимо и закономерно в духе диссипативной самоорганизации. Рост организмов и видов моделируется как возникновение макроскопических структур, вызванных нелинейными (микроскопическими) взаимодействиями молекул, клеток и пр. в фазовых переходах вдали от теплового равновесия (разд. 3.3). Даже экологические популяции можно рассматривать как сложные диссипативные системы растений и животных со взаимными нелинейными взаимодействиями и метаболизмом с окружающей их средой (разд. 3.4). Идея Спенсера о том, что жизнь определяется структурной эволюцией с возрастающей сложностью, похоже, представляется в математической форме сложными динамическими системами.

Так найден ли «Ньютон жизни»? Теория сложных динамических систем не объясняет, что такое жизнь, но предлагает модель того, как при определенных условиях могут возникнуть разные формы жизни. Таким образом, даже если нам удастся в конце концов смоделировать сложную динамику жизни, само существование жизни для нас, как и для наших предков, останется чудом.

3.1. От Фалеса до Дарвина

Прежде чем обсуждать сложные системы и биологическую эволюцию жизни, окинем взглядом прежние философские суждения о жизни [3.1]. Удивительно, что многие аспекты современной экологии напоминают ранние идеи, касающиеся самоорганизации. В интерпретации мистиков, жизнь понималась как циклическое движение от роста к распаду, от жизни к смерти. Животные и люди выживали, только приспосабливаясь к великим природным циклам, таким как

приливы и отливы, смена времен года, смена созвездий на небе, периоды плодородия и неплодородия и т. п. Сама природа представлялась большим организмом, причем считалось, что люди частично вовлечены в ее естественное развитие. Мифы первобытных религий и их ритуалы использовались для заклинания сил природы и для жизни в гармонии с естественным порядком.

Когда люди перестали воспринимать демонов и богов в качестве персонифицированных сил природы и стали задавать вопросы об основных принципах жизни, мифология уступила место натурфилософии. В VI в. до н. э. философ-досократик Фалес из Милета объявил воду фундаментальным источником жизни. По-видимому, ранние идеи об эволюции появились у Анаксимандра:

> Первые живые существа возникли во влажном месте. Они были покрыты чешуей с шипами. Затем они вышли на сушу, их чешуя лопнула, и вскоре они изменили свой образ жизни... [3.2]

В вопросе о происхождении человека взгляды Анаксимандра были удивительно современными. Наблюдая продолжительный период времени, в течение которого ребенок нуждается в заботе и защите, он заключил, что если бы людям всегда требовалось такое время для взросления, то они не смогли бы выжить. Следовательно, раньше они должны были быть другими. Эмпедокл объяснил жизненные процессы с помощью смешивания и преобразования знакомых нам элементов — воды, воздуха, огня и земли.

Для современников эти естественные объяснения жизни казались интуитивно убедительными, в то же время атомизм Демокрита, со сведéнием жизни к взаимодействию невидимых атомов, считался довольно абстрактным учением. Даже сознание и душа человека объяснялись микроскопическими взаимодействиями крохотных материальных элементов. Таким образом, Демокрит и его ученики подвергались атакам не только за свой материализм, но и за атеизм. Платон попробовал смоделировать первоэлементы материи и их комбинации с помощью геометрических фигур и конструкций.

С современной научной точки зрения, атомизм Демокрита и математические модели Платона являлись ранними редукционистскими программами для описания жизни. Эти философы пытались свести физиологические и биологические процессы к взаимодействиям физических элементов. Но сама идея объяснения изменчивых и развивающихся жизненных процессов на основе жестких и мертвых геометрических фигур или атомов вещества должна была казаться современникам совершенно неестественной, умозрительной и надуманной. Короче, «реальная» жизнь казалась безнадежно «сложной», а математика Евклида — слишком простой. Таким образом, математика Евклида была зарезервирована для «надлунного» мира звезд, но не применялась к «подлунному» миру земной жизни.

Именно здесь начинается аристотелевская философия жизни. Платон в духе пифагорейской традиции выводил свою концепцию из геометрии, Аристотель же формулировал свои представления о природных процессах, основываясь на том, как функционируют такие живые организмы, как растения и животные. Жизненные процессы и само течение жизни известны нам из повседневного опыта. Что же может быть более очевидным, чем сравнить и объяснить

остальной, неизвестный и странный, мир через известный? Согласно Аристотелю, задачей физики является объяснение принципов и роли сложности и изменений в природе. На современном языке — Аристотель отверг атомный редукционизм, а также математизацию науки о жизни как спекулятивные и нереалистичные идеи.

Чтобы неодушевленный камень начал двигаться, его нужно толкнуть извне. В противоположность этому, жизнь была определена свойством самодвижения. В таком, аристотелевском смысле жить означало «иметь душу», которая понималась как организующая сила (энтелехия) материи (витализм). На современном языке — самоорганизация жизни интерпретировалась Аристотелем как функционально управляемый процесс, стремящийся к определенным «аттракторам» целей (телеология). Например, дерево вырастает из семечка с целью достичь своей окончательной формы. Как сказали бы сейчас, изменение форм, характеризующих рост организма, напоминает (качественную) эволюцию параметра порядка, названного Аристотелем «потенцией» данного организма. Но, конечно, главная разница, по сравнению с современными представлениями о параметрах порядка, заключается в том, что Аристотель отрицательно относился к любой редукции макроскопических форм к атомным или микроскопическим взаимодействиям.

Примечательно, что Аристотель предложил непрерывную шкалу более или менее одушевленных состояний природы (*scala naturae*) и отвергал абсолютную разницу между «живым» и «мертвым». Он всегда искал промежуточные или связующие звенья между организмами разной сложности. Например, грек, современник Аристотеля, живущий на берегу Средиземного моря с его богатыми флорой и фауной, без труда мог наблюдать такие организмы, как водяные лилии, «относительно которых трудно сказать, являются ли они животными или растениями, так как они растут из почвы, как растения, и питаются рыбами, как животные» [3.3]. Исходя из идеи непрерывности, Аристотель предложил нечто вроде биогенетического закона: «В начале плод животного развивается, как растение; при последующем развитии можно говорить о его чувствительной и думающей душе» [3.4].

Аристотель был не только теоретиком, но и одним из первых естествоиспытателей — ботаников, зоологов и физиологов. Он создал систематику растений и животных в соответствии с разными их свойствами и попытался описать физиологические жизненные процессы. Главной парадигмой жизни для него была идея самоорганизующегося организма, отвергающая любой атомный, молекулярный или неорганический редукционизм. Философия жизни Аристотеля до сих пор отбрасывает тень на развитие биологии.

В период Римской империи под влиянием аристотелевской традиции оказалась даже медицина. Врач римского императора Марка Аврелия Гален учил, что органы нашего тела полностью приспособились к своим функциям. Следуя аристотелевской телеологии, он описывал, каким образом органы пищеварения для поддержания жизненных процессов выбирают «полезные» части еды и отделяют «бесполезные». В Средние века Альберт Великий объединил аристотелевскую философию жизни с христианством. Опираясь на телеологию Аристотеля, Альберт развил первоначальную экологию, утверждая, что люди должны жить в гармонии с при-

родной окружающей средой. Организмы и окружающая их среда связаны друг с другом, благодаря многочисленным обменам воздухом, пищей, выделениями и прочим, и находятся в естественном балансе («равновесии»), управляемом божественным провидением. Альберт считал, что даже здоровье человеческой души зависит от здоровой окружающей среды со здоровыми воздухом, климатом, растениями и животными. Душа и тело являются не отдельными сущностями, а органичным целым.

В эпоху Возрождения Галилей осознал, что решающим условием развития современной физики является установление связи с математикой, наблюдениями, опытом и техникой. Ньютон создал новую математическую и экспериментальную философию природы, названную им «*Математические начала натуральной философии*» (1687). Геометрия и механика стали новой парадигмой естественных наук. В истории науки этот период называется становлением механистической картины мира, который представлялся не чем иным, как огромными механическими часами. Математик и философ Рене Декарт и физик Христиан Гюйгенс учили, что каждая система в природе состоит из отдельных элементов, подобных зубчатым колесикам в часах. Очевидно, что механицизм Декарта противоречит аристотелевскому холизму [1].

Даже физиология жизненных процессов должна была объясняться механистически. Например, сердце рассматривалось как насос. В целом, Декарт полагал, что движения тела животного или человека можно вывести, исходя из механического устройства органов тела, а «их, с той же необходимостью, представить как механизм часов, определяющийся положением и формой гирек и колесиков» [3.5]. Анатомия человека, изученная в проводившихся со времен Возрождения вскрытиях, была приложением аналитического метода Декарта. Согласно Декарту, чтобы объяснить функционирование системы с помощью законов геометрии и механики, каждую систему нужно разделить на основные составные части.

Итальянский физик и физиолог Борелли (1608–1679) создал так называемую ятрофизику — раннюю версию биофизики. Он перенес с физики на биологию знаменитое высказывание Галилея и решительно заявил в своей книге «О движении животных» («*De motu animalium*»):

> Так как научное понимание всего этого основано на геометрии, будет правильным считать, что при создании живых организмов Бог использовал геометрию и что для понимания этих организмов нам тоже нужна геометрия; поэтому для тех, кто хочет прочесть и понять Божественный замысел животного мира, она является единственной подходящей наукой [3.6].

В то время как Декарт был убежден в бессмертии человеческой души, Ламетри, в соответствии с концепцией «человек–машина», свел человека к бездушному автомату (1747). Тела людей и животных отличались лишь уровнем сложности и организации. После создания физики телеология в духе аристотелевской традиции должна была быть исключена также из физиологии и медицины. В эпоху Просвещения механизм жизни понимался с точки зрения материалистической и атеистической философии.

[1] Холизм (от *англ.* whole — целый) — противоположное редукционизму мировоззрение, рассматривающее субъекта и окружающий его мир как единое целое, не сводимое к отдельным частям. — *Прим. пер.*

Довольно занятна следующая история, рассказанная Вольтером о Ламетри: когда тот внезапно заболел после слишком обильного обеда и умер через несколько дней от несварения желудка, богобоязненным современникам было сказано, что они должны быть благодарны за то, что материалист должен умирать от собственной ненасытности.

Тем не менее некоторые аристотелевские понятия продолжали обсуждаться в эпоху механицизма. Например, Лейбниц предположил существование иерархического порядка в природе с непрерывной шкалой одушевленности от простейших строительных блоков («монад») до сложных организмов. Он попытался объединить идеи Аристотеля с физической механикой, он стал одним из пионеров теории сложных динамических систем. Рассматривая статус человека в природе, Лейбниц заявлял:

> Итак, каждое органические тело живого существа есть род божественной машины или естественного автомата, бесконечно превосходящего все искусственные автоматы [3.7].

Под воздействием идей Лейбница зоолог Бонне (1720–1793) предложил кажущуюся довольно современной иерархию природы (*«Лестница устройства природы»*) в зависимости от меры сложности. В качестве наиболее важного свойства материи Бонне выделял «организацию». Самой идеальной, по определению, является та организация, которая реализует наибольшее число явлений с заданным числом разных частей [3.8].

В конце XVIII в. Иммануил Кант критиковал применение ньютоновской механики к биологии: «Невозможно найти Ньютона, который объяснит стебелек травы». Главной причиной критики Канта было то, что в XVIII в. понятие машины могло быть точно сформулировано только в рамках механики Ньютона. Поэтому в знаменитой «Критике способности суждения» Кант писал, что «организм не может быть машиной, поскольку машина обладает только движущей силой; но организм обладает организующей силой... которая не может быть объяснена одним механическим движением» [3.9]. Кант также критиковал аристотелевскую телеологию и предположение о «намерениях» и «целях» в природе, считая это метафорическим антропоморфизмом. Организм нужно описывать моделью «самоорганизующегося существа».

Как и Кант, Гёте отвергал материалистически-механистическое объяснение жизни, которое защищал, например, французский энциклопедист Гольбах в книге *«Система природы»*. Для Гёте механистическая модель природы «сера... как смерть... как дух без солнца» [3.10]. Он полагал, что жизнь развивается органично и гармонично, как метаморфоза растения или умственное развитие человека.

В начале XIX в., в конце жизни Гёте, на фоне кантовской критики механистического рационализма в Германии возникла романтическая философия природы. Это было возрождение органической парадигмы в противовес механицизму. Фридрих Шеллинг (1775–1854) разработал «науку жизни», предполагая, что главными свойствами живого являются организация и размножение [3.11]. Окен (1779–1851), врач и философ, описывал «планетарный процесс», в котором живые организмы объяснялись синтезом магнетизма, химизма и гальванизма. С современной точки зрения, «самоорганизация» и «самовоспроизводство» уходят корнями в по-

нятия романтической философии природы. Однако в те дни это были лишь умозрительные рассуждения или интуитивные прозрения, так как все еще отсутствовала экспериментальная и математическая база.

Мирная картина органичного и гармоничного развития была вскоре разрушена биологией. Теория эволюции Чарльза Дарвина не нуждалась для объяснения жизни в телеологических силах. «Выживание самых приспособленных» (Герберт Спенсер) зависит, главным образом, от отбора по отношению к определенным условиям окружающей среды (например, питание, климат) [3.12]. Дарвин был вдохновлен некоторыми идеями Ламарка (1744–1829), например, идеей наследования приобретенных признаков. Дарвиновская эволюция обеспечивается (генетическим) многообразием видов, возникающим благодаря мутациям, и естественным отбором, ведущими развитие в определенном направлении. Спенсер учил, что жизнь развивается в сторону большей сложности, контролируемой отбором. Многие современники рассматривали дарвинизм не только как естественнонаучную теорию. Казалось, что теория Дарвина описывает сценарий жизни, во многом аналогичный развитию общества в XIX в. «Отбор самых приспособленных» стал лозунгом политического течения «социального дарвинизма».

Во второй половине XIX в. Геккель обобщил теорию эволюции жизни от одноклеточных организмов к человеку. Но в те времена теорию эволюции нельзя было даже сравнивать с очень хорошо подтвержденными физическими и химическими теориями. Дарвин мог только заниматься сравнительным изучением морфологии. Он описывал изменчивость видов и естественный отбор, но не мог объяснить это математизированными и проверяемыми законами, как в физике. Закон наследственности Менделя (1865) был неизвестен ни Дарвину, ни многим его современникам. Тем не менее один из великих физиков XIX в. Людвиг Больцман, окидывая взглядом уходящий век, заявил:

> Если кто-то спросит меня, правда ли, что по моему глубокому убеждению наш век будет когда-нибудь назван веком железа, веком пара, или веком электричества, то я отвечу без промедления, что его назовут веком Дарвина [3.13].

3.2. Термодинамика Больцмана и эволюция жизни

В XIX в. главными темами обсуждения в естественных и общественных науках и философии стали «эволюция» и «история». В то время как биологические источники этих идей восходят к дарвиновской теории эволюции, физические примеры необратимых процессов впервые стали обсуждаться в термодинамике. Исходные принципы термодинамики были разработаны Карно (1824). Они были открыты при анализе механических сил, порождаемых паровыми машинами. Грубо говоря, первое начало термодинамики утверждает, что энергия не может ни создаваться, ни уничтожаться. Если не учитывать механическую работу, электрическую энергию и химические превращения, на которые постоянно расходуется энергия в природе, полная энергия внутри замкнутой системы остается неизменной. В XX в., в соответствии с эйнштейновской эквивалентностью массы и энергии (ср. разд. 2.2), первое начало было расширено до закона сохранения массы и энергии.

Фундаментальное значение второго начала для физической эволюции было отмечено Клаузиусом (1865), который ввел сам термин «энтропия» от греческого слова, обозначающего эволюцию или преобразование [3.14]. Математически изменение энтропии системы определяется как обратимое добавление теплоты к системе, деленное на ее абсолютную температуру. Согласно Илье Пригожину, принципиален тот факт, что всякая система имеет окружающую среду [3.15]. Поэтому, в более общем случае, вариация энтропии за какое-то время есть сумма скорости, с которой энтропия поступает в систему от окружающей среды, и скорости, с которой энтропия производится внутри системы. Второе начало термодинамики утверждает, что скорость, с которой энтропия производится внутри системы, больше или равна нулю. Для замкнутых и изолированных систем, в которых отсутствует поступление энтропии от окружающей среды (или передача ее наружу), мы приходим к классическому утверждению Клаузиуса, что при достижении термодинамического равновесия энтропия растет или остается постоянной. Иными словами, в природе не существует процессов, включая физические, химические, биологические или (как мы увидим ниже) информационные преобразования, происходящих спонтанно без определенных энергетических затрат, выраженных в терминах энтропии.

Энтропия — это макроскопическое свойство систем, такое как объем и размер. Поэтому сначала термодинамика была всего лишь феноменологической теорией, описывающей возможные распределения теплоты в макроскопических системах. Больцман был неудовлетворен такой позитивистской позицией и попытался развить статистически-механическое объяснение, сводящее такие макроскопические состояния системы, как, например, теплоту, к механическому движению микроскопических молекул. Вдохновленный таким различием микро- и макросостояний, которое стало решающим в теории эволюции, Больцман дал первую статистическую интерпретацию термодинамики. Необратимость в статистической термодинамике основана на этом различии.

В общем случае статистическая механика объясняет макросостояние системы — плотность, температуру и т. п. — с помощью микросостояний. В этом смысле говорят, что наблюдаемое макросостояние реализуется большим числом W микросостояний. Чтобы определить число W, рассматривается большое число независимых однотипных микросостояний, соответствующих конкретным конфигурациям атомов, молекул и т. п. Эти микросостояния развиваются согласно уравнениям движения с разными начальными фазовыми состояниями. Если макросостояние реализовано W микросостояниями подобного рода, то предполагается, что величина H больцмановской энтропии для соответствующего макросостояния пропорциональна логарифму W, т. е.

$$H = k \ln W,$$

где k — постоянная Больцмана. В непрерывном фазовом пространстве больцмановское выражение можно обобщить, введя интеграл по функции распределения скоростей. Для самого Больцмана величина H была мерой вероятности расположений молекул, соответствующих наблюдаемым макросостояниям системы.

Исторически редукционизм Больцмана столкнулся с яростными возра-

жениями со стороны физиков, математиков и философов. Физики и философы — сторонники позитивизма, например Эрнст Мах, — критиковали атомно-молекулярную гипотезу Больцмана, еще не получившую в то время эмпирического подтверждения. Но после того как атомы и молекулы были успешно открыты, эта критика стала представлять только исторический интерес.

Одним из самых важных возражений является *парадокс обратимости* Лошмидта. Так как законы механики инвариантны (симметричны) относительно обращения времени, то каждому процессу соответствует обращенный во времени процесс. Это находится в кажущемся противоречии с существованием необратимых процессов. Больцман ответил на это, что второе начало термодинамики в форме так называемой *H*-теоремы не может быть выведено только из (обратимых) механических законов, но требует дополнительного предположения о начальных условиях. Предполагается, что второе начало верно не с достоверностью, но с очень высокой вероятностью. Необратимые процессы всего лишь чаще встречаются, т. е. более вероятны, обратимые же процессы более редки и очень маловероятны. Таким образом, второе начало допускает локальные отклонения или флуктуации (например, броуновское движение) [3.17].

Другое возражение, принадлежащее Анри Пуанкаре и Эрнсту Цермело, утверждает, что каждое состояние механической системы с большим, но конечным числом степеней свободы через определенное время должно, по крайней мере приближенно, восстанавливаться [3.18]. Поэтому связанная с возрастанием энтропии стрела времени не может существовать. Больцман ответил на это, что с ростом числа степеней свободы времена возврата становятся невероятно большими. В космологии возможны две точки зрения в духе идей Больцмана: 1) Вселенная стартовала с крайне маловероятных начальных данных, или 2) так как Вселенная достаточно велика, то в каких-то местах могут быть отклонения от равнораспределения по степеням свободы, характерного для равновесия. Рисунок 3.1 иллюстрирует флуктуационную гипотезу Больцмана. Он предположил, что вся Вселенная находится в состоянии теплового равновесия, т. е. максимального беспорядка. Больцман считал, что оба направления времени полностью равноправны. Таким образом, кривая локальной энтропии одинаково возрастает в обе



Рис. 3.1. Кривая изменения энтропии в больцмановской вселенной, находящейся в тепловом равновесии с симметричными направлениями времени

стороны по времени, становясь плоской при достижении максимума энтропии [3.19].

Жизнь, как развивающаяся система упорядоченности, возможна только в областях с сильно меняющейся энтропией, т. е. на двух наклонных участках кривой энтропии на рис. 3.1. Две стрелки указывают локальные больцмановские миры, в которых возможна жизнь. Таким образом, с точки зрения Больцмана, не может быть объективно единственной стрелы времени, а есть лишь одно из двух возможных направлений возрастающей энтропии, которое люди субъективно воспринимают как стрелу времени, живя в одном из двух возможных локальных миров, отвечающих наклонным участкам на рис. 3.1. Прежде чем обратиться к детальной критике взглядов Больцмана, взглянем на его теорию жизни с точки зрения основ созданной им термодинамики теплового равновесия, которая до недавнего времени занимала важное место в науке.

Людвиг Больцман (1844–1906) был первым ученым, попытавшимся свести теорию биологической эволюции к термодинамике и химии XIX в. Для ученых конца этого века большую проблему составляло утверждение, что второе начало термодинамики, казалось, предсказывало конечный беспорядок, смерть и распад природы, в то время как дарвиновская эволюция позволяла развиваться живым упорядоченным системам с возрастающей сложностью. Конечно, второе начало справедливо для замкнутых систем, а живые системы должны быть открытыми и непрерывно обмениваться энергией, веществом и информацией с окружающей средой. Тем не менее, каким образом становится возможным локальное возрастание сложности в море беспорядка и теплового равновесия?

Больцман предложил несколько объяснений, напоминающих современные биохимические концепции молекулярного автокатализа и метаболизма. Происхождение первых примитивных живых существ, вроде клеток, было сведено к отбору неживых молекулярных строительных блоков, который представлялся Больцману как процесс, напоминающий броуновское движение. Растения, как клеточные агрегаты, — это сложные упорядоченные системы. Таким образом, в духе второго начала термодинамики, это невероятные структуры, которые с помощью солнечного света должны вести борьбу против спонтанной тенденции к возрастанию энтропии в своих стеблях. Так как температура Солнца очень высока, Земля получает от него энергию с относительно низкой энтропией, что может использоваться для компенсации спонтанного возрастания энтропии в растениях. Такой процесс реализуется в фотосинтезе, что было физически объяснено Больцманом в 1886 г.:

> Следовательно, основная борьба за жизнь — это не борьба за исходный материал... или за энергию... а борьба за энтропию, становящуюся доступной в результате перехода от горячего Солнца к холодной Земле [3.20].

Больцман распространил свою основанную на физике теорию эволюции на историю эволюции нервной системы и возникновение памяти и сознания. Он утверждал, что чувствительность примитивных организмов к внешним воздействиям привела к развитию специальных нервов и органов зрения, слуха, осязания, движения и пр.:

> Мозг рассматривается как аппарат или орган для создания моделей мира,

> Из-за большой полезности этих моделей для выживания человеческой расы, мозг человека, согласно теории Дарвина, развился с той же безупречностью, что и шея жирафа или клюв аиста [3.21].

Даже способность создания понятий и теорий объяснялась эволюцией. Больцман пытался объяснить человеческие категории пространства, времени и причинности как развившиеся в мозге инструменты для родового выживания самых приспособленных. Он без колебаний распространил биологическую эволюцию даже на социокультурное развитие и историю человечества. В 1894 г. венский врач С. Экснер написал в духе Больцмана труд на тему «Мораль как оружие в жизненной борьбе». В 1905 г. сам Больцман прочел лекцию на поразительную тему «Объяснение закона энтропии и любви принципами теории вероятностей». Очевидно, больцмановский дарвинизм дошел до своих пределов.

И тем не менее в начале XX в. все еще не удавалось объяснить жизнь на основании физики или химии. Классическая механика, основа естественных наук в XVII–XVIII вв., предполагала существование детерминированных и обратимых во времени законов природы, не дающих объяснения необратимым процессам жизни. Маятниковые часы без трения могут, в принципе, неограниченно долго совершать обратимые во времени движения как колеблющаяся механическая система. Однако люди рождаются, живут и умирают. Почему? Термодинамика XIX в. рассматривает необратимые процессы в замкнутых системах, переходящие к состоянию максимальной энтропии, или беспорядка. Но как можно объяснить развитие сложных живых систем? В духе статистической интерпретации Больцмана, возникновение порядка и биологической сложности может быть только крайне маловероятным событием, локальной космической флуктуацией «на краю Вселенной» (как позднее сказал Жак Моно), которая исчезнет без последствий для всей находящейся в тепловом равновесии Вселенной [3.22]. Следуя Моно, у нас остается только философский экзистенциальный выбор в духе Камю: с достоинством погибнуть в окончательно бессмысленной биологической и культурной эволюции. Трагическая смерть гениального Людвига Больцмана, совершившего самоубийство в 1906 г., представляется символом этой позиции. Но термодинамика Больцмана определенно не объясняет происхождения жизни. Больцман доказал лишь, что его статистическая интерпретация второго начала не противоречит дарвиновской эволюции.

После классической механики XVII–XVIII вв. и термодинамики XIX в., фундаментальной теорией физики стала квантовая механика. Несмотря на соотношение неопределенностей Гейзенберга, законы квантовой и классической механики характеризуются обратимостью во времени. В том, что касается редукционистской программы изучения сложности, большим успехом квантовой химии молекул было то, что она могла быть объяснена законами квантовой механики. В 1927 г. Гайтлер и Лондон успешно модифицировали для случая молекул уравнение Шрёдингера для атомных и субатомных систем. В химии нет никаких особых химических сил, кроме хорошо известных физических сил. Представляется, что после физики телеология исключена из химии.

Но сводится ли химия полностью к физике [3.23]? Определенно, только

в ограниченном смысле! Структурные модели молекулярных орбит можно ввести, только абстрагируясь от квантово-механических корреляций. Например, несмотря на то что электроны в атоме нельзя различить в смысле принципа Паули, химики используют их как квазиклассические объекты, движущиеся вокруг атомных ядер по хорошо определенным орбитам. Существуют хорошо известные химические процедуры абстрагирования (процедуры Борна–Оппенгеймера и Хартри–Фока) для введения электронных орбит в приближенных квазиклассических моделях неклассического квантового мира. Кроме того, несмотря на все фантастические успехи вычислительной квантовой химии, мы должны учитывать практические ограничения, накладываемые возможностями современных компьютеров, при решении уравнений Шрёдингера для сложных молекул. Такое сведéние химии к физике, несмотря на неполноту, казалось, доказывало, что ученые должны продолжать идти по пути редукционизма, чтобы свести к физике и химии элементарные частицы, атомы, молекулы, клетки и, наконец, организмы.

На самом деле в 1920-е и 1930-е годы спор между физическим редукционизмом и неовитализмом не мог быть разрешен. Например, физик Гайтлер, биолог Дриш и философы Бергсон и Уайтхед поддерживали явно неовиталистские воззрения в духе аристотелевской традиции [3.24]. Они утверждали, что конкретные биологические законы иногда могут нарушать законы физики и химии. От Аристотеля до Гёте и Шеллинга для демонстрации того, что физический редукционизм невозможен, упоминались телеологическая самоорганизация и спонтанность форм жизни от живых клеток до сознательно действующих людей. *Целостность* — главное свойство организма, которое нельзя свести к сумме его элементов. Некоторые физики, воодушевленные предложенной Нильсом Бором так называемой копенгагенской интерпретацией квантовой механики, пытались найти связующее звено между физикализмом и витализмом с помощью боровской концепции дополнительности. Сам Бор использовал дополнительность для обоснования таких взаимоисключающих понятий, как, например, корпускулярно-волновой дуализм. Таким образом, дополнительность предполагается для двух классов физико-химических и биологических законов, которые считаются несоизмеримыми. Следует помнить, что дополнительность есть не физический закон, а философская интерпретация квантовой механики, которую не поддерживал Эрвин Шрёдингер. Он знал, что в 1930-е и 1940-е гг. спор между физикализмом и витализмом не мог быть разрешен, а дополнительность была всего лишь понятием для описания сложившейся ситуации. В книге «Что такое жизнь?» Шрёдингер писал:

> Все известное нам о структуре живой материи заставляет ожидать, что деятельность живого организма нельзя свести к проявлению обычных физических законов. И не потому, что имеется какая-нибудь «новая сила» или что-либо еще, управляющее поведением отдельных атомов внутри живого организма, а потому, что его структура отличается от всего изученного нами до сих пор в физической лаборатории [3.25].

Шрёдингер приводит образ инженера, знакомого с паровой машиной и желающего эксплуатировать электромотор. Хотя оба мотора работают совсем по-разному, инженер не станет

подозревать, что электромотор приводится в движение святым духом. В традициях Лейбница, Шрёдингер собирается понять живой организм как «прекраснейший шедевр, когда-либо созданный по милости Божественной квантовой механики» [3.26].

Проблемой для Шрёдингера являлось то, что он, как и Моно, пытался описать возникновение порядка и жизни в рамках термодинамики Больцмана. Он был прав, критикуя телеологические силы и даже упорядочивающих демонов, существование которых было постулировано физиками в конце XIX в. Фантазия о демоне, который без внешнего влияния может обратить происходящий, согласно второму началу термодинамики, рост энтропии в замкнутой системе и, тем самым, заставить ее вести себя как вечный двигатель второго рода, восходит к Джеймсу Клерку Максвеллу. В 1879 г. Уильям Томсон (позднее лорд Кельвин) ввел понятие о «сортирующем демоне Максвелла», который обладал бы способностью спонтанно разделять находящиеся в статистическом равновесии с однородным распределением скоростей молекулы газа в замкнутом объеме на две части, содержащие более быстрые и более медленные молекулы [3.27].

Очевидно, «сортирующие демоны» представляют специальную гипотезу, которую невозможно объяснить в рамках физики XIX в. Термодинамика Больцмана, так же как механика Ньютона, недостаточна для моделирования возникновения сложного порядка и, следовательно, происхождения и роста живых систем. И первое, и второе начало термодинамики подчиняются важному условию, которое в общем случае не выполняется для всей природы. Эти законы предполагают, что обмен энергией происходит в замкнутой и изолированной системе. Но так как большинство областей Вселенной пронизывают потоки энергии и вещества, реальные системы в природе редко бывают замкнутыми. С учетом падающей на Землю солнечной энергии Земля не может рассматриваться как замкнутая и изолированная система.

Таким образом, первое и второе начала термодинамики не являются неправильными, но их применение эмпирически ограничено приближенно изолированными микроскопическими подсистемами, космическими или лабораторными системами, находящимися в специально приготовленных условиях. Ситуацию можно сравнить с классической механикой Ньютона. После создания специальной теории относительности Эйнштейна ньютоновская механика не стала ошибочной, но перестала быть универсальной физической схемой, ограничившись рассмотрением только движений со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света. Бóльшая часть природных явлений может быть смоделирована динамическими системами, не подчиняющимися общим условиям термодинамики Больцмана, поскольку в этих системах имеются потоки энергии и вещества.

Исторически фундаментальные достижения таких ученых, как Максвелл и Гиббс, относятся исключительно к ситуациям, соответствующим равновесию, или бесконечно близким к равновесию. Одной из пионерских работ по неравновесной термодинамике в начале XX в. была, например, работа Пьера Дюгема. Но она осталась незамеченной, до тех пор пока Онзагер (1931), а дальше Пригожин с учениками, Хакен с коллегами и дру-

гие не приступили к изучению сложных систем вдали от теплового равновесия. С исторической точки зрения, ситуацию можно сравнить с развитием теории хаоса и сложных гамильтоновых систем (ср. разд. 2.3). Хаотические явления были уже открыты и хорошо известны Пуанкаре, Максвеллу и другим ученым. Но математические проблемы, связанные с нелинейными сложными системами, отпугивали многих ученых от поиска соответствующих моделей.

3.3. Сложные системы и эволюция организмов

В открытых системах существуют не только внутренние источники производства энтропии, но и внешние источники, связанные с переходами массы и энергии во внешнюю среду или из нее. Такие объекты, названные Ильей Пригожиным «диссипативными структурами», поддерживают свою упорядоченность за счет диссипации и поглощения энергии. Мы уже познакомились с неживыми диссипативными системами, например жидкостями, лазерами и облаками, зависящими от поступающих извне потоков энергии, поддерживающих их структуру и организацию. Неравновесные системы обмениваются энергией и веществом с окружающей средой, поддерживая себя в течение некоторого времени в состоянии, далеком от теплового равновесия и с локально уменьшившейся энтропией. Малые неустойчивости и флуктуации приводят к необратимым бифуркациям и, таким образом, к возрастающей сложности возможного поведения.

Похоже, что математическая теория диссипативных структур с нелинейными уравнениями эволюции предлагает основу для моделирования аристотелевского «подлунного» мира растущей и умирающей природы. Поразительно, что идея Аристотеля о циклических изменениях в природе соответствует периодическим аттракторам или решениям соответствующих дифференциальных уравнений с предельными циклами. Циклическое поведение этих систем позволяет им не только поддерживать свою организацию, но и выявлять внутри себя иерархию сложных структур. Цикл живых систем в том виде, как он уже был описан в античности, становится автокаталитическим благодаря эволюционной обратной связи.

Главная идея была высказана уже Спенсером и Больцманом, когда они предположили, что добиологическая система может развиваться через целую последовательность переходов, приводящую к иерархии все более и более сложных состояний. Однако, в противоположность точке зрения Больцмана, эти переходы могут возникать только в нелинейных системах вдали от теплового равновесия. В области за критическим порогом режим стационарного состояния становится неустойчивым и система эволюционирует к новой конфигурации. Развиваясь через последовательные неустойчивые состояния, живая система должна обеспечить процедуру роста нелинейности и увеличения расстояния до равновесия. Иными словами, каждый переход должен позволять системе увеличивать производство энтропии. Эволюционная обратная связь Ильи Пригожина, Манфреда Эйгена и других означает, что изменение управляющего параметра системы за определенным пороговым значением приводит в результате флуктуаций к неустойчивости, которая влечет растущую диссипацию и, следовательно, снова влияет на пороговое значение.

Отсюда следует, что жизнь не возникает в результате одного экстраординарного маловероятного события и что эволюция жизни не противоречит законам физики. Как мы знаем, идея Больцмана и Моно о гигантской флуктуации, развертывающейся в течение времени биологической эволюции, произрастает из равновесной термодинамики. В то время как вероятность возникновения диссипативной структуры (например, такой упорядоченности, как ячейки Бенара) в рамках равновесной статистической механики очень мала, в далеких от равновесия условиях такая структура возникает с вероятностью единица. Поэтому Пригожин утверждает:

> Жизнь возникает отнюдь не в результате работы армии максвелловских демонов, а в результате следования законам физики, соответствующим конкретным кинетическим схемам, и очень далеко от условий равновесия [3.28].

При математическом описании нелинейных сложных систем уже было испробовано много моделей для описания молекулярного происхождения жизни. Сложность по молекулярной шкале характеризуется большим потенциальным числом состояний, которые могут быть заселены в заданных реалистичных временны́х и пространственных пределах.

Например, типичная небольшая белковая молекула содержит полипептидную цепочку, составленную примерно из 10^2 аминокислотных остатков. При наличии 20 видов природных аминокислот, возникает 20^{100} или 10^{130} альтернативных последовательностей такой длины. Молекула ДНК, содержащая полный геном единственной бактериальной клетки, образована в результате выбора одного или нескольких вариантов из более чем $10^{1000000}$ альтернативных последовательностей. Очевидно, что природа может реализовать лишь крохотную долю всех таких альтернатив. Математически последовательность, содержащая ν остатков λ видов допускает

$$C_\nu^k(\lambda-1)^k = \frac{\nu!}{k!(\nu-k)!}(\lambda-1)^k$$

альтернативных копий[2)], отличающихся перестановками в k позициях. На рис. 3.2 показан ген, кодирующий последовательность 129 аминокислот [3.29].

Некоторые микросостояния могут оказывать сильное влияние на макроскопическое поведение. Такие флуктуации могут усиливать и вызывать разрушение ранее устойчивых состояний. Нелинейность вступает в дело через процессы вдали от теплового равновесия.

Классические и единственно необходимые условия существования жизни требуют:

1) самовоспроизведения (чтобы сохранить вид, несмотря на постоянное уничтожение);
2) изменчивости и отбора (чтобы увеличить и улучшить возможность существования видов, выделенных по определенному критерию ценности);
3) метаболизма (чтобы компенсировать непрерывное производство энтропии) [3.30].

Манфред Эйген предложил реализацию этих критериев с помощью

[2)] Логика здесь такова: вначале выбирается k позиций из последовательности в ν символов, что дает число сочетаний C_ν^k, а затем каждый из символов в k позиций заменяется на один из $\lambda - 1$ символов, отличных от того остатка, который в этой позиции был раньше. – *Прим. ред.*

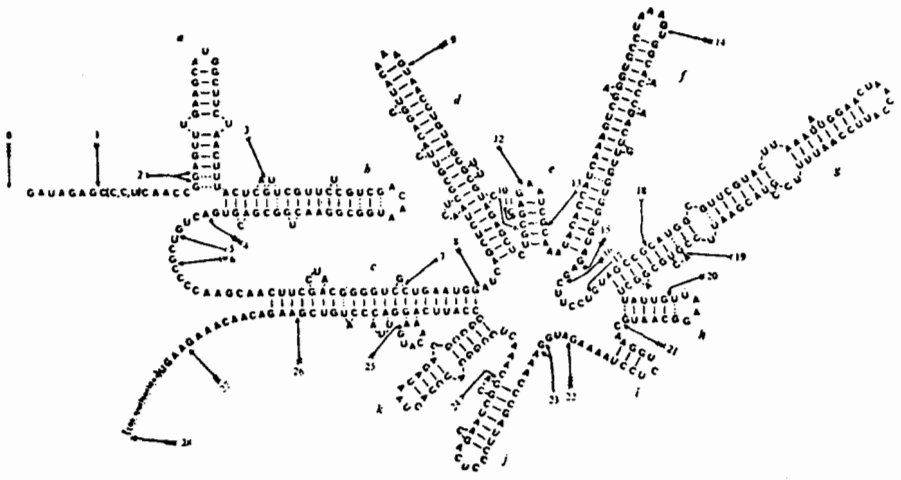


Рис. 3.2. Ген, кодирующий последовательность 129 аминокислот

математического процесса оптимизации. В такой модели образование ядра самовоспроизводящейся и продолжающей эволюцию системы возникает с конечной вероятностью среди любого распределения случайных последовательностей макромолекул типа белков и нуклеиновых кислот. Выбор исходной копии для самовоспроизведения случаен, но последующая эволюционная оптимизация до уровня исключительной эффективности происходит на основе физических принципов. В этой модели жизнь должна обнаруживаться везде, где имеются благоприятные физические и химические условия, хотя некоторые молекулярные структуры демонстрируют лишь малое сходство с известными нам системами.

Окончательным итогом будет единственная структура, например оптимизированная молекулярная последовательность. Дарвиновский принцип выживания самых приспособленных переводится на язык математики с помощью оптимизационного принципа для возможных микросостояний молекулярных последовательностей. Предполагается, что в простых случаях биомолекулы размножаются путем автокатализа. Например, два сорта биомолекул A и B из базовых веществ (БВ) размножаются путем автокатализа, но в дополнение размножение одного сорта сопровождается размножением другого сорта и обратно (рис. 3.3 *а*). В более сложных случаях с бóльшим числом сортов биомолекул предполагается, что эти биомолекулы размножаются путем циклического катализа («гиперциклы» Эйгена) (рис. 3.3 *б*). Этот механизм совместно с мутациями способен реализовать процесс эволюции.

Эйген предлагает следующую упрощенную модель эволюционной оптимизации [3.31]: устройство биологической клетки закодировано в последовательности четырех химических веществ А, Т, Г, Ц, из которых состоят гены. Каждый ген представляет функциональную единицу, оптимально приспособленную к конкретной цели окружающей его среды. В природе редко встречаются гены, длина которых составляет больше чем

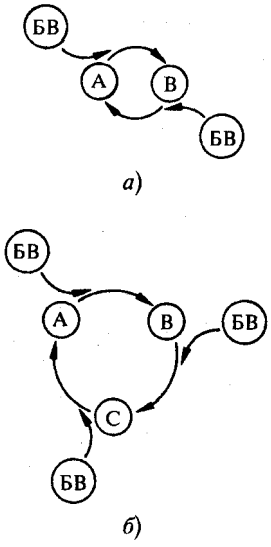


Рис. 3.3. Автокатализ с двумя сортами биомолекул (*а*); циклический катализ («гиперцикл») с большим числом сортов (*б*)

1000 последовательных позиций. Отсюда для 4 символов имеется 4^{1000} альтернативных генов («мутаций») длиной 1000 единиц. Другими словами, это составляет около 10^{600} возможностей. Чтобы получить представление об этом чудовищном по величине числе, нужно вспомнить, что полное количество материи во Вселенной соответствует 10^{74} атомов, а возраст Вселенной меньше 10^{18} с.

Таким образом, если вся материя Вселенной от самого ее начала («Большого взрыва») была использована для изменения и производства каждую секунду новых атомов длиной 1000 единиц, то до сего дня можно было бы протестировать только 10^{93} мутаций. Эйген заключает, что гены, представляющие оптимальные функциональные единицы, не могут быть образованы в результате случайных процессов, а должны развиться в процессе самооптимизации.

Математически процесс адаптации можно представить как последовательное замещение позиций, стремящееся к конечной («оптимальной») последовательности. Это типичная интерпретация подхода к решению задач в вычислительной математике. Чтобы успешно решить задачу, мы должны найти адекватное пространственное представление самооптимизационных стратегий. Так как речь идет об огромных числах, трехмерное пространство, очевидно, не подходит. Длина стратегий, т. е. расстояние от гена до его оптимального варианта, слишком велика. Тут легко сбиться с пути. Кроме того, последовательности с высокой степенью сходства нельзя адекватно представить соседними точками в трехмерном пространстве. Поэтому предлагается следующим образом изменить размерность пространства.

Последовательность из n позиций определяется как точка в n-мерном пространстве. Для двух символов 0 и 1 имеется 2^n альтернативных последовательностей, являющихся точками пространства. Каждая точка имеет n ближайших соседей, представляющих мутации, отличающиеся только одной позицией («мутация только по одному сайту»). Между двумя экстремальными точками, отвечающими либо всем 0, либо всем 1, имеется $n!$ возможных связей. На рис. 3.4 *а–г* приведено несколько примеров n-мерных пространств последовательностей для бинарного случая. Большое преимущество таких пространств состоит в очень коротких расстояниях и плотной сети возможных соединений. Например, наибольшее расстояние в 1000-мерном пространстве составляет всего 1000 единиц, а в 23-мерном пространстве с 10^{14} точками — всего 23 единицы.

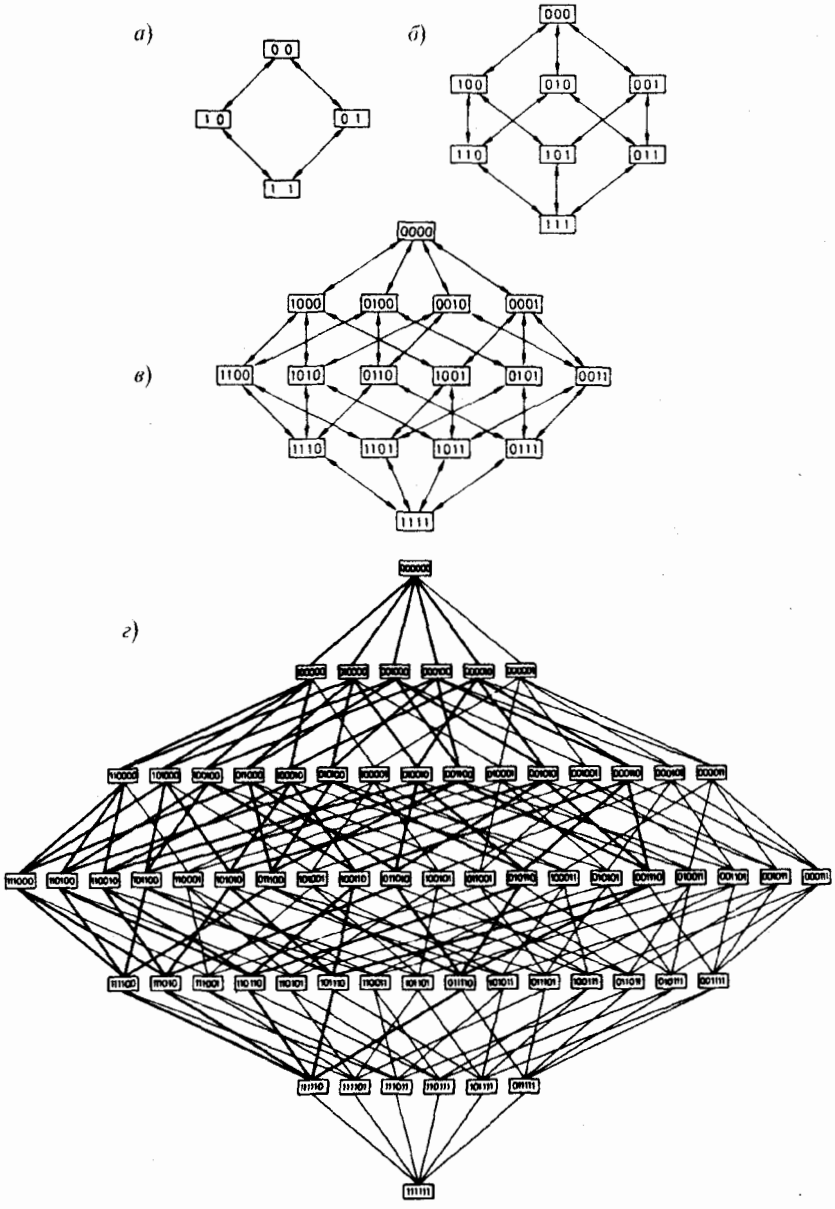


Рис. 3.4. N-мерное пространство последовательностей

Двадцатитрехмерного пространства достаточно для того, чтобы представить все точки на поверхности Земли в масштабе одного метра друг от друга. Оптимальные стратегии в этом пространстве можно задать как поиск высочайшей горы в какой-то области на поверхности Земли. С этой целью мы вводим оценочную функцию, которая сопоставляет каждую

точку с численным значением «высоты». Представим себе путешествие по Альпам. У вас нет определенной цели (например, желания взобраться на конкретную гору), вы хотите лишь грубой ориентировки, т. е. хотите подняться на гору, при этом не слишком часто спускаясь в долины. Математически — известен градиент вашего пути, который определяет ваше решение в отношении направления движения. В реальных Альпах вы имеете дело с одномерными гребнями и ущельями в горах, и ваши шансы достичь оптимальных точек ограничены. В 23-мерном пространстве вы можете двигаться в 23 направлениях и различать пути с разными градиентами, например, k в направлении «вверх» и $23 - k$ в направлении «вниз» ($k \leqslant 23$). Шансы достичь находящихся поблизости оптимальных точек очень велики.

В n-мерном пространстве последовательностей генов оценочная функция точек задается «селективной ценностью». Мутации не возникают совершенно иррегулярно или хаотично, а зависят от того, какие предшествующие мутации чаще всего возникают в распределении. Этот вопрос снова зависит от их селективной ценности относительно оптимального варианта в распределении. Селективные ценности распределены не беспорядочно, а в связанных областях. Например, высочайшая на Земле гора Эверест расположена не на равнине, а в окружении других гор в Гималаях.

Эйген предположил самооптимизирующийся высокоэффективный механизм для копирования и самовоспроизводства жизни. Фримен Дайсон предложил математическую модель, согласно которой примитивные живые системы возникают сначала без правильного механизма копирования и отбора, а выполняют только функции метаболизма в отношениях к окружающей их среде. Существенной характеристикой таких молекулярных систем является их гомеостаз, т. е. способность сохранять устойчивое и более или менее постоянное равновесие в изменяющейся окружающей среде. Согласно Дайсону, конфигурация механизма самокопирования возникает лишь на втором этапе. Необходимые для этого нуклеиновые кислоты объясняются Дайсоном как «неассимилированные» сопутствующие продукты ранних метаболических жизненных процессов, которые сначала предполагаются имеющими паразитный статус во всей системе, а затем, в конце концов, через симбиотические промежуточные состояния развиваются в полностью интегрированные функциональные механизмы размножения и эволюции.

Дуальная функция метаболизма и копирования в модели Дайсона имеет много общего со сложной системой пребиотической эволюции, предложенной Стюартом Кауффманом [3.33]. Он отвергает идею, что жизнь внезапно возникла из мира РНК[3]. Его похожая на гиперциклы система представляет собой сложную автокаталитическую сеть реакций, самоорганизующих себя так, что метаболизм становится возможным как макроскопическое состояние порядка системы. Метаболизм вытягивает вещества и энергию из окружающей среды для прироста и поддержания внутреннего порядка. Таким образом, это открытая диссипативная система.

Примерами сложных биологических систем являются генетические, нервные, иммунные системы и эко-

[3] «Мир РНК» — теория, предполагающая, что первичными «элементами жизни» были рибонуклеиновые кислоты (РНК). — *Прим. ред.*

системы. Все они состоят из сети сложно взаимодействующих элементов, выступающих в роли агентов. Нелинейную динамику этих сложных сетей можно смоделировать только при определенных упрощениях. Так, предполагается, что время дискретно, а поведение сети в какой-то момент времени зависит от состояния сети в предшествующий момент. Кроме того, элементы сети имеют ограниченное число различных состояний, например, ген может работать либо нет, или нейрон возбужден либо нет. Сеть представляет собой собрание связанных элементов, выступающих в роли агентов, и ее можно наглядно изобразить сетью узлов и сетью ребер, связывающих пары узлов. Каждый элемент характеризуется одним выходом и несколькими входами от других элементов цепи. Кроме того, для каждого элемента действует правило, определяющее, какой должен быть выход при заданных входах.

В случае *булевых элементов* имеются только два значения 1 («включено») и 0 («выключено»). Правило, определяющее булевы выходы по булевым входам, называется *булевой функцией*. Состояние булевой сети определяет, находится ли каждый элемент в состоянии «включено» или «выключено». Для сети из n элементов существует 2^n возможных состояний. Булевые сети элементов с единственным входом геометрически выглядят только как струны, простые петли и петли со струнами. Следовательно их динамика ограничена неподвижными точками, циклами и мультистабильностью. Если у элементов имеется более одного входа, то могут возникать множественные, связанные петли со значительно более сложными булевыми функциями. Примерами булевых функций в биохомии являются контролирующие механизмы, в которых активность белков и генов регулируется циркулирующими молекулами. С помощью сложной динамики булевых сетей можно понять регулирующие генные сети в живых организмах.

Чтобы управляться с большой сложностью генных сетей в живых организмах, С. Кауффман предложил изучать *случайные булевы сети*. Это обычные булевы сети, в которых выбор соединений и булевых функций осуществляется случайно в процессе создания сети. Для сети с n узлами и k входами в каждый узел, имеется $2^{n \cdot 2^{kn}}$ булевых функций[4]. Генератор случайных чисел отбирает входы в каждый узел. Кауффман запрограммировал компьютер для имитации динамики случайных булевых сетей. В своих экспериментах он обнаружил иерархию динамического поведения с неподвижными точками и циклами увеличивающейся сложности, которую можно наблюдать в реальных клетках.

В общем случае ожидается, что новые виды порождаются эволюционным процессом [3.34]. Вид можно рассматривать как популяцию биомолекул, бактерий, растений или животных. Эти популяции характеризуются генами, которые подвергаются мутациям, создающим новые свойства. Хотя мутации возникают случайно, на них могут влиять внешние факторы со стороны окружающей среды, например, изменение температу-

[4] Функция — отображение множества аргументов во множество значений функции. Каждый узел имеет k входов, поэтому общее число вариантов 2^k, у n узлов — 2^{kn}. Булевы функции отличаются, если они по-разному «реагируют» хотя бы на один вариант. Поэтому если бы речь шла об одном узле, то функций было бы $2^{2^{kn}}$, в случае n узлов оценка сверху $2^{n \cdot 2^{kn}}$. — *Прим. ред.*

ры или химические агенты. При определенном критическом мутационном давлении в популяции возникают новые типы особей. Скорость изменения этих особей описывается уравнением эволюции. Так как эти особи имеют новые свойства, их факторы роста и гибели различаются. Изменение (мутация) возможно только в том случае, когда в популяции и в окружающей среде возникают флуктуации. Следовательно, уравнение эволюции определяет скорость изменения вида как сумму флуктуаций и разность факторов роста и гибели.

Давление отбора можно смоделировать в том случае, когда разные подвиды соревнуются за одни и те же условия жизни (например, одинаковое снабжение пищей). Если скорость мутаций конкретного мутанта мала, выживает только тот, который обладает наивысшим коэффициентом усиления и наименьшим коэффициентом потерь, являясь, таким образом, наиболее приспособленным. Процедуру борьбы за существование можно описывать, исходя из принципа подчинения: нестабильные мутанты начинают определять динамику стабильных. Заслуживает внимания, что возникновение новых видов за счет мутаций и отбора можно сравнить с неравновесным фазовым переходом в лазере [3.35].

Живая клетка является открытой системой, сквозь которую проходит поток энергии. Как было показано еще Эрвином Шрёдингером, поток энергии создает условия, допускающие сильные отклонения от термодинамического равновесия. Согласно Пригожину и другим, это приводит к моделям диссипативной самоорганизации и образования структур, параметры которых задаются генетическими, а также эпигенетическими ограничениями (ограничениями, связанными с тем, читается ли, активен ли данный ген). Однако было бы ошибочно ожидать, что процесс самоорганизации в живых клетках представляет собой просто уменьшенную копию явлений образования структур в макроскопических реакционно-диффузионных системах. Законы физики, примененные в другом, типичном для внутриклеточных процессов масштабе, могут повлиять на участвующие механизмы и породить множество новых свойств.

Кроме того, это приводит к тому, что образование пространственных структур, основанное на подобных реакциях и диффузии, становится невозможным на очень малых пространственных масштабах. В живых клетках фундаментальную роль играет самоорганизация химических процессов во времени, проявляющаяся в генерации процессов с разными периодичностями и взаимодействии между ними [3.36]. Таким образом, с методологической точки зрения, недостаточно знать общую схему диссипативной самоорганизации. Мы должны экспериментально изучить ее клеточную реализацию при конкретных временны́х, пространственных и химических ограничениях.

Тем не менее связь между физико-химическими системами и биологическими структурами можно смоделировать диссипативными структурами, которые могут входить в живые системы. Важным примером является иммунная система, нарушение функционирования которой является причиной многих очень опасных заболеваний, таких как СПИД. Что касается кинетики антител-антигенов, то новые типы антител могут успешно создаваться, причем некоторые антитела действуют как антигены. Этот

процесс приводит к очень сложной динамике полной системы [3.37].

Как мы знаем, в число самых поразительных свойств диссипативных систем входят колебательные явления. На субклеточном уровне известен ряд колебательных ферментативных реакций. В живых клетках важную роль играет процесс гликолиза. Регуляторный фермент порождает колебания с периодами, изменяющимися от двух до девяноста минут. Экспериментально наблюдаемые колебательные процессы можно отождествить с аттракторами типа предельного цикла, возникающими при неустойчивости стационарного состояния в соответствующей динамической системе.

Другим колебательным метаболическим процессом является периодический синтез цАМФ[5)] в клеточных слизневиках. Этот вид демонстрирует переход между двумя разными состояниями организации. Во-первых, амебы являются независимыми и отдельными клетками. Переход к агрегации и, наконец, к многоклеточному плодовому телу происходит после голодания. Лишенные питательного вещества отдельные клетки агрегируют в концентрические волны вокруг центров в ответ на испускание из центров цАМФ. Синтез цАМФ реализует предельный цикл. Сам процесс агрегации представляет самоорганизацию, возникающую в области вдали от равновесия.

Моделируя этот процесс в рамках теории сложных систем, рассмотрим сначала популяцию отдельных и однородных клеток. Управляющим параметром является снабжение пищей, которое можно регулировать до критического уровня голодания. В этот момент испускается цАМФ, который подавляет диффузионное движение амеб, и однородное состояние становится неустойчивым. На макроскопическом уровне клетки начинают различаться по своим функциям и объединяться. На этом уровне можно наблюдать промежуточные состояния агрегации, приводящие в конце концов к новой форме зрелого многоклеточного тела. На образовании изолированных спор жизненный цикл слизневика заканчивается и повторяется, проходя описанные состояния фазовых переходов (рис. 3.5) [3.38].

Спонтанное возникновение органических форм казалось чудом жизни. Поэтому в истории науки *морфогенез* (процесс клеточной дифференциации, происходящий в ходе развития организма) был превосходным контрпримером, опровергающим физический редукционизм в биологии. В наши дни морфогенез — прекрасный пример для моделирования биологического роста сложными динамическими системами. Что сказал бы Гёте о математической модели любимой им метаморфозы? В этом контексте образование структур понимается как сложный процесс, в котором тождественные клетки становятся различными и порождают вполне определенную пространственную структуру. Первые динамические модели морфогенеза были предложены Рашевским, Тьюрингом и другими исследователями. Рассмотрим модель морфогенеза для описания роста растений, предложенную Рашевским («филотаксис») [3.39].

На рис. 3.6 *а* показана идеализированная ветка винограда, состоящая из трех побегов, причем в единицу времени выпускается один побег в симметричном относительно вращений направлении. На конце растущего побега имеется ростовая почка,

[5)] Циклический аденозинмонофосфат. — *Прим. пер.*

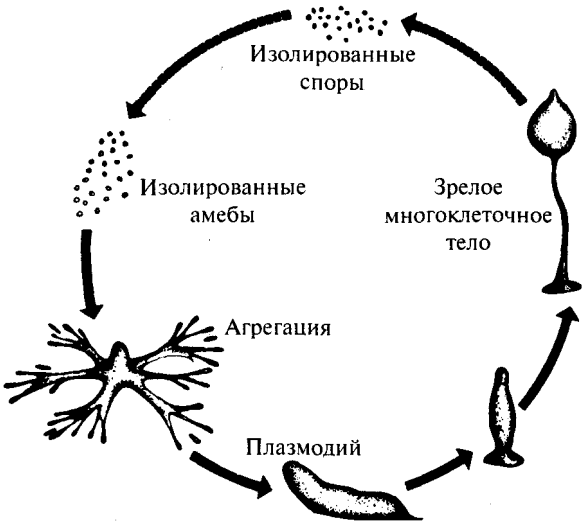


Рис. 3.5. Динамическая модель морфогенеза с состояниями образования клеток (жизненный цикл слизневика)

содержащая массу недифференцированных и тотипотентных[6)] клеток. Проблема филотаксиса заключается в возникновении картины роста с дифференцированными клетками, например, клетками листовых почек, клетками веточек и др., приводящего к почкам листьев и веток. Модель Рашевского основана на возникновении кольца ростовых клеток по окружности побега вблизи ростовой почки на его верхушке.

Клетка рассматривается как мешочек, заполненный жидкостью однородного химического состава. Одним из химических компонентов является гормон роста, называемый морфогеном. Концентрация x морфогена является наблюдаемым параметром модели. Так как этот параметр изменяется от 0 до 1, то пространством состояний модели является отрезок линии (рис. 3.6 *б*). Если концентрация морфогена превышает некоторый критический уровень, включается функция роста клетки, сама клетка делится и на свет рождается веточка.

На следующем шаге две клетки рассматриваются как открытая система, в которой происходит обмен одним морфогеном между двухклеточной системой и окружающей средой. Если обозначить y концентрацию морфогена во второй клетке, то состояние всей системы соответствует точке (x, y) в единичном квадрате, который интерпретируется как пространство состояний системы. На рис. 3.6 *в* пространство состояний поделено на четыре области, соответствующих ситуациям «рост клетки 1 выключен, клетка 2 растет» (А), «рост обеих клеток выключен» (Б), «клетка 1 растет, рост клетки 2 выключен» (В) и «обе клетки растут» (Г).

На заключительном этапе три клетки образуют кольцо с однород-

[6)] Тотипотентные клетки – тип стволовых клеток, которые могут в процессе последовательных превращений давать все множество клеток организма. – *Прим. ред.*

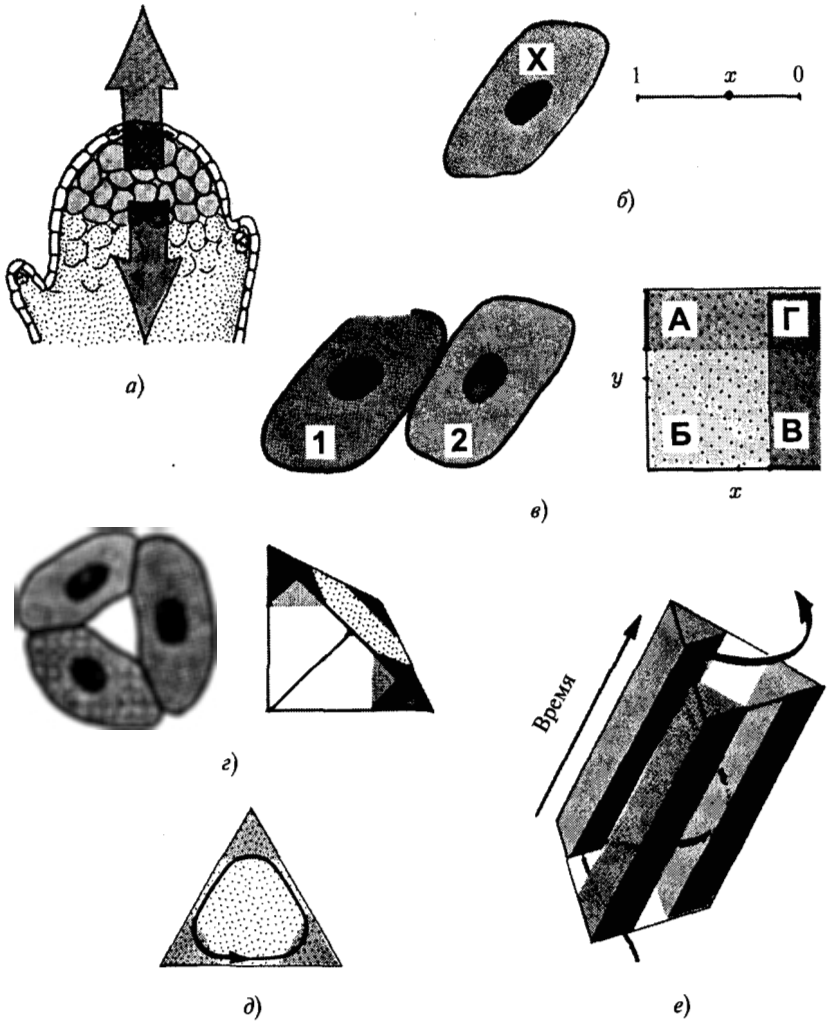


Рис. 3.6. Динамическая модель морфогенеза с состояниями дифференциации клеток (модель филотаксиса Рашевского) [3.39] (*а*). Клетка с концентрацией морфогена, равной x, и соответствующее пространство состояний с состояниями x на отрезке линии (*б*). Двухклеточная система с морфогенами x и y и соответствующее пространство состояний с состояниями (x, y) в единичном квадрате (*в*). Трехклеточная система с однородной концентрацией морфогенов x, y и z и соответствующее пространство состояний с состояниями (x, y, z) в единичном кубе [3.39] (*г*). *Предельный цикл в фазовом пространстве* (*д*). *Преобразование аттрактора* во временной ряд, идущий снизу вверх (*е*)

ной концентрацией морфогена в каждой клетке. Точка (x, y, z) в единичном кубе представляет состояние системы. В трехмерном случае пространство состояний замкнутой системы трех клеток с одним морфогеном реализуется треугольником, причем $x + y + z = 1$, т. е. сумма концентраций постоянна (рис. 3.6 *г*).

На рис. 3.6 *д* к пространству состояний добавляется динамическая система с периодическим аттрактором. Одна за другой три клетки периодически включаются, затем выключаются. На рис. 3.6 *е* стебель моделируется как стопка колец из клеток, причем каждое кольцо представляет тождественную копию треугольной модели рис. 3.6 *г*. Рост стопы вперед по времени представлен путем сопоставления хода времени направлению вверх вдоль стопы. Периодический аттрактор рис. 3.6 *д* преобразуется в периодический временной ряд, раскручивающийся снизу вверх по шкале времени.

В такой упрощенной динамической модели морфогенеза остается открытой центральная проблема. Каким образом первоначально недифференцированные клетки знают, где и как они должны изменяться? Эксперименты указывают, что эта информация первоначально не задана в отдельных клетках, а клетка внутри клеточной системы получает информацию о своем положении от окружающей среды. Классическим примером является гидра, крохотное животное, состоящее примерно из 100 000 клеток пятнадцати разных типов. Она разделена вдоль своей длины на различные области, например, на одном конце находится голова. Если пересадить часть гидры в область ближе к ее старой голове, то за счет активации клеток вырастает новая голова. Имеются экспериментальные свидетельства реального существования активаторных и ингибиторных молекул.

В математической модели Гирера и Мейнхардта предлагаются два уравнения эволюции, описывающие скорости изменения концентраций активатора и ингибитора[7], зависящие от пространственно-временных координат. Изменение пространственной конфигурации происходит за счет производства и распада активатора и ингибатора, а также за счет диффузии. Очевидно, что ингибитор и активатор должны быть способны диффундировать в разные области, с тем чтобы оказывать влияние на соседние клетки трансплантата. Кроме того, должен быть смоделирован эффект торможения ингибитором автокатализа. На рис. 3.7 показано, как взаимодействие между ингибитором и активатором приводит к растущей периодической структуре, которая рассчитывается и строится с помощью компьютерных методов [3.40].

При получении таких структур существенно, что ингибитор диффундирует легче, чем активатор. Для возникновения пространственно-неоднородной диссипативной структуры, в дальнейшем не меняющейся во времени, требуется дальнодействующее торможение и короткодействующая активация. С помощью методов математического анализа можно определить эволюцию структур, описывающихся эволюционными уравнениями Гирера и Мейнхардта. Управляющий параметр позволяет различить устойчивые и неустойчивые конфигурации («моды»).

При критическом значении параметра неустойчивые моды в соответствии с принципом подчинения начинают влиять на устойчивые и подчинять их. Математически устойчивые моды можно исключить, а неустойчивые моды определяют параметры порядка, задающие возникающую структуру. Таким образом, структуры возникают в результате конку-

[7] Активатор стимулирует рост клеток, ингибатор замедляет его. — *Прим. ред.*

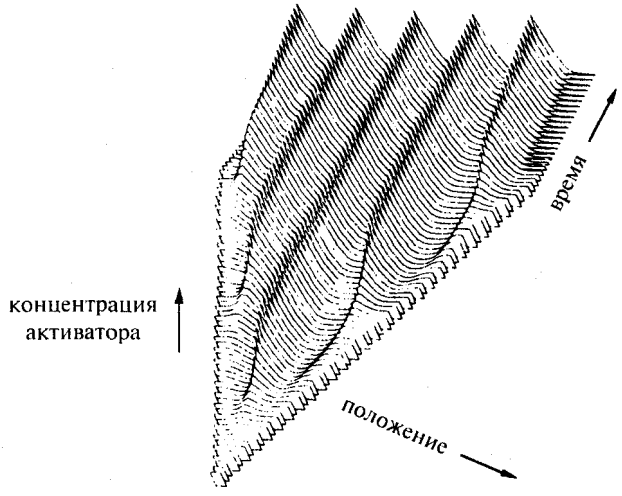


Рис. 3.7. Рассчитанная на компьютере модель морфогенеза, приводящая к периодической структуре [3.40]

ренции и отбора некоторого неустойчивого решения. Согласно принципу подчинения, отбор означает уменьшение сложности, определяющейся огромным числом степеней свободы всей системы.

С точки зрения биохимии, такой тип моделирования морфогенеза основан на идее о том, что морфогенетическое поле образуется путем диффузии и воздействия определенных химических веществ. Похоже, что независимо от конкретного биохимического механизма морфогенез определяется общей схемой образования структур в физике и биологии. Мы исходим из популяции одинаковых клеток, соответствующих системе с полной симметрией. Затем дифференциация клеток определяется изменением управляющего параметра, что соответствует нарушению симметрии. В результате возникает необратимый фазовый переход вдали от теплового равновесия. На рис. 3.8 с помощью полученных на компьютере картинок иллюстрируется процесс фазового перехода концентрации активатора и ингибитора.

Независимо от общей схемы нарушения симметрии, существует важное различие между физико-химическим и биологическим образованием структуры. Когда приостанавливается подача энергии и вещества, физические и химические системы теряют структуру (ср., например, лазер и реакцию Белоусова–Жаботинского). Биологические системы способны, по крайней мере достаточно продолжительное время, сохранять значительную часть своей структуры. Поэтому представляется, что они образуют комплекс приближенно консервативных и диссипативных структур.

С античных времен предполагалось, что живые системы служат определенным целям и задачам. Органы животных и человека являются типичными примерами функциональных структур, используемых физиологией и анатомией. Каким образом можно понять медицинские функциональные структуры в рамках

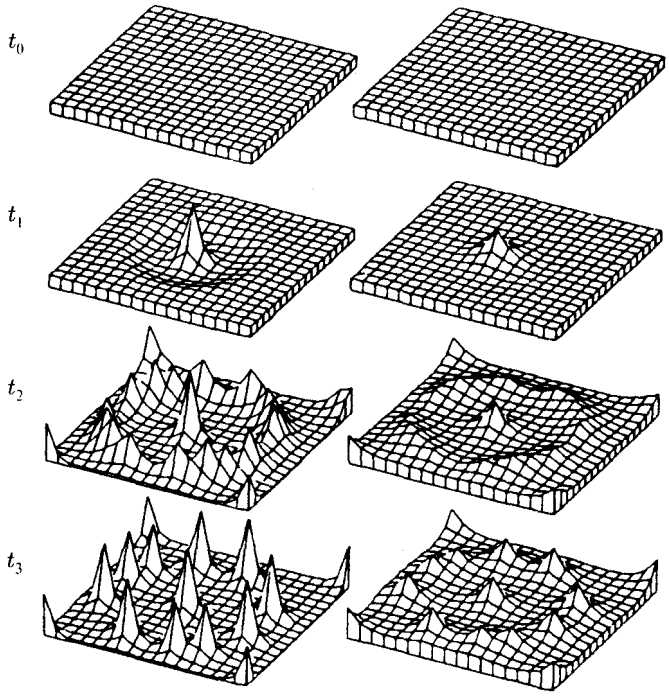


Рис. 3.8. Две полученные на компьютере модели морфогенеза, показывающие фазовые переходы концентраций активатора и ингибитора. На рисунке представлены распределения концентрации активатора в последовательные моменты времени

представлений о сложных системах [3.41]?

Примерами фрактальных структур являются сложные бифуркации сосудистых систем. С помощью фракталов хорошо описываются формы деревьев, папоротников, кораллов и других растущих систем. В гл. 5 мы обсудим рекурсивные и компьютерные процедуры моделирования фрактального роста деревьев. Разветвления сосудов в сердце напоминают сложную сеть ветвей и корней. Это кажется вполне естественным, если признать, что рост сосудов возникает за счет почкования капилляров в области деления и дифференциации клеток.

У ветвящихся деревьев есть место, куда расширяться. Но сердце, легкие и другие органы занимают ограниченную область в пространстве. Пронизывающая их сеть нервов или сосудов предназначена для обслуживания главных хозяев пространства. Структура микрососудистой сети практически полностью определяется клетками органа. В мышцах скелета и сердца капилляры расположены параллельно мышечным клеткам с несколькими поперечными разветвлениями. Рост этой системы определяется тем, что нервная или сосудистая система должна следовать линиям наименьшего сопротивления.

Это приводит к очень интересному, с медицинской точки зрения, вопросу — может ли фрактальный рост и форма сосудистой сети породить наблюдаемые неоднородности потока крови в сердце. Как показано на

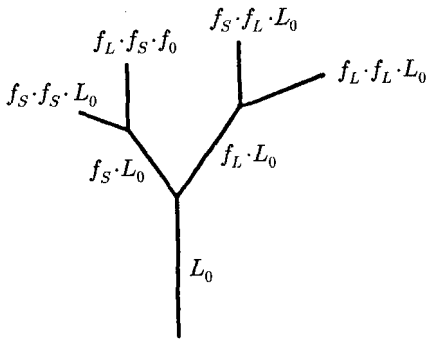


Рис. 3.9. Ветвящаяся сеть сосудов сердца с фрактальными рекурсиями для длин ответвлений. Длина главного ствола сосуда равна L_0, длины последующих дочерних сосудов уменьшаются в f_L и f_S раз (индексы L и S означают более длинный и более короткий сосуды)

рис. 3.9, простой алгоритм ветвящейся сети приводит к соответствующей функции плотности вероятности пространственного потока. Фрактальная система органа стала функциональной структурой [3.42].

Иллюстрации сети бронхов, полученные с помощью фракталов, вдохновили медиков на применение такого же подхода к легким. Многие физические системы, от галактических кластеров до диффундирующих молекул, проявляют фрактальное поведение. Очевидно, что и живые системы могут часто описываться фрактальными алгоритмами. Так, фрактальными свойствами сердца могут быть система сосудов и процессы диффузии и трансмембранного переноса. Эти фрактальные свойства позволяют медикам понять более общие явления, такие как фибрилляция предсердия или желудочка и неоднородность кровотока.

Как мы видели в разд. 2.4, нелинейная динамика позволяет описывать возникновение турбулентности, представляющее тяжелую медицинскую проблему, касающуюся потока крови в артериях. Турбулентность может стать основой предельного цикла, что можно наблюдать, когда вода течет по цилиндрической трубе. Многие управляющие системы порождают колебания. Можно ожидать также, что хаотическое поведение проявляют некоторые колебательные управляющие системы.

Классический пример кажущегося хаотическим явления — это фибрилляция предсердия и желудочка. Клиническое утверждение о сердцебиении при фибрилляции предсердия состоит в том, что оно нерегулярно нерегулярное. Из наблюдений следует, что поверхность предсердия пульсирует совершенно хаотически. Однако изучение явлений повторного входа и фибрилляций желудочка показывает, что существуют особенности возбуждения, вновь иллюстрирующие тезис, что это организованный («математический») хаос. Для него были предложены фрактальный и хаотический алгоритмы, порождающие схожую динамику. На рис. 3.10 показаны регулярное и хаотическое сердцебиения [3.43].

Тем не менее хаотические состояния в общем случае не свидетельствуют о болезни, так же как регулярные состояния не всегда соответствуют здоровью. Существуют ограниченные хаотические колебания, защищающие организм от опасной негибкости



Рис. 3.10. Регулярное и хаотическое сердцебиения

(регулярная нерегулярность). Органы должны быть способны гибко реагировать на быстрые и неожиданные изменения обстоятельств. Частоты сердцебиения и дыхания ни в коем случае не фиксируются, как в механической модели идеального маятника.

Отдельные органы и организм человека в целом должны сами по себе рассматриваться как система нелинейных сложных динамических систем высокой чувствительности. Настройка управляющих параметров этих систем до критических значений может стать причиной фазовых переходов к необратимым событиям, представляющим более или менее опасные сценарии изменения здоровья человека.

Сложные диссипативные структуры являются открытыми системами, которые невозможно отделить от окружающей среды. Отсюда следует, что, с точки зрения подхода, основанного на теории сложных динамических систем, «классический» механический взгляд медицины, разделяющей человеческое тело на отдельные части для изучения узкими специалистами, должен быть подвергнут серьезной критике. Тело в целом есть нечто большее, чем сумма его частей. Поразительно наблюдать, что, с современной точки зрения нелинейной динамики, вновь находит поддержку восходящее к античности старое требование врачей-традиционалистов о том, что медицина является не только аналитической наукой, но и искусством исцеления, которое должно рассматривать здоровье и болезнь в совокупности.

3.4. Сложные системы и экология популяций

Экосистемы являются результатом совместного действия физических, химических и биотических компонентов природы с образованием структурно и функционально организованной системы. Экология — наука о том, как эти живые и неживые компоненты совместно функционируют в природе. Очевидно, что в рамках подхода, основанного на теории сложности, экология должна иметь дело с диссипативными и консервативными структурами очень большой сложности, зависящей от сложности входящих в них отдельных физических, химических и биотических систем, а также сложности их взаимодействий [3.44].

Один из первых примеров эмпирических исследований по экологии — лекция Генри Торо в 1860 г. о «сукцессии[8)] деревьев в лесу». Он изучал приводящий к последовательной смене видов природный процесс развития растений, казавшийся наблюдаемым и предсказуемым. Если экосистема не испытывала никаких помех для развития, то смена пустого поля на травянистый луг, затем на низкорослый кустарник, далее на сосновый лес и, наконец, на лес из дубов и гикори представляла предсказуемый 150-летний процесс (по крайней мере, в XIX в. в штате Массачусетс) [3.45].

Почти в том же году Чарльз Дарвин опубликовал знаменитую теорию эволюции, основанную на механизмах изменчивости и отбора. Дарвин наблюдал прогрессирующие изменения в организмах, вытекающие из борьбы за существование, и оптимальное приспособление к экологическим нишам. Поток энергии от Солнца и химические реакции приводят в действие и поддерживают этот процесс жизни. Больцман уже заметил, что для организации живых существ био-

[8)] Сукцессия — последовательная смена одних органических сообществ (экосистем) другими. — *Прим. пер.*

сфера несет высокие затраты энергии и энтропии. Эти процессы основаны не только на биотических, но и на небиотических компонентах экосистемы.

Джеймс Лавлок предположил, что живые системы управляют основными геохимическими циклами Земли. По его мнению, глобальный атмосферный состав не только был создан живыми системами, но и контролируется глобальной экосистемой. «Равновесие в природе» — стало популярным выражением, обозначающим сложную сеть равновесных состояний, характеризующих экосистему человека на Земле [3.46].

Математическая теория сложных систем позволяет смоделировать ряд упрощенных экологических ситуаций. Явления, которые должны быть объяснены, — это, главным образом, распространенность и распределение видов. Они могут проявлять типичные для диссипативных структур свойства, подобные временным колебаниям. В начале XX в. рыбаки в Адриатическом море наблюдали периодическое изменение численности популяций рыбы. Эти колебания были вызваны взаимодействием между хищниками и жертвами среди рыб. Если хищники поглощают слишком много жертв, число последних, а затем и число хищников, уменьшается. В результате число жертв увеличивается, что приводит к росту числа хищников. Таким образом, возникает циклическое изменение обеих популяций.

В 1925 г. Лотка и Вольтерра построили нелинейную динамическую модель. Каждое состояние модели определяется числом рыб-хищников и рыб-жертв. Таким образом, пространство состояний модели представляет двумерную евклидову плоскость, по одной из координат на которой указывается число жертв, а по другой — число хищников. Длительные наблюдения двух популяций описываются пунктирной линией на плоскости. Рождения и смерти понемногу за раз изменяют координаты на целые числа. Чтобы использовать методы непрерывной динамики, нужно заменить пунктирные кривые идеализированными непрерывными кривыми.

Векторное поле на пространстве состояний можно приближенно описать с помощью четырех областей (рис. 3.11 *а*). В области *A* численность обеих популяций сравнительно мала. Когда обе популяции немногочисленны, число хищников уменьшается из-за недостатка жертв, а число жертв растет, так как уменьшается число хищников. На рисунке стрелкой показана интерпретация такой обычной тенденции в виде вектора граничной скорости. В области *B* имеется много жертв, но сравнительно мало хищников. Но в такой ситуации обе популяции растут. Это интерпретируется вектором в области *B*. В области *C* обе популяции сравнительно многочисленны. Хищники сыты и размножаются, а популяция жертв сокращается. Эта тенденция показана вектором в области *C*. В области *D* имеется мало жертв и много хищников. Обе популяции сокращаются. Эта тенденция показана вектором в области *D*. Фазовый портрет такой системы можно представить замкнутой траекторией.

На рис. 3.11 *б* фазовый портрет представляет собой множество замкнутых траекторий вокруг центральной точки равновесия. Так же как теория динамических систем показывает, что следует ожидать через длительный промежуток времени, фазовый портрет позволяет экологу узнать, что случится через большой промежуток времени с двумя популяциями. Каждая начальная популяция хищника

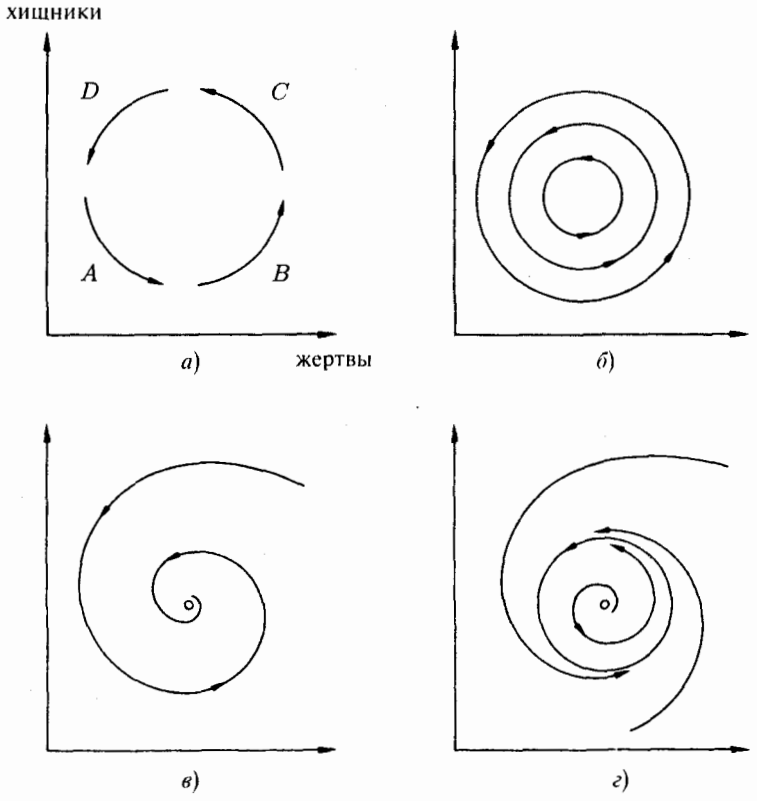


Рис. 3.11. Фазовые портреты экологической системы с популяциями хищника и жертвы (Лотка—Вольтерра): *а* — замкнутая траектория; *б* — семейство замкнутых траекторий; *в* — точечный аттрактор (особая точка типа устойчивый фокус); *г* — периодическая траектория, соответствующая предельному циклу

и жертвы будет периодически восстанавливаться [3.47].

Если добавить в модель своего рода экологическое трение, то центр станет асимптотически устойчивой особой точкой. Это будет модель экологической системы в статическом равновесии (рис. 3.11 *в*). Другая, вероятно, более реалистичная, модификация модели приводит к фазовому портрету типа, показанного на рис. 3.11 *г*, имеющему только одну периодическую траекторию.

С аналитической точки зрения, эволюция популяции определяется уравнением для скорости изменения ее численности [3.48]. Очевидно, что число отдельных особей в популяции изменяется пропорционально разности скорости роста и уровня смертности. Еще один параметр, который следует учитывать, отвечает ограниченному снабжению пищей или истощению пищевых ресурсов. Следует моделировать и разные условия жизни популяций. Если разные виды потребляют различные типы пищи и не взаимодействуют друг с другом, они могут сосуществовать.

Если разные виды живут в схожих условиях, то в уравнениях эволюции популяций надо учитывать пе-

рекрытие пищевых ресурсов. Колоссальное упрощение происходит в случае, когда можно пренебречь изменением пищевых ресурсов со временем. Получающиеся уравнения эволюции допускают несколько сценариев сосуществования, в которых реализуются устойчивые конфигурации.

Биологически устойчивые состояния соответствуют экологическим нишам, которые важны для выживания вида. Соотношения хищник — жертва для двух популяций описываются уравнениями Лотки—Вольтерры, характеризующими фазовые портреты рис. 3.11. В частности, одной из форм кооперации в природе является симбиоз двух видов. При моделировании симбиоза уравнениями эволюции нужно учитывать, что скорость размножения одного вида зависит от наличия второго вида.

Популяции животных можно охарактеризовать по шкале большей или меньшей сложности социального поведения. Существуют популяции насекомых со сложной социальной структурой, представляющей большой интерес для социобиологии. Николис и др. пытались смоделировать социальную организацию термитов сложной динамической системой. Взаимодействия между особями физически реализуются слухом, зрением, осязанием и передачей химических сигналов (обонянием).

Сложный порядок в системе определяется функциональными структурами, такими как регулирование каст, постройка муравейника или термитника, прокладка дорог, перенос строительных материалов или жертв и пр. Насекомые выделяют химические вещества, регулирующие их поведение. Они стремятся следовать в одном направлении к месту, где плотность молекул химических веществ достигает максимума. Коллективные и макроскопические перемещения насекомых регулируются концентрациями этих химических веществ.

Для моделирования коллективных движений были предложены два уравнения, рассматривающие скорость изменения концентраций насекомых и химических веществ. Существует критическое значение параметра порядка («коэффициент хемотаксиса»), при котором стационарное однородное решение становится неустойчивым. После этого система эволюционирует к неоднородному стационарному состоянию. Соответственно, возникают разные ветвящиеся структуры, как это и наблюдается в разных сообществах муравьев. На рис. 3.12 показано коллективное движение муравьев с двумя типами структуры, характерными для двух разных видов [3.49].

Сложность социального поведения насекомых можно также охарактеризовать таким скоординированным поведением, как постройка муравейника. Этот процесс многократно наблюдался и изучался экспериментально. Типичное наблюдение заключается в том, что наличие в данном месте запаса строительных материалов побуждает насекомых все больше накапливать их в этом месте. Это автокаталитическая реакция, которая, так же как случайное распределение насекомых, может быть смоделирована тремя дифференциальными уравнениями. Эти уравнения соответствуют наблюдению, что при манипуляциях со строительными материалами термиты придают им запах определенного химического вещества, который распространяется в атмосфере и привлекает насекомых к местам с наибольшей интенсивностью такого запаха, в которых уже были ранее сделаны запасы строительных материалов.

Таким образом, первое уравнение описывает скорость изменения кон-

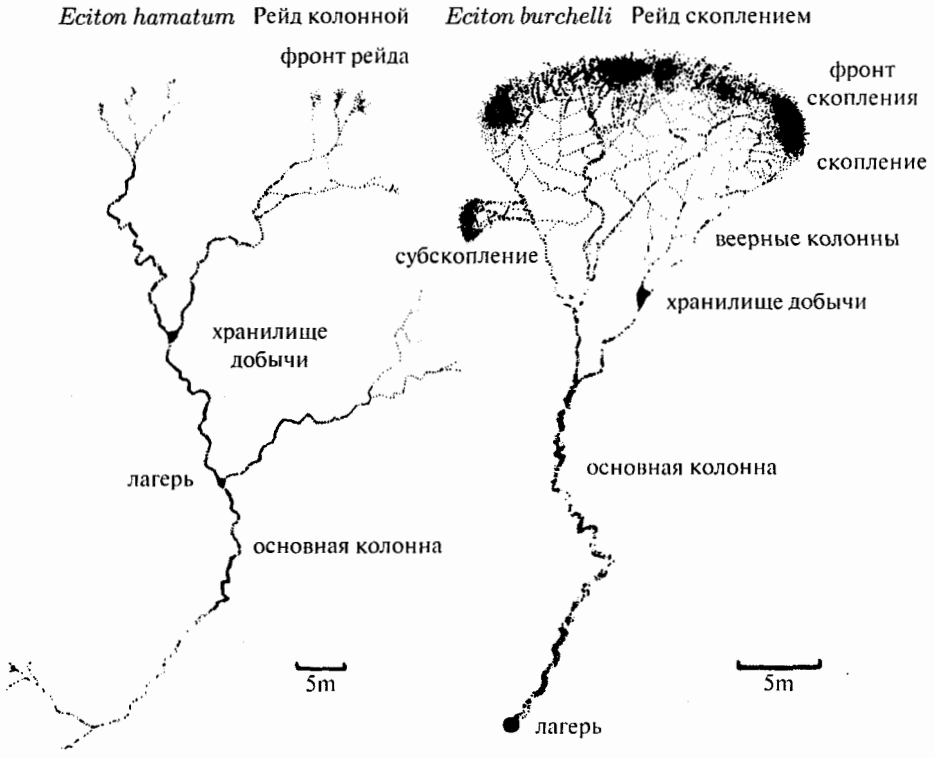


Рис. 3.12. Ветвящиеся сети коллективных движений двух разных видов муравьев [3.49]

центрации строительных материалов, пропорциональную концентрации насекомых. Второе уравнение эволюции относится к скорости изменения концентрации пахучего вещества и включает определенный коэффициент диффузии. Третье уравнение эволюции описывает скорость изменения концентрации насекомых, учитывающую поток насекомых, диффузию и движение, направленное в сторону источников запаха.

Сложная социальная активность насекомых при постройке муравейника или термитника соответствует решениям этих уравнений. Так, нескоординированная начальная фаза деятельности соответствует однородному решению этих уравнений. Если в каком-то месте возникает достаточно большая флуктуация с увеличенным запасом строительного материала, то может появиться опора или стена. Причиной возникновения макроскопического порядка, который мы видим в архитектуре сооружений насекомых, являются флуктуации микроскопических взаимодействий.

В наши дни модели описанного выше типа часто используются в экологии. Следует отметить, что все они находятся на довольно примитивном уровне. В действительности, надо учитывать множество дополнительных явлений, например, временну́ю задержку, время года, различные уровни смертности и разные поведенческие реакции. В общем случае имеется не только взаимодействие одной или двух сложных популяций с (упро-

щенной) окружающей их средой, но огромное количество разных взаимодействующих популяций. Фазовые портреты их нелинейной динамики, по крайней мере, позволяют делать глобальные предсказания на большой интервал времени [3.50].

С точки зрения традиционного дарвинизма, в биологической эволюции принимают участие две важные силы, которые должны моделироваться в сложных динамических системах: мутационное давление [9] и отбор. В биологических популяциях, в которых поведение отдельных особей однозначно определяется их генами, увеличение численности нового типа особей соответствует дарвиновской эволюции путем естественного отбора спонтанно возникших в системе мутантов. В случае высших животных имеется возможность поведенческого изменения («инновации») и его адаптации за счет информации. В экологической эволюции возникают новые экологические ниши, занятые приспособленными к определенным условиям видами. Очевидно, не существует простой схемы эволюции, а наблюдается сложная иерархия изменяющих и стабилизирующих стратегий, которые развивались последовательно от добиологической эволюции до экологической и, наконец, культурной эволюции с человеческими обучающими стратегиями (ср. гл. 7).

Подход, основанный на теории сложных систем, приводит к большому разнообразию возможных эволюционных схем с неожиданными направлениями, вызванными стохастическими флуктуациями. Не существует глобального оптимизатора, глобальной обслуживающей программы, глобальной функции отбора и никакой другой упрощенной стратегии эволюции, кроме последовательных неустойчивостей в окрестности точек бифуркации. Короче говоря, дарвиновский взгляд — это один из конкретных взглядов на эволюцию. Для многих современников казалось, что Дарвин заменил персональное божество по имени «Бог» на обезличенное божество по имени «эволюция», управляющее миром с помощью простых законов. Такая оторванная от церкви религиозная позиция в XIX в. была позднее поддержана политическими мыслителями, в частности Карлом Марксом, который верил в обезличенное божество по имени «история», с помощью упрощенных общественных законов управляющее человеческой судьбой.

Уже в XVIII в. Кант жаловался, что термин «природа» начинает обозначать обезличенное божество. Но «природа», как утверждал Кант, есть не что иное, как «регулятивная идея человека». С современной точки зрения, мы можем действительно только отличать динамические модели большей или меньшей степени сложности, которые с большей или меньшей степенью точности описывают экспериментальные данные. Отказ от какого-то могущественного надзирателя над природой и человеческой историей может создать у нас чувство, что мы остались одни лицом к лицу с, возможно, опасными хаотическими флуктуациями. Но, с другой стороны, эти флуктуации могут дать возможность воплотить возникшие новые идеи, осуществить реальный выбор и реализовать подлинные свободы.

[9] Частота мутирования данного гена в популяции. — *Прим. пер.*

Глава 4

Сложность и эволюция системы разум—мозг

Как объяснить возникновение мозга и разума? Глава начинается с краткой истории проблемы разум-тело. Если не принимать во внимание религиозные традиции, то на концепции разума и тела, которых придерживались наши предки, часто оказывали влияние самые передовые идеи в науке и технике (разд. 4.1). В рамках теории сложности систем мозг моделируется как сложная система клеток с нелинейной динамикой. Возникновение ментальных состояний (например, распознавание образов, чувства, мысли) объясняется эволюцией (макроскопических) параметров порядка в упорядоченных мозговых структурах, вызванных нелинейными (микроскопическими) взаимодействиями нервных клеток в обучающих стратегиях вдали от теплового равновесия. Например, распознавание образов интерпретируется как тип фазового перехода, по аналогии с уравнениями эволюции, которые определяют возникновение структур в физике, химии и биологии (разд. 4.2). В недавних исследованиях по нейробиологии и когнитивной психологии ученые даже выдвинули гипотезу, что возникновение сознания и самосознания зависит от скорости возникновения «метаклеточных ансамблей», представляющих мозговые реализации саморефлексии. Фрейдовское бессознательное интерпретируется как частичное отключение параметров порядка, относящихся к определенным состояниям внимания. Даже наши сны и эмоции, по-видимому, управляются нелинейной динамикой (разд. 4.3).

Нашелся ли уже «Ньютон человеческого мозга и разума»? Конечно, нет. Основанный на теории сложных систем подход не способен объяснить, что такое разум. Но при определенных условиях мы можем смоделировать динамику некоторых элементов сознания. В принципе, нельзя исключить даже моделирование целенаправленного поведения. Сложные системы не требуют наличия центрального процессора, вроде выдумки о «маленьком человечке» в мозгу. Таким образом, уже устарело циничное заявление Вирхова о том, что даже после сотен операций он не нашел в человеческих телах никакой души. Ментальное состояние понимается как глобальное состояние сложной системы, вызванное локальными нелинейными взаимодействиями ее частей, но не сводимое к ним (разд. 4.4). В подходе, основанном на теории сложности, не затрагивается чудо наших эмоций, воображения и творчества, воспевавшееся поэтами и художниками с самого зарождения человеческой цивилизации, хотя мы иногда будем моделировать некоторые аспекты нелинейной динамики этих явлений.

4.1. От души Платона к «человеку-машине» Ламетри

Человеческий мозг является одним из самых сложных органов в природе. Сейчас мы знаем, что он позволяет возникнуть человеческому разуму, сознанию и индивидуальности, что с самого начала размышлений человека представлялось одним из величайших чудес человечества. Основанный на теории сложных систем подход позволяет смоделировать возникновение человеческого восприятия и мышления как результат нелинейных взаимодействий сложных нейронных сетей. Таким образом, модели сложных систем позволяют нам понять, *как* может работать мыслительный аппарат в мозге и *как* он мог при определенных условиях возникнуть в рамках естественной эволюции. С этой точки зрения, нет чуда в том, *как* за достаточно долгое время за счет хорошо известных законов эволюции в природе могли возникнуть сознание и разум. Но все еще остается чудом то, что они *возникли*.

Прежде чем исследовать сложные системы и эволюцию разума-мозга, окинем взглядом раннюю философию разума и историю нейрофизиологии. На основе исторических фактов мы можем решить, какие вопросы традиционной проблемы разума-тела уже были решены в рамках основанного на теории сложности подхода, а какие остаются нерешенными.

В предыдущих главах мы уже отмечали, что ранние мифы и религиозные верования являлись попытками объяснить мир, в котором живет человек, и заклинаниями сил природы. Очевидно, человеческие желания, страх, злость и воображение правят миром человеческой жизни так же, как и силы природы. Создается впечатление, что ощущаемые при жизни сознание, или дух, или разум, или душа «покидают» тело мертвого человека. Люди пытались смоделировать эти неизвестные процессы с помощью знакомых по опыту взаимодействующих физических тел. Ментальные или сознательные состояния гипостатировались [1] как конкретная субстанция, называемая «душой», которая ответственна за разумное поведение человека. При гипостатизации ментальных состояний была поднята проблема местонахождения души в теле. Обычно она решалась с помощью идеи, будто душа заполняет тело, или сосредоточена в некоторых органах, например, в сердце или легких. Хотя очевидно, что воздействия этой волшебной «вещи» вполне реальны, ее нельзя увидеть или ухватить, как Бога или привидение. Таким образом, обычно считалось, что душа имеет божественное происхождение. Критикуя традиционные мифы и религиозные верования, философы-досократики искали естественные причины и принципы. Ряд мыслителей рассматривали «душу» как материальную субстанцию, такую как «воздух» или «огонь», так как они верили в то, что эти субстанции являются тончайшими и легчайшими формами материи. Для Анаксагора разум есть принцип движения и порядка, и, следовательно, принцип жизни. Для Гераклита душа похожа на язык пламени, управляемый законом (логосом) Вселенной. Душа, как огонь, убивается водой: «Для душ стать водой означает смерть» [4.1]. Эти попытки объяснения представляют собой не что

[1] Гипостазис – овеществленная идея; гипостатизация – рассмотрение какой-то абстрактной идеи или концепции как реально объективно существующей. – *Прим. пер.*

иное, как моделирование неизвестного с помощью знакомого и известного.

Заслуживает внимания то, что один из ранних ученых-медиков, пифагореец Алкмеон из Кротона, по-видимому, был первым греческим мыслителем, который определил местонахождение ощущений и мыслей в мозге [4.2]. Как и ранняя греческая астрономическая модель гелиоцентрической Вселенной, эта гениальная идея была вскоре отвергнута авторитетом Аристотеля, учившего, что местоположением сознания является сердце, а мозг — всего лишь механизм охлаждения тела с помощью воздуха. Хотя ранние греческие мыслители, рассуждавшие о медицине, оказали на Аристотеля большое влияние, он не соглашался с великой идеей Гиппократа о том, что «мозг является посредником сознания (*sunesis*) и сообщает ему, что происходит».

Раннюю редукционистскую философию разума отстаивал Демокрит, пытавшийся свести ментальные состояния к взаимодействиям мельчайших атомов [4.3]. Конечно, проблемой такого редукционизма является то, что «душа» всего лишь отождествляется с конкретными материальными (но ненаблюдаемыми) атомами. В противоположность отождествлению с материальными телами и аналогичными идеями, философы школы Пифагора утверждали, что человеческая душа или разум должны быть нематериальными числами и соотношениями. Иными словами, душа моделировалась как система математических пропорций, гармония и дисгармония которых представляла ментальные состояния наподобие музыкальных мелодий.

Пифагорейская концепция оказала влияние на философию человеческой души Платона, связанную с его теорией форм или идей. В диалоге «Менон» Платон показывает, что необразованный раб может решать математические задачи. Причина этого, с точки зрения Платона, в том, что каждый человек обладает неким вечным (т. е. *априорным*) знанием, предшествующим любому эмпирическому опыту. Человек обладает этим типом априорного знания, например, в математике, принимая участие в вечных формах и идеях, являющихся *ante rem*, т. е. независимыми от неясных и преходящих явлений бытия [4.4].

Аристотель критиковал гипотезу Платона о существовании за миром реальности мира идей. Идеи — это человеческие абстракции форм, действующих в природе (*in re*). Душа описывается как форма («субстанция») живого тела, «первая энтелехия», представляющая телеологическую силу. Но она не отделена от материи. Душа включена в человеческое тело как потенция. Согласно Аристотелю, человеческий организм понимается как единое целое.

Тем не менее последователями Аристотеля и стоиков была открыта анатомия нервной системы. Гален считал, что нервы переносят психическую пневму к мускулам, заставляя их совершать движения. Психическая пневма была не только материальной субстанцией типа дыхания или воздуха, но и видом жизненного духа [4.5]. В Средние века философия природы Аристотеля и стоиков сильно повлияла на ученых-медиков исламского мира, например, на Али ибн Сину, который основал медицинскую школу, получившую известность впечатляющими достижениями в области хирургии, фармакологии и практического лечения и выхаживания больных [4.6]. Позднее эти медицинские стандарты персидского и арабского

мира были восприняты рядом мыслителей христианского Средневековья, в частности Альбертом Великим. Что же касается философии мозга и разума, то, например, философские дискуссии по проблеме человеческого сознания всегда перевешивались религиозными идеологиями, а производить вскрытия тел умерших долго считалось среди анатомов довольно опасным делом.

В противоположность холистической философии в духе Аристотеля и Али ибн Сины, рационализм Декарта учил придерживаться дуалистической онтологии, строго разделяющей разум и материю, душу и тело. Человеческое тело (*rex extensa*) есть материальная машина, построенная по законам механики и геометрии. Она управляется и контролируется врожденными идеями (*ideae innatae*), которые содержатся в человеческом мозге (*rex cogitans*). В своих *Размышлениях* Декарт, методично ставя все под сомнение, приходит к изначальному интуитивному представлению о человеческом разуме. Радикальное сомнение призвано открыть то, что (во всяком случае) является бесспорным. Несмотря на то, что Декарт мог сомневаться в результатах всех наук, в здравом смысле, в ощущениях, он не мог усомниться в том, что он существует как тип вещи, способной участвовать в таких процессах познания, как сомнение:

> Но что же я такое? Мыслящая вещь. А что такое мыслящая вещь? Это вещь, которая сомневается, понимает, утверждает, отрицает, желает, не желает и, кроме того, представляет и чувствует [4.7].

Трудностью теории Декарта, конечно, является проблема взаимодействия разума и тела. Он предполагает, что человеческий организм с его различными органами управляется разумом, местопребыванием которого является мозг. Нервы — это провода, по которым идут сигналы в мозг и из мозга. Они работают как причинные цепи между отдающим приказы разумом и исполняющими приказы мускулами. Согласно своей механической парадигме часового механизма, Декарт полагал, что существуют крохотные материальные частицы, названные им «животными ду́хами»[2], которые очень быстро двигаются и расталкивают друг друга в проводниках-нервах, для того чтобы пронести входной сигнал от мозга к мускулам.

В противоположность всем механическим явлениям в природе, человеческий разум способен по собственному желанию принимать решение о направлении движения. Таким образом, действие разума на животные ду́хи заключается в изменении направления их движения. Это можно сделать, не нарушая установленные самим Декартом законы физики, до тех пор пока сохраняется «количество движения» (позднее это будет названо законом сохранения импульса). На рис. 4.1 иллюстрируется декартова механическая модель восприятия. Крохотные частички световых лучей попадают в глаза человека, возбуждая мозг путем передачи по конкретным нервам их «животных духов». Движения руки и кисти скоординированы с восприятием разумом в мозгу [4.8].

В своей книге «Страсти души» Декарт даже попробовал проанализировать все эмоциональные состояния вроде страха или любви как пассивные физические последствия того пути, по которому различные «живот-

[2] *Esprits animaux* (*фр.*) — термин, введенный Декартом в трактате «Рассуждение о методе», часть V. — *Прим. пер.*

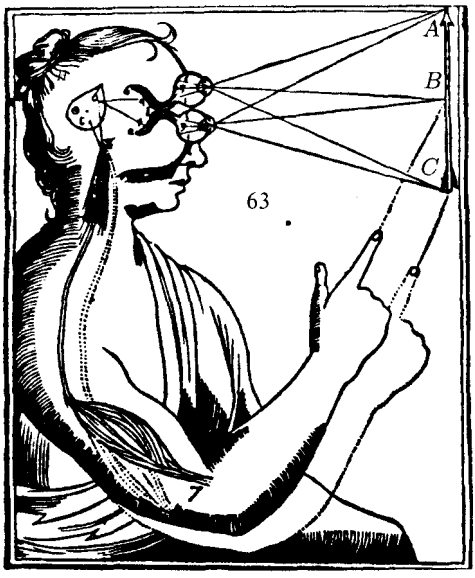


Рис. 4.1. Декартова геометрическая модель восприятия и движения руки

ные духи» протекают под действием внешних событий. Если заменить декартову механическую модель животных духов биохимическими субстанциями и электрофизическими явлениями, вспомнить о гормонах и нейромедиаторах, то представления Декарта о нервной активности представляются довольно современными.

Главная трудность состоит в непосредственном взаимодействии нематериального и поэтому не имеющего протяженности и неделимого разума (*res cogitans*) с материальным и поэтому протяженным и делимым телом (*rex extensa*). Декарт поместил разум внутри очень маленького органа в мозгу — шишковидной железы (или эпифиза), который управляет движениями животных духов. Но каким образом не имеющий протяженности разум оказывает воздействие на протяженную частицу вроде животного духа? В рамках механики эта проблема взаимодействия была в принципе неразрешимой и породила ряд усовершенствований в философии разума.

Для философов-окказионалистов[3)], например Мальбранша, все причинные связи сверхъестественны. Бог должен вмешиваться в причину каждого конкретного случая причинного действия. Таким образом, проблема разум-тело объясняется теологической и специальной для каждого случая гипотезой. Спиноза свел дуализм разума и материи Декарта к монизму одной единственной субстанции. Один Бог есть та единственная субстанция, являющаяся всем. Все явления в природе, разум и тело являются только атрибутами («состояниями») универсальной субстанции. В любом случае не существует чудес. Но Бог и человеческий разум рационализируются, и природа становится богоподобной в универсальном пантеизме [4.9].

Если руководствоваться подходом, основанным на теории сложных систем, то наиболее примечательная философия разума была развита Лейбницем. Говоря о философии природы, напомним, что вселенная Лейбница, в противоположность вселенным Декарта и Спинозы, состоит из бесконечно большого числа субстанций («монад»), соответствующих разным точкам зрения в пространстве и более или менее ясной перспективе целого. Таким образом, монады рассматриваются как подобные душе субстанции, наделенные восприятием и памятью и отличающиеся друг от друга степенью ясности их сознания. Существуют субстанции с довольно боль-

[3)] Окказионализм (*лат.* Occasio — случай) направление в западноевропейской философии XVII в., в центре которого проблема соотношения души и тела и трактовка их как абсолютно разнородных и не способных к взаимодействию сущностей. — *Прим. ред.*

шой перспективой и высокой степенью сознания, как люди, если их сравнивать с животными, растениями и камнями, обладающими последовательно уменьшающейся степенью сознания. В монадологию Лейбница можно включить даже Бога в качестве центральной монады, обладающей наивысшей степенью сознания и наилучшей перспективой целого, но все же являющейся отдельной и отличной от других сущностью [4.10].

Очевидно, что Лейбниц не сталкивался с метафизическими аспектами декартовской проблемы взаимодействия души и тела. На самом деле он пытался соединить классическую механику с традиционной аристотелевской телеологией природы, так как был уверен в механистических недостатках адекватной философии разума. С современной точки зрения, представление Лейбница о более или менее живых подобных душе субстанциях, обладающих восприятием и памятью, кажется довольно странным. Но для него не составляло труда построить модель своей монадологии в рамках более или менее сложных автоматов. Лейбниц считал, что каждую субстанцию можно смоделировать автоматом с различными состояниями, соответствующими восприятиям монады. Степень сознания монады измеряется ее степенью сложности, характеризующейся размером пространства состояний монады и ее способностью обработки информации. Состояния более или менее сложных автоматов Лейбница соотносятся друг с другом в сетях согласно его знаменитому высказыванию о том, что у монад «нет окон» и они не взаимодействуют, а отражают друг друга, как зеркала в причудливом дворце. Сложные сети монад Лейбница будут детальнее обсуждаться в гл. 5. Коротко говоря, Лейбниц предполагал, что разум не зарезервирован только для людей, а есть свойство систем, возникающее с разной интенсивностью в соответствии со степенью сложности системы.

Английские философы-эмпирики, такие как Локк и Юм, критиковали убеждения Декарта–Платона за то, что ментальные состояния можно анализировать путем самоанализа и чистого мышления без обращения к чувственному опыту. Для философов-эмпириков разум есть не более чем *tabula rasa* (чистая доска), пустой склад для сбора чувственных данных, чтобы затем путем ассоциации и абстракции создавать понятия. Образы — это просто менее живые копии чувственных впечатлений, которые можно комбинировать в воображении, например, так могло возникнуть представление об единороге.

Согласно методу сложных систем, Юм развил поразительную психологическую теорию ассоциаций. Он заявил, что не существует ни причинного механизма в природе, ни причинного закона в нашем разуме, а есть всего лишь бессознательный рефлекс соединения тех чувственных впечатлений, которые возникают взаимосвязанным образом по разным поводам, как вспышки молнии и гром. Можно сказать, что мозг обладает бессознательной способностью к построению картин чувственных впечатлений. Понятия — не более чем термины, обозначающие более или менее сложные картины чувственных впечатлений. Кроме математики не существует ясных и определенных концепций, основанных на восприятии, а есть только некие картины, позволяющие высказать более или менее вероятные суждения о событиях. В «Трактате о человеческой природе»

Юм писал[4] [4.11]:

> Один вид находящегося передо мной стола достаточен для того, чтобы дать мне идею протяжения. Итак, эта идея заимствована от некоторого впечатления, которое воспринимается в данный момент чувствами и воспроизводится идеей. Но мои чувства доставляют мне только впечатления известным образом расположенных цветных точек. Если мой глаз ощущает еще что-нибудь, пусть это будет мне указано; но если невозможно указать что-либо помимо отмеченного, то мы можем с уверенностью заключить, что идея протяжения не что иное, как копия этих цветных точек и способа их появления.

Согласно рационализму Декарта, человеческий разум управляет механикой тела, как монарх, управляющий государством в родном для него веке абсолютизма. Для Юма не существует отдельной субстанции человеческого разума, а имеется всего лишь самоорганизующееся поле постоянно возникающих и исчезающих картин, возбуждаемых объединением более или менее интенсивных чувственных впечатлений. Спонтанно объединяющиеся и разделяющиеся чувственные впечатления Юма можно сравнить со свободными гражданами демократического общества, которые могут собираться в группы и партии, не дожидаясь приказов и запретов монарха.

Синтез рационализма и эмпиризма попытался осуществить Кант. Согласно эмпиризму, знание начинается с опыта и чувственных данных. Но прав и рационализм, так как нам нужны ментальные структуры, схемы познания и категории, чтобы организовать опыт и знание. Кант попытался ввести философские категории, основанные на аксиомах ньютоновской механики. Главным свойством его эпистемологии является то, что распознавание не возникает в результате пассивных впечатлений от внешнего мира, запечатлевающихся на чистой доске нашего мозга. Распознавание в кантовском смысле — это активный процесс построения моделей мира с помощью априорных категорий. Пространственный и временной порядок физических событий сводится к геометрическим формам интуиции. Восприятие по Канту есть активная переработка информации, регулируемая априорными предчувствиями. Причинные связи между событиями становятся, с философской точки зрения, возможными благодаря априорной категории причинности.

Юм был прав, утверждая, что причинную связь нельзя почувствовать. Но для того чтобы предсказать и точно вычислить траекторию бильярдного шара, недостаточно повторить несколько раз удары по шарам и сопоставить им различные чувственные впечатления по Юму. Мы должны признать, что причины и следствия могут быть связаны каким-то детерминистским соотношением. Это сделано в кантовской эпистемологии в рамках общей схемы (детерминистской) причинности. Но остается вопрос, какая конкретная причинная функция адекватна для решения и проверки физическим опытом. Когнитивные схемы уже применяются в повседневной жизни. Они даже моделируются в компьютерных науках схемами данных языков программирования (ср. разд. 5.2). Таким образом, эпистемологию Канта можно интерпретировать как важную предшественницу со-

[4] *Юм Д.* Трактат о человеческой природе. Кн. 1. Ч. 2, гл. 3. — *Прим. пер.*

временных когнитивных наук[5)], в которых предполагается, что когнитивные схемы упорядочивают массивы опытных данных. Но, в противоположность Канту, эти схемы могут меняться в ходе истории, как это случилось, например, в теории относительности при переходе от евклидового пространства к неевклидовым [4.12].

В то время как Спиноза в качестве пути отказа от декартового дуализма предложил спиритуальный монизм, Ламетри поддержал определенный тип материалистического монизма. Предположение Декарта об отдельной, подобной душе, субстанции (*res cogitans*) подверглось критике как избыточное, так как все ментальные состояния должны сводиться к механическим процессам в человеческом теле — «человек-машина». Ламетри заявил, что нет фундаментальных различий между людьми и животными. Разумное и рефлекторное поведение должно объясняться «возбуждением» нервов, а не «духом в машине». Однако в механистических рамках XVIII в. революционные идеи Ламетри могли быть только вдохновляющей программой физиологических исследований [4.13].

Знаменитый ученый, специалист по математической физике и физиологии, Герман фон Гельмгольц (1821–1894) был философом-кантианцем [4.14]. Он считал, что следует допустить определенные рационализированные рамки когнитивных категорий, прежде чем может быть построено любое конкретное восприятие мира. Конечно, со времен Канта категории изменились. Тем не менее имеются некоторые общие схемы, например понятия пространства, чисел, измерения и причинности, характеризующие физические теории XIX в. Так, Гельмгольц был уверен в математической возможности неевклидовых пространств. Однако он полагал, что вопрос о правильной физической геометрии должен быть решен путем физических измерений.

Что же касается физиологических теорий Гельмгольца, то он начинал как студент Иоганнеса Мюллера (1801–1858), которого иногда называют отцом современной физиологии [4.15]. Мюллер отстаивал закон удельных нервных энергий, согласно которому каждый перв обладает своей собственной энергией или качеством. Он обнаружил, что ощущения могут вызываться механическими или химическими воздействиями, теплотой, электричеством и т. д. Теперь кантовский аспект восприятия рационализировался, так как стало очевидным, что мозг должен реконструировать внешний мир по его влиянию на нервы. Тем не менее Мюллер защищал нематериальную концепцию животного духа. Он считал, что животные духи не могут быть измерены, так как у них слишком большая скорость.

Гельмгольц использовал математический закон сохранения энергии. Поскольку энергия могла лишь преобразовываться, но не могла создаваться или уничтожаться, нематериальная жизненная энергия вне рамок закона сохранения представлялась бессмысленной. Гельмгольц предпочитал теорию, согласно которой до тех пор, пока изучается вопрос об энергии, тело можно рассматривать как механическое устройство для преобразования энергии из одной формы в другую без участия специальных сил и ду́хов. Химические реакции были способны определять всю физическую

[5)] Наука о мышлении, которая исходит из того, что человек в ходе мыслительной деятельности активно перерабатывает информацию и осуществляет рациональный выбор того или иного поведения. — *Прим. пер.*

активность и генерируемую в организме теплоту. Мускульная активность реализовывалась химическими и физическими изменениями в мускулах. Кроме того, Гельмгольц измерил скорость проводимости нервов и показал, что она даже меньше скорости звука [4.16]. С философской точки зрения, эти результаты интерпретировались как опровержение мюллеровского витализма.

Еще один студент Мюллера Эмиль Дюбуа-Реймон (1818–1896) показал, что нервный сигнал является на самом деле волной электрической активности. В те времена гистологи начали открывать под микроскопом отдельные клеточные тела и волокна. Согласно этим результатам, нервная активность и мозг представлялись как сложная система нервных клеток («нейронов») *со сложной сетью связей*. Структура связей нейронов, передающих сигнал от одного нейрона к другому, была впервые описана в начале XX в. Но наблюдения синаптических соединений были невозможны, пока в середине XX в. не стали использоваться электронные микроскопы.

Как можно объяснить возникновение восприятий, мыслей и чувств на языке нейроанатомии и нейрофизиологии? Один из первых мыслителей, объяснивших ментальные состояния клеточными ансамблями нейронныхсетей, был американский философ и психолог Уильям Джеймс. В своем кратком курсе «Научные основы психологии»[6] (1890) Джеймс защищал дарвиновскую и эволюционную точку зрения, в соответствии с которой мозг не построен для абстрактного мышления, а создан для обеспечения выживания в процессе эволюции. В духе прагматизма, он предполагал, что в мозге есть многое от хорошей инженерной конструкции, примененной к мыслительным операциям:

> Факты душевной жизни не могут быть надлежащим образом изучены особо от той физической среды, знание о которой они образуют... Коротко сказать, дух и мир развились одновременно и поэтому несколько приспособлены друг к другу [4.17].

Представляется, что организация мозга очень плоха для арифметических операций или формальной логики. Но способность формировать понятия и ассоциации, высказывать догадки и выдвигать гипотезы — все это является характерным свойством мозга. Джеймс предлагает механическую модель ассоциаций, происходящую от пионерской работы Юма и напоминающую нам последующие ассоциативные нейронные сети. На *качественном уровне он сформулировал* некоторые принципы, которые частично включены в современные математические модели сложных нейронных сетей.

1. Джеймс полагал, что ассоциации имеют механическую природу и являются функцией коры головного мозга.
2. Принцип ассоциации Джеймса:

   Когда два элементарных мозговых процесса находились в действии вместе или следуя непосредственно друг за другом, то один из них, когда происходит снова, стремится распространить свое возбуждение и на другой.

3. Суммирующее правило мозговой активности Джеймса:

[6] Далее все цитаты из этой книги даются по изданию: *Джемс В.* Научные основы психологии / Пер. под ред. Л. Е. Оболенского. СПб., 1902.

Степень деятельности в любой данной точке мозговой коры равна сумме стремлений всех других точек произвести разряд в данную точку, стремлений, пропорциональных:

1) числу, показывающему, сколько раз возбуждение каждой другой точки могло сопровождать возбуждение в данной точке;
2) интенсивности этих возбуждений;
3) отсутствию какой-либо противодействующей точки, функционально разобщенной с первой точкой, и в которую разряды могут быть отвлечены [4.18].

Если заменить во втором принципе термин «мозговой процесс» на «нейрон», то мы получаем описание синапса, понятия, введенного позднее Хеббом (см. разд. 4.2). Если в третьем правиле заменить слова «точка мозговой коры» на «нейрон», мы получаем *правило линейного суммирования* синаптических входных сигналов, очень близкое к некоторым сетевым моделям хеббовского типа. Джеймс также обсуждал способность сетей частичных ассоциаций реконструировать пропущенные куски с помощью определенной процедуры соединения клеток. Хотя Джеймс, конечно, не был знаком с компьютерным моделированием, он глубоко проник в суть основанного на теории сложных систем подхода, заключающегося в том, что сложные события в сознании собраны из различных субассоциаций, связанных между собой элементарными механизмами типа синапсов.

В главе «Ассоциации» Джеймс рассматривает человека, начинающего думать о званом обеде. Единственной вещью, которую все обстоятельства этого обеда могли бы в совокупности нам напомнить, было бы первое конкретное происшествие, непосредственно следующее за обедом. Все детали этого происшествия могли бы, в свою очередь, в совокупности вызвать в памяти только ближайшее следующее происшествие и т. д. Джеймс описывает этот процесс на схеме (рис. 4.2).

> Если a, b, c, d, e, например, суть элементарные нервные пути, возбужденные последним фактом званого обеда

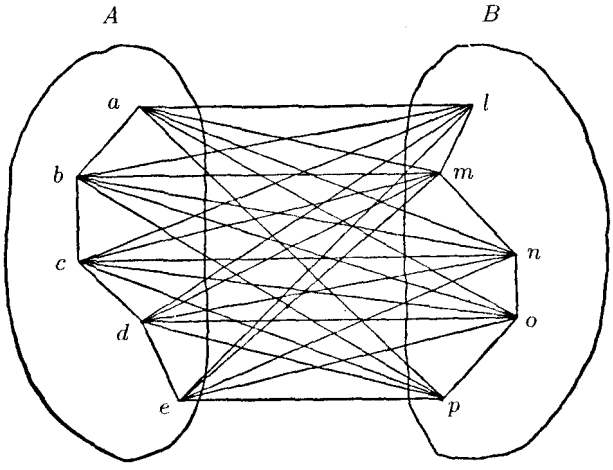


Рис. 4.2. Геометрическая модель ассоциативной сети Уильяма Джеймса

(назовем его A), а l, m, n, o, p суть нервные пути, возбужденные возвращением домой в морозную ночь, что мы обозначим буквой B, то мысль об A должна вызвать мысль о B, так как a, b, c, d, e, каждое в отдельности и все вместе, разрядятся в по путям, по которым произошел их первоначальный разряд. Подобным же образом они разрядятся в m, n, o, p, и эти последние пути, каждый в отдельности, также усилят действие других, так как в опыте B они уже вибрировали в унисон. Линии на рис. 4.2 символически обозначают сложение разрядов, в каждом из слагающих B, и силу, получающуюся от сочетания влияний, при помощи которых B вызывается в памяти во всей его полноте [4.19].

Джеймс убежден, что «порядок представления материалов разума обязан только физиологии коры головного мозга». В рамках современного подхода теории сложных систем, для описания вызванных макроскопическими нейронными клеточными ансамблями ментальных состояний используются параметры порядка. В следующих разделах мы увидим, что многие основополагающие прозрения философов от досократиков до Канта и Джеймса относительно работы разума, по существу, не изменились и сегодня.

4.2. Сложные системы и нейронные сети

В XIX в. физиологи обнаружили, что макроэффекты, такие как ощущения, зрение, мышечные движения и т. п., отображаемые нервной системой, зависят от отдельных клеток. Эти клетки способны получать и передавать сигналы, вызывая электрический ток и откликаясь на него. Очевидно, что нервная система и мозг оказались одной из самых сложных систем, созданных в процессе эволюции природы. В человеческом мозге имеется по меньшей мере десять миллиардов нервных клеток (*нейронов*). Каждый нейрон получает входные сигналы от других клеток, суммирует их, генерирует выходной сигнал и пересылает его другим нейронам. Прием входных сигналов осуществляется специальными *синапсами*, в то время как выходные сигналы посылаются по специальным выходным линиям, которые называются *аксонами*.

Сам нейрон является сложным электрохимическим устройством, поддерживающим постоянный внутренний мембранный потенциал. Если мембранный потенциал превышает пороговое значение, нейрон передает дискретный потенциал возбуждения к другим нейронам. Нервные импульсы возникают в теле клетки и распространяются по аксону с одной или более ветвями. Неврологи обычно различают возбуждающие и ингибиторные синапсы, что делает более или менее правдоподобным гипотезу о том, что нейрон генерирует потенциалы возбуждения. Окружающие нейрон *дендриты* могут получать входящие сигналы от десятков до тысяч других нейронов. Активность нейрона измеряется его частотой возбуждения. Биологические нейроны не являются двоичными системами, так как выходные импульсы непрерывны. Однако многие упрощенные модели нейронных сетей используют двоичные вычислительные элементы [4.20].

Мозг представляет собой сложную систему таких клеток. Однако в то время как отдельный нейрон не видит, не размышляет и не запоминает, мозг на все это способен. Зрение, размышление и запоминание считаются

функциями более высокого уровня. Ученые, предпочитающие стратегию подъема снизу вверх, полагают, что пока не будет исследовано и объяснено каждое отдельное свойство каждого нейрона, нельзя ни исследовать, ни понять мозговые функции более высокого уровня.

Важным достижением подхода, основанного на теории сложности, было осознание того факта, что эффекты, возникающие в системе в целом, являются системными эффектами, которые не могут быть сведены к отдельным элементам. С философской точки зрения, целое больше суммы его частей. Таким образом, стратегия исследований мозговых функций только снизу вверх должна потерпеть неудачу. С другой стороны, защитники стратегии исследований только сверху вниз, утверждающие, что познание полностью независимо от нервной системы, сталкиваются со старой картезианской дилеммой: «Каким образом дух движет машиной?».

Традиционные точки зрения в философии разума (см. разд. 4.1) в большей или меньшей степени защищали одну из этих стратегий исследования. В XVIII в. Лейбниц и позднее зоолог Бонне уже предполагали, что в природе существует шкала сложности с более или менее высокоразвитыми уровнями организации. На рис. 4.3 показаны уровни организации нервной системы. Иерархия размеров анатомической организации изменяется на несколько порядков величины от размеров молекул до размеров всей центральной нервной системы (ЦНС).

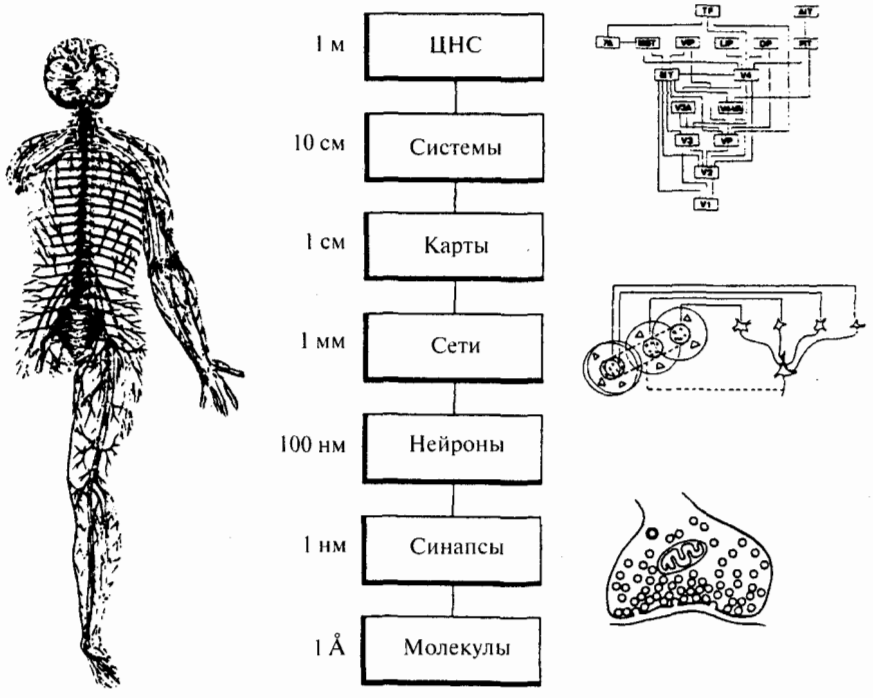


Рис. 4.3. Уровни сложных систем в центральной нервной системе (ЦНС): химический синапс, сетевая модель клеточных связей в зрительной коре и подсистемы зрительной коры

На шкалах учтены молекулы, мембраны, синапсы, нейроны, ядра, цепи, сети, слои, карты, отдельные системы и нервная система в целом. На правой стороне рисунка внизу показан химический синапс, посередине — сетевая модель того, как клетки ганглия могут быть связаны с простыми клетками зрительной коры, наверху — подмножество зрительных областей в зрительной коре, и слева — вся ЦНС.

Перспективы исследований этих иерархических уровней могут, например, касаться вопросов о том, как сигналы интегрируются в дендритах, как нейроны взаимодействуют в сетях, как сети взаимодействуют в системе зрения, как системы взаимодействуют внутри ЦНС и, наконец, как ЦНС взаимодействует с окружающей средой. Каждый ярус можно охарактеризовать некоторым параметром порядка, определяющим конкретную структуру яруса, вызванную сложными взаимодействиями подсистем с учетом конкретного уровня иерархии. Начиная с нижнего уровня, мы можем, например, различать порядки движения ионов, конфигураций каналов, потенциалов действия, потенциальных волн, передвижения, восприятия, поведения, ощущения и мышления.

Совершенно очевидно, что важной функцией нервной системы является отслеживание и контроль условий жизни организма относительно окружающей его среды. Так, примером элементарного контролируемого состояния является температура организма. На высшем уровне изменение состояний окружающей среды требует упреждающего планирования и социальных взаимодействий, которые в процессе сложной культурной эволюции развили способности человека говорить, создавать произведения искусства, решать математические задачи и т. п.

С точки зрения Дарвина, эволюция нервной системы с ее все более сложными уровнями кажется движимой фундаментальной целью в природе — выживания сильнейшего. Некоторые специалисты по мозгу даже отстаивают крайнюю точку зрения, считая, что возникновение ментальных явлений, подобных абстрактному мышлению, есть всего лишь вид «эпифеномена», побочного явления, которое первоначально не было предусмотрено природой. Но вера в намерения и цели природы есть, конечно, лишь человеческая метафора, предполагающая существование некоторого секуляризованного божества по имени «природа», которое управляет эволюцией. Согласно подходу, основанному на теории сложности, каждый уровень ЦНС имеет свои функциональные особенности, которые не могут быть сведены к функциональным свойствам нижних уровней. Таким образом, с точки зрения некого уровня, абстрактное мышление можно рассматривать только как побочное явление, скажем, как систему, контролирующую температуру тела.

Чтобы построить модель мозга и его сложных способностей, достаточно различать следующие категории. В моделях *нейронных уровней* исследования сосредоточены на динамике и адаптивных свойствах каждого нейрона, чтобы описать нейрон как единичный элемент. В моделях *сетевых уровней* тождественные нейроны связаны между собой, чтобы выявить возникающие системные функции. В моделях *уровней нервной системы* несколько сетей объединяются и демонстрируют более сложные функции чувственного восприятия, двигательные функции, контроль стабиль-

ности и пр. В моделях *уровней интеллектуальной деятельности* описываются основные процессы познания, мышления, решения задач и т. п. Имитация этих процессов тесно связана со структурой искусственного интеллекта (ср. гл. 6).

С методологической точки зрения, мы должны сознавать, что модели никогда не могут быть полными и однозначными отображениями реальности. Например, в физических моделях маятника пренебрегают трением. В химических моделях молекул считается, что электроны находятся на орбитах, как планеты в Солнечной системе, что противоречит соотношению неопределенностей Гейзенберга. Тем не менее в определенных условиях эти модели полезны. Условия применимости моделей мозга определяются уровнями организации мозга. Если моделируется функция определенного уровня структуры мозга, такая модель должна принимать во внимание условия со стороны верхних и нижних уровней. Свойства более высоких уровней часто несущественны. В общем случае методология моделирования определяется расчетом методологических затрат и прибылей. Модель человеческого мозга, которая была бы реалистичной во всех отношениях, требует сверхвысокой стоимости исследования и конструирования. Она никогда не будет удовлетворять желаемым требованиям, и поэтому такая модель непрактична. Ученые добились бы больших успехов, если попробовали бы моделировать каждый уровень структуры мозга с учетом упрощений, касающихся нижних уровней. С другой стороны, модели должны быть достаточно содержательными, чтобы выявить существенные сложные свойства структуры мозга.

Согласно методам нелинейной динамики, функции мозга должны моделироваться подходящим пространством состояний и фазовым портретом его динамических траекторий, описывающим мозговую активность. Французский математик и философ Рене Декарт уже описывал координацию восприятия, движения руки и работы мозга в рамках (евклидовой) геометрии (рис. 4.1).

В наши дни нейронные сети геометрически характеризуются векторными пространствами и матрицами весов. Электрохимические входные сигналы нейронов связаны с выходными сигналами с помощью весов. В схематическом срезе мозжечка (рис. 4.4) веса в нейронной матрице позволяют сети вычислить с помощью матричного умножения вектор выходящего сигнала по вектору входящего сигнала [4.22].

В примере на рис. 4.4 рассматривается матрица весов размера 3×4. Нейрофизиология требует большой гибкости моделирования, так как нейронная сеть может быть довольно сложной. Но матрицы связности могут приводить к преобразованиям пространств состояний высокой размерности в другие пространства с иной размерностью. Математически такие преобразования высокой размерности могут породить геометрические проблемы, не решаемые с помощью элементарного формализма аналитической геометрии. В этом случае необходима теория обобщенных тензорных сетей, позволяющая управлять сложными задачами координации. С исторической точки зрения, поразительно, что необходимость перехода от евклидового пространства к более общим топологическим и метрическим пространствам может быть сформулирована не только в физике

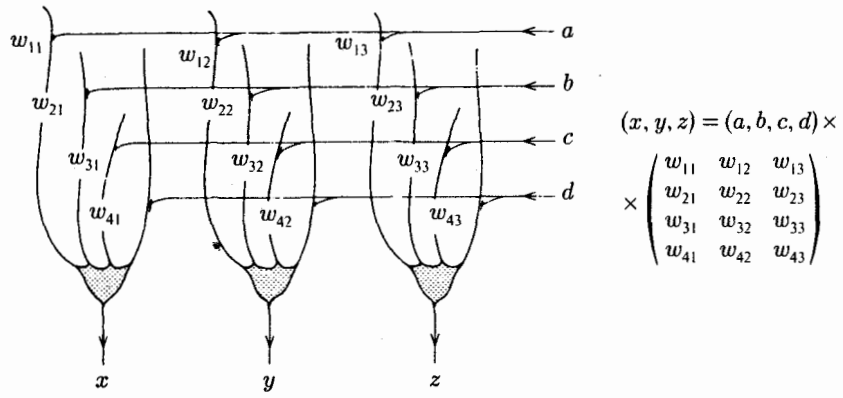


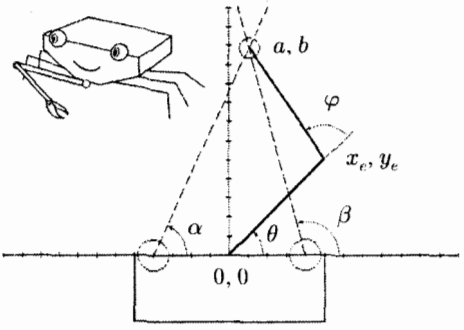
Рис. 4.4. Схематический срез мозжечка, смоделированный с помощью умножения на матрицу весов [4.22]

космоса в рамках общей теории относительности, но и для внутренних свойств нервной системы.

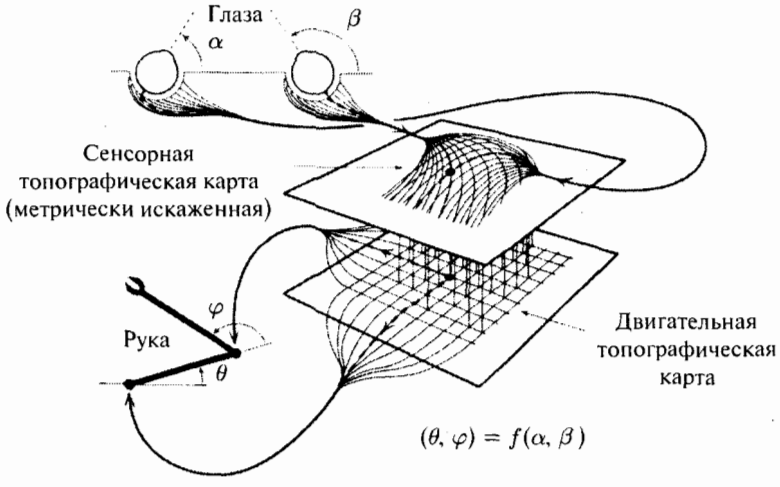
Отдавая должное ранним попыткам Декарта, рассмотрим элементарную сенсорно-двигательную координацию, представленную векторными или тензорными преобразованиями. Каким образом животное может схватить предмет, который оно воспринимает органами чувств (рис. 4.5 *а*)? В упрощенной модели положение двух глаз сначала кодируется в двумерном пространстве сенсорных данных. Пространство состояний можно зрительно представить себе как двумерную топографическую карту. Из точки в сенсорном пространстве состояний посылается сигнал в двигательное пространство состояний, также представленное двумерной топографической картой. Точка в двигательном пространстве состояний кодирует соответствующее положение руки (рис. 4.5 *б*) [4.23].

Другой пример сенсорно-двигательной координации — вестибулярно-зрительный рефлекс. Это нейронное устройство, с помощью которого животное может стабилизировать изображение предмета на сетчатке путем незаметных движений глаз в направлении, противоположном движению головы. В эту нейронную систему входят две нейронные структуры, которые можно представить разными координатными системами внутри ЦНС. Во-первых, мы должны проанализировать полукруглые каналы вестибулярного аппарата в ухе, по три канала с каждой стороны, которые можно представить трехмерной координатной системой. Во-вторых, каждое глазное яблоко имеет шесть расположенных вне глаза мускулов, соответствующих 6-мерной координатной системе. Таким образом, сенсорно-двигательная координация вестибулярно-зрительного рефлекса геометрически описывается тензорным преобразованием трехмерного (ковариантного) вектора. Математическая схема может быть использована для расчетов любого возбуждения глазной мышцы, возникающего от заданного сигнала вестибулярного аппарата.

На уровне нейронов и сетей для моделирования и изучения структуры мозга используются сети искусственных элементов [4.24]. Предполагается, что эти элементы изменяются от 0 до 1. Каждый элемент получает вход-



а)



б)

Рис. 4.5. *Сенсорно-двигательная координация восприятия и движения руки* [4.23] (*а*); геометрическая модель сенсорно-двигательной координации с помощью сенсорной и двигательной топографических карт [4.23] (*б*)

ные сигналы от других элементов через синаптические соединения с разными весами. Входящие и исходящие представления являются упорядоченными множествами значений, а исходящие элементы соответственно возбуждены. Математически процедуру можно интерпретировать как отображение некоторых входных сигналов, как аргументов, на соответствующие выходные сигналы, как значения функции. Функциональная зависимость определяется структурой весов, что зависит от топологии нейронной сети.

Нейроны в мозгу иногда образуют популяцию в виде входного слоя (рис. 4.6). Аксоны этих клеток направляются ко второму слою нейронов. Аксоны от клеток второго слоя могут затем направляться к третьей популяции клеток и т. д. Собранное мно-

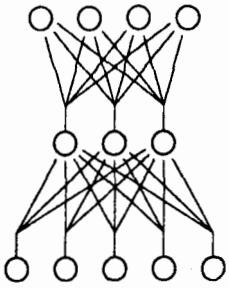


Рис. 4.6. Трехслойная сеть со скрытыми элементами

жество одновременно возбужденных уровней во всех входных элементах есть сетевое представление входного раздражителя в виде входного вектора. Этот входной вектор с его возбужденными уровнями распространяется вверх к среднему слою. В результате возникает множество возбужденных уровней, определяемых входным вектором входного слоя и рядом связанных весов на концах ветвей, идущих от входных единиц к нейронам среднего слоя. Этот вектор возбуждения среднего слоя распространяется все выше к самому верхнему слою элементов, где, в случае трехслойной сети, образуется выходной вектор. И вновь этот выходной вектор определяется вектором возбуждения на среднем слое и связанными весами на концах ветвей, идущих от средних элементов к элементам на выходе.

Двухслойная сеть, у которой есть только входной и выходной слои, соответствует простой схеме стимул—реакция с наблюдаемыми и измеримыми входными и выходными сигналами. В случае трехслойной сети элементы в среднем слое с их весами иногда не могут быть непосредственно измерены, и относительно них можно только выдвигать гипотезы, как у скрытого механизма в черном ящике. Поэтому они называются скрытыми элементами.

Конечно, в реальных нервных системах наблюдается значительно больше элементов и слоев. Например, структура коры головного мозга у человека содержит по меньшей мере шесть различных слоев нейронов. Кстати, отображение входных сигналов на выходные с помощью матрицы весов в мозжечке на рис. 4.4 можно описать как двухслойную сеть с входным и выходным слоями. Трехслойная сеть эквивалентна паре последовательно соединенных матриц весов. Но такой тип многослойной сети нельзя обобщить на весь мозг и нервную систему, так как в популяции клеток в реальном мозгу часто видны протяженные соединения клетки с клеткой внутри данного слоя, которые должны рассматриваться в других моделях.

Согласно теории сложности, нейроны конкретного слоя можно интерпретировать как оси в пространстве состояний, представляющие возможные состояния возбуждения слоя. Развитие состояний, их динамика иллюстрируются траекториями, которые могут быть вызваны определенным процессом обучения конкретной сети.

Например, восприятие можно объяснить векторной обработкой информации в нейронной сети. Во-первых, имеется набор раздражителей, действующих на входные нейроны со стороны внешнего мира (например, электромагнитные световые сигналы, цвета в глазе или звуковые волны в ухе), который обрабатывается в нейронной сети, производя выходной вектор, представляющий, например, визуальную или звуковую картину внешнего мира. Однако нейронные сети должны научиться различать и распознавать правильные формы, цвета, звуки и т. д. в огромной массе входных данных.

Процедура обучения есть не что иное, как настройка многих весов таким образом, чтобы был достигнут желаемый выходной вектор (т. е. восприятие). Обучающие процедуры можно имитировать математическими алгоритмами, представляющими важный раздел исследований по искусственному интеллекту (см. разд. 5.3). Эти алгоритмы порождают на каждом нейронном слое весовые конфигурации, которые также можно представить с помощью векторов. В любой фиксированный момент времени полный набор синаптических значений определяет весовое пространство с точками на каждой оси, задающими размер конкретного веса. В общем случае обучение означает минимизацию ошибок или разностей между наиболее адекватным решением (восприятием, идеей и т. п.) и менее адекватным решением. Таким образом, процесс обучения можно наглядно изобразить как траекторию в пространстве весов, начинающуюся в начальном случайно установленном положении, и заканчивающуюся в конечном положении, отвечающем минимальной ошибке (рис. 4.7 *а*). При таком моделировании процесса обучения необходимы алгоритмы подстройки весов в соответствии с предъявляемыми образами. Такие алгоритмы были построены.

Предполагается, что всякий представимый мир может быть отображен в сети через конфигурацию весов.

На рис. 4.7 *а* показана траектория в синаптическом пространстве весов в течение процесса обучения. Это пространство, для простоты ограниченное тремя весами, представляет все возможные комбинации весов от синапсов в трехслойной сети (рис. 4.6). На рис. 4.7 *б* показано соответствующее пространство вектора возбуждения, оси которого – скрытые элементы трехслойной сети (рис. 4.6) [4.25].

Пространство весов и пространство возбуждений подобны, так как подобные векторы, представляющие подобные объекты, отображаются близкими положениями. Весовые конфигурации группируют подобные объекты с учетом того, что весовые конфигурации могут быть чувствительными к очень малым различиям между объектами. Таким образом, в пространстве возбуждений можно различать моделируемые векторы, представляющие подобные объекты с небольши-

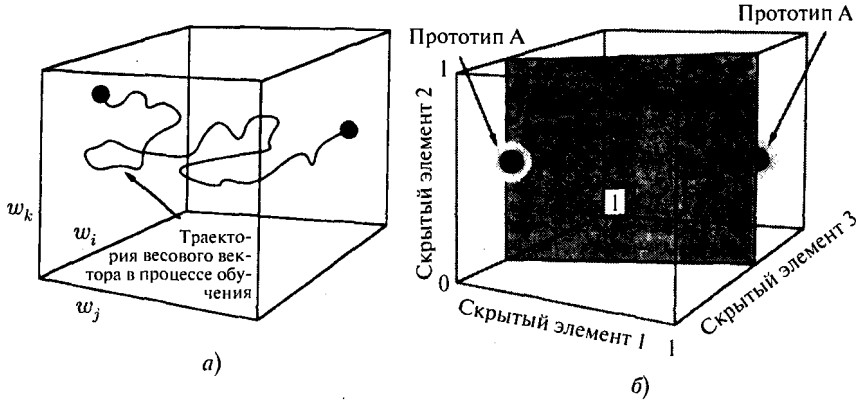


Рис. 4.7. Механизм процесса обучения с точки зрения теории нейронных сетей: траектория вектора весов во время обучения (*а*); пространство вектора возбуждений в трехслойной сети (*б*)

ми отличиями, измеряемыми их расстояниями до моделируемого вектора. На макроскопическом уровне наблюдения и поведения эти моделируемые векторы могут представлять конкретные типы деревьев, растений, плодов, людей и т. п., которые более или менее подобны. В рамках динамики сложных систем моделируемые векторы можно интерпретировать как точечные аттракторы, делящие пространство состояний на отдельные области их притяжения.

Подобное двигательное поведение (типа хватания, ходьбы и т. п.) представляется подобными траекториями в пространстве двигательных состояний. Как мы видели, обучение означает перестройку весов в соответствии с некоторой алгоритмической процедурой. Возникает ключевой вопрос: каким образом тысячи клеток и синапсов узнают, когда им нужно менять свои состояния, не руководствуясь при этом указаниями демона?

В знаменитой книге «Организация поведения» (1943) Дональд Хебб высказал мысль, что *обучение следует понимать как тип самоорганизации в сложной модели мозга*. Как и в эволюции живых организмов, вера в организующих «демонов» может быть отброшена и заменена самоорганизующимися процессами в рамках подхода теории сложности. Исторически это было первое явное утверждение физиологического правила обучения для синаптической модификации. В контексте сложной модели мозга Хебб использовал слово «связываемость». Он ввел понятие синапса, который позднее был назван «синапсом Хебба». Связь между двумя нейронами будет усиливаться, если активировать оба нейрона одновременно:

> Когда аксон клетки A достаточно близок к тому, чтобы возбудить клетку B, и периодически либо постоянно принимает участие в ее активации, имеет место определенный процесс роста метаболических изменений в одной или обоих клетках, так что эффективность A как одной из клеток, активирующих B, увеличивается [4.26].

В 1949 г. синапс Хебба мог рассматриваться только как гипотетическая сущность. В наши дни нейрофизиологическое существование этого синапса подтверждено экспериментально. Правило Хебба ни в коем случае не является математически точным утверждением. Позднее мы увидим, что возможны многие подобные хеббовскому правила обучения «связываемости». Простая математическая версия правила Хебба требует, чтобы изменение $\Delta\omega_{BA}$ веса ω_{BA} между нейронами A и B было пропорционально средним скоростям возбуждения v_A и v_B этих нейронов, т. е. $\Delta\omega_{BA} = \varepsilon v_b v_a$ с постоянной величиной ε.

Правила, подобные правилу Хебба, предлагают схемы, стремящиеся усилить предрасположенность нейронов к обучению «без учителя» извне. В этом смысле именно метод самоорганизации для активации нейронов стал все лучше и лучше коррелировать с кластером набора раздражителей. Хебб был уверен, что для представления чего-нибудь мозг использует глобальные структуры связанных нейронов. Он в явном виде использовал ставший ключевым для современной неврологии термин «клеточные ансамбли». Активные клеточные ансамбли могут соответствовать сложным восприятиям или мыслям. С философской точки зрения, идея Хебба о клеточных ансамблях напоминает концепцию ассоциаций Юма, которая

была лишь психологической и не имела физиологической основы в мозгу.

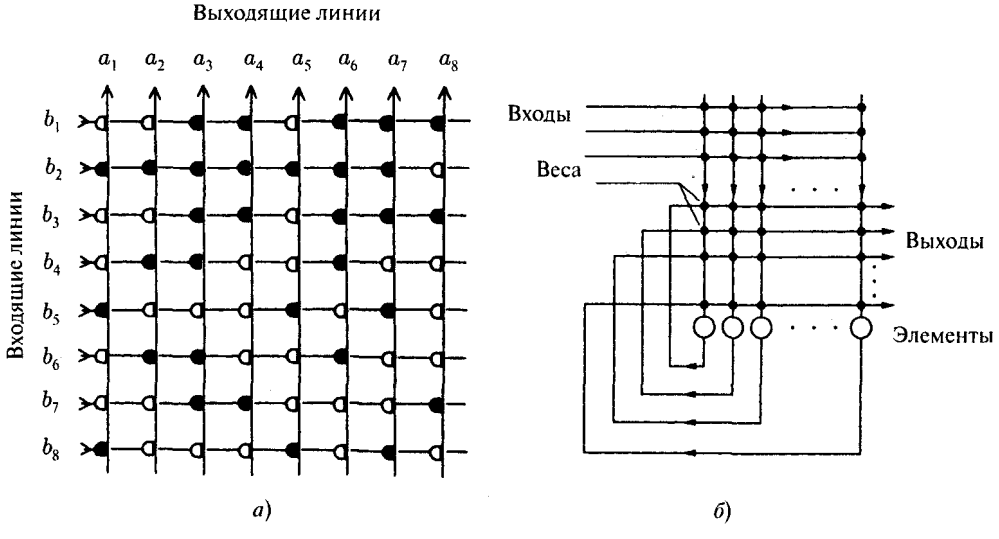
Каким образом физиологические идеи Хебба включились в современные сложные системы нейронных сетей? Основное понятие ассоциативной сети требует, чтобы входящий вектор был «ассоциирован» с выходящим вектором с помощью некоторого преобразования. Математически подобие двух векторов можно измерить их скалярным произведением, являющимся результатом суммирования произведений соответствующих компонентов обоих векторов. Геометрически скалярное произведение пропорционально косинусу угла между векторами. В случае полного совпадения векторов угол равен нулю, что означает полное подобие.

Следовательно, подобие хранящегося прототипа вектора (например, прототип картины типичного дерева) с входным вектором (например, восприятием конкретного дерева) можно рассчитать в ассоциативной сети с помощью вычисления их скалярного произведения. Предполагается, что прототип вектора сохраняется в матрице весов, связывающих вход и выход сети. На рис. 4.8 *а* показана сеть, входными компонентами которой являются горизонтальные входящие линии, выходными компонентами — вертикальные выходящие линии, а веса связей (рассматриваемых как бинарные, с открытыми кружочками для нуля и зачерненными — для единицы) заданы на пересечениях.

Если в общем случае входящий вектор (x_j) ассоциирован с выходящим вектором (y_j) линейным преобразованием

$$y_j = \sum_j w_{ij} x_j$$

с помощью сохраненного весового вектора w_{ij}, то получаем простой случай линейного персептрона. Этот вид ассоциативной сети способен классифицировать векторы, представляющие примеры некоторой категории, которая реализована сохраненным прототипом вектора. На самом деле



а) *б*)

Рис. 4.8. Линейная ассоциативная сеть (*а*); нелинейная сеть с обратной связью (*б*) [4.27]

подобная задача является ключевой для выживания животных. В действительности должно быть идентифицировано и добавлено в данную категорию множество более или менее подобных восприятий (например, враждебные животные).

Другой тип ассоциативной сети может осуществлять векторное завершение или векторную коррекцию. Так называемая автоассоциативная сеть может создавать выходной вектор, который как можно более близок к предварительно записанному в память вектору, представляющему только часть входного вектора. В действительности зашумленные версии входного вектора (например, портрет человека) должны быть дополнены согласно сохраненной картине. Правило, такое как правило Хебба, может осуществить эту задачу, усиливая веса связей между нейронами в соответствии со степенью их скоррелированной активности.

Метод увеличения производительности такой сложной сети состоит во введении нелинейного порога для выходящих элементов. Линейная ассоциативная сеть (например, рис. 4.8 *а*) имеет топологию прямой связи с информацией, текущей от входных элементов к выходным элементам. Обучающие процедуры хеббовского типа предполагают локальные взаимодействия нейронных элементов, сходящиеся за счет самоорганизации к правильному глобальному выходу. Циркуляция информации в сети означает архитектуру обратной связи. На рис. 4.8 *б* каждый элемент получает входные сигналы извне и сигналы обратной связи от внутренних элементов сети. Веса представлены пересечениями горизонтальных и вертикальных линий [4.27].

Очевидно, что сложная система на рис. 4.8 *б* моделирует сеть с нелинейной обратной связью, допускающую большое разнообразие возможного динамического поведения. Знаменитый пример был исследован Джоном Хопфилдом (1982). Его класс сетей с нелинейной обратной связью обладает динамическим поведением, сходящимся к решению. Эти сети интересны не только для моделирования мозговых функций, но также (как будет видно в гл. 6, посвященной искусственному интеллекту) для развития новой сетевой технологии. Что же касается нашего подхода, основанного на сложных системах, то стоит упомянуть, что Хопфилд — физик, применивший математические уравнения теории спиновых стекол к нейронным сетям [4.28].

Хорошо известным примером консервативной самоорганизации в тепловом равновесии является динамика ферромагнетика. В модели Изинга ферромагнетик состоит из решетки спинов, каждый из которых может находиться либо в состоянии «вверх» (↑), либо в состоянии «вниз» (↓). Каждый спин может взаимодействовать с ближайшими соседями. В состоянии с наименьшей энергией все спины выстроены в одном направлении. При высокой температуре направления спинов случайны, так как тепловая энергия, вызывающая флуктуации, больше, чем энергии взаимодействия. Если температура уменьшается, спины выстраиваются в одном направлении. Очевидно, что спины ведут себя, как магниты (ср. разд. 2.4). С динамической точки зрения, представляется, что система ищет ближайший локальный минимум энергии как аттрактор — притягивающее множество в фазовом пространстве (рис. 4.9 *а*). Но единственный минимум энергии со всеми спинами, направленными в одну сторону, достигается только в случае, когда все взаи-

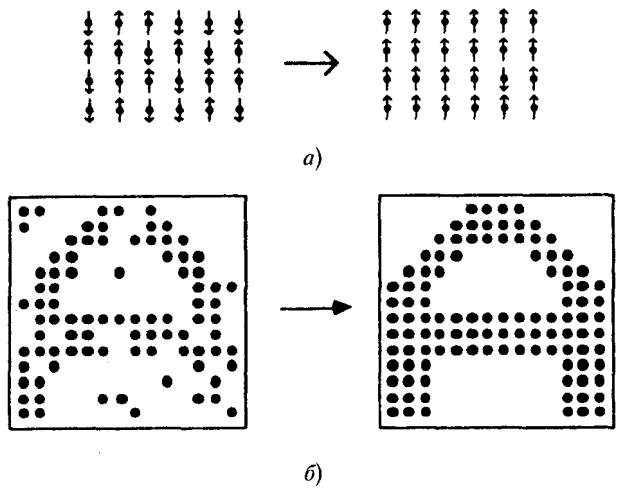


Рис. 4.9. Самоорганизация, связанная с фазовыми переходами, лежит в основе многих нейронных сетей, обладающих ассоциативной памятью: фазовый переход в двумерной модели Изинга ферромагнетика (отжиг) (*а*); фазовый переход в системе Хопфилда для распознавания образа (*б*)

модействия имеют характер притяжения. В случае различных взаимодействий, в которой есть и притяжение, и отталкивание, у сложной системы типа спинового стекла может быть много локальных минимумов энергии [4.29].

Хопфилд предположил, что функция нервной системы состоит в том, чтобы выявлять ряд локально устойчивых точек в пространстве состояний. Другие точки в этом пространстве стремятся к устойчивым точкам как к аттракторам системы. При исчезновении отклонений от устойчивых точек такая динамика является самокорректирующейся процедурой. С другой стороны, устойчивая точка должным образом завершает пропущенные части неполного входного вектора состояний. Таким образом, эту динамику можно использовать для разпознавания и корректировки зашумленных входных сигналов.

Модель Хопфилда является довольно упрощенной и включает пороговые логические элементы, суммирующие синаптические входы и сравнение суммы с порогом. Если сумма равна пороговому значению или превысила его, синаптические элементы получают значение 1, в противном случае – значение 0. Сеть является рекуррентной в том смысле, что нейроны связаны друг с другом, но не сами с собой. Математически – соответствующая матрица весов содержит нули на главной диагонали. Для конструирования элементов матрицы весов Хопфилд предложил обучающее правило типа правила Хебба. Сложная система эволюционирует, как модель Изинга для спинового стекла, в соответствии с динамикой нелинейной обратной связи. Слагаемое, эквивалентное энергии, уменьшается, пока не достигает минимума (возможно, локального).

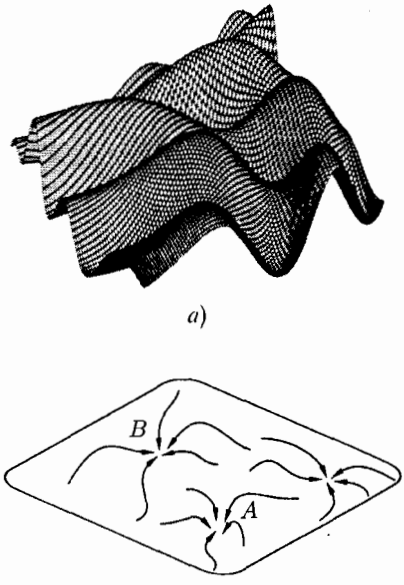
Простым приложением является хорошо известная задача распознавания буквенно-цифровых символов. Сложная сеть состоит из взаимодействующих булевых переменных, представленных на двумерной решетке.

Образ (например, буква А) может быть сопоставлен решетке с зачерненной точкой для всех активных переменных (со значением 1) и светлой точкой для тех переменных, которые имеют значение 0. Предполагается, что буквы алфавита ассоциированы с аттракторами («неподвижными точками»), представляющими желаемые состояния динамической системы. Можно представить, что, наблюдая много правильных примеров, человеческий мозг сохранил в памяти правильные формы букв. Если системе предъявляется неполная и частично поврежденная буква, то она способна реконструировать заученную ранее правильную форму (рис. 4.9 *б*) [4.30].

Таким образом, распознавание образов в этом случае означает эволюцию образов за счет самоорганизации. Этот процесс направлен на некоторые аттракторы, сформированные в процессе обучения сети, как на желаемые состояния системы. Не забудем, что аттрактор — это состояние, к которому может эволюционировать система, находившаяся в определенных начальных условиях. Область (поверхность отклика) притяжения определяется множеством начальных условий, которые ведут траектории системы к данному аттрактору. Как объяснялось в предыдущих разделах, аттрактор может быть неподвижной точкой, что мы видели на примерах сетей Хопфилда и систем спиновых стекол. Но возможны также периодическая последовательность состояний («предельный цикл») или определенные формы хаотических аттракторов (в диссипативных системах). Таким образом, сети Хопфилда — это лишь первый и упрощенный подход к моделированию нейронных состояний аттракторами сложных систем.

Хопфилд увидел аналогию между локальными минимумами энергии в спиновых стеклах и прототипами образов в ассоциативном мозге. В формальных рамках спинового стекла аттракторы могут быть обозначены как векторы прототипов. На рис. 4.10 *а*, по аналогии с термодинамикой спиновых стекол, пространство состояний системы Хопфилда наглядно представлено как энергетический рельеф. Всем возможным состояниям сети соответствуют точки на плоскости. Высота поверхности отражает энергию соответствующего состояния сети.

На фазовом портрете системы на рис. 4.10 *б* видна сходимость траекторий из разных начальных точек к устойчивым локальным минимумам. Каждая точка на плоскости есть состояние сети. Энергетический рельеф



а)

б)

Рис. 4.10. Модель Хопфилда — динамическая система, аттракторами которой являются устойчивые особые точки: пространство состояний системы Хопфилда как энергетический ландшафт (*а*); локальные минимумы как аттракторы (*б*)

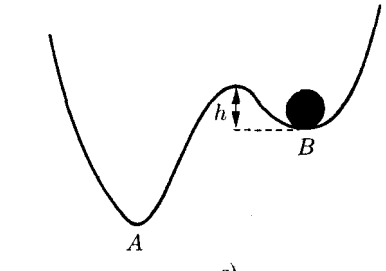
содержит впадины, притягивающие траектории динамической модели Хопфилда. На дне впадин находятся устойчивые точки (аттракторы). В примере по распознаванию образов прототипы букв связаны с ними. Таким образом, процесс дополнения образов есть форма релаксации, которую можно формально сравнить с процессами отжига в консервативной самоорганизации. В физических примерах конечные состояния являются упорядоченными структурами спинового стекла, намагниченного ферромагнетика или замерзшего кристалла [4.31].

В общем случае точки в фазовом пространстве, характеризующие состояния сети Хопфилда, сходятся к локальным минимумам в состояния низшей энергии. В некоторых приложениях локальные минимумы ассоциируются с конкретными заполненными образами, и нет нужды в достижении глобального минимума. Однако во многих случаях глобальный минимум требуется. Для решения этой задачи предлагалось сделать отдельные элементы стохастическими, а не детерминированными.

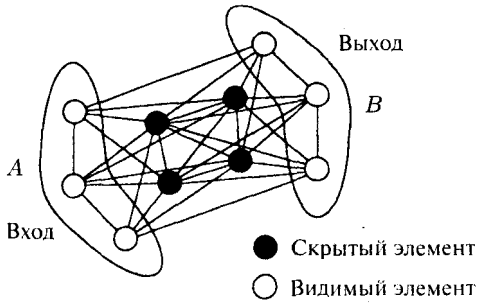
На рис. 4.11 *а* решение наглядно представлено в виде мяча, скатывающегося по кривой энергетического рельефа и, вероятно, заканчивающего свой путь в самом глубоком минимуме. Стартуя из заданной начальной точки, мяч будет двигаться к минимуму энергии, или дну ямы. Если энергетический рельеф характеризуется множеством близко расположенных минимумов, результат зависит от начальных условий. Каким образом можно предотвратить застревание сети в локальном минимуме? Идея состоит в том, чтобы потрясти энергетический рельеф с определенной амплитудой энергии, требуемой для того, чтобы выбраться из локального минимума B и попасть в аттрактор в глобальном минимуме A.

Далее, с механической точки зрения, мяч с большей вероятностью перейдет из B в A, чем из A в B. В среднем, мяч должен завершить путь во впадине A. На термодинамическом языке, кинетическая энергия, добавленная при сотрясении рельефа, соответствует увеличению температуры системы. При достаточно высоких температурах уже нельзя пренебрегать вероятностью перехода между впадинами. В тепловом равновесии вероятность занять определенные впадины зависит только от их глубины.

На практике метод *отжига* хорошо известен и используется для гло-



а)



б)

Рис. 4.11. Принцип работы машины Больцмана: фазовый переход от локального минимума B к глобальному уровню A в энергетическом ландшафте, связанный с отжигом (*а*); сеть машины Больцмана [4.33] (*б*)

бальной оптимизации. Как мы уже отмечали, отжиг, идею которого мы описали выше, есть процесс нагревания вещества (например, металла или стекла) до высокой температуры, а затем постепенного снижения температуры. Но вещество попадет в конечное состояние с глобальным минимумом энергии, только если процесс отжига будет достаточно медленным. Внезапное охлаждение, например, металла, приведет к тому, что вещество попадет в хрупкое состояние с локальным минимумом энергии. Отжиг делает возможным выход из локального минимума, допуская перескоки в состояния с большей энергией.

В термодинамике газ описывается вероятностью фазового перехода. В свое время Больцман вывел распределение вероятностей состояний газа, достигшего постоянного распределения температуры. Хинтон, Сейновски и др. заявили, что это распределение можно использовать для описания нейронных взаимодействий. В такой модели добавленное к системе слагаемое, отвечающее низкой температуре, интерпретируется как малое шумовое слагаемое. Это нейронный аналог случайных тепловых движений молекул в газах.

Такая формальная эквивалентность стала причиной того, что рассматриваемую сеть назвали «машиной Больцмана» [4.32]. Но, конечно, при сведении нейронных взаимодействий к молекулярным взаимодействиям в газах не требуется никакого физикализма. В больцмановском формализме можно доказать, что машина Больцмана с гарантией обнаружит желаемый глобальный минимум, если только она охлаждается достаточно медленно. Конечно, нейронная сеть с динамикой отжига способна находить пространство состояний для образа, отвечающего глобальному минимуму энергии.

Согласно этой динамической модели, возможное правило обучения состоит в сравнении вероятностей между сетью и окружающей средой. В тепловом равновесии допустимы все возможные состояния сети, и их относительные вероятности даются распределением Больцмана. Если вероятности состояний в сети совпадают с вероятностями состояний окружающей среды, то сеть является адекватной моделью такой среды. Таким образом, правило обучения должно быть способно настраивать веса в машине Больцмана так, чтобы уменьшать расхождение между моделью сети и окружающей средой.

На первый взгляд, такое правило позволяет системе работать на холостом ходу. Можно оценить вероятности состояний, в которых находится каждый элемент. Затем входные и выходные элементы закрепляются или принудительно принимают соответствующие значения. После этого опять оцениваются вероятности состояний элементов. Локальное изменение весов пропорционально разности вероятностей элементов, связанных данным весом [4.33].

Формально правило модификации весов утверждает, что

$$\Delta w_{ij} = \varepsilon(\langle s_i s_j\rangle \text{ закрепленные} - \langle s_i s_j\rangle \text{ свободные})$$

где ε — константа пропорциональности («скорость обучения»), s_i — двоичное значение i-го элемента, а после того как система достигает равновесия, $s_i s_j$ усредняется по времени и становится равным $\langle s_i s_j\rangle$. В закрепленных условиях входные и выходные элементы фиксированы и равны своим правильным значениям. В свободных условиях ни один из элементов не фиксирован. Тогда правило

обучения является неконтролируемым. Если входные элементы фиксированы в свободных условиях, правило обучения контролируется.

На рис. 4.11 *б* элементы сети в больцмановской машине принимают двоичные значения, а связи между ними обоюдны [4.33]. Веса связей в соединениях можно сформировать, представляя образы входных элементов при наличии или отсутствии выходных элементов и применяя правило обучения Больцмана. В процессе обучения каждый вес в сети модифицируется. Скрытые элементы, которые не получают непосредственную информацию извне, позволяют сети выработать сложные ассоциации между входными и выходными образами. Таким образом, машина Больцмана со скрытыми элементами в среднем слое обладает внутренними представлениями об окружающей среде, которые невозможны в сетях, содержащих только видимые (входные и выходные) элементы.

С точки зрения нейробиологии, в природе контролируемое обучение с «учителем» представляется довольно нереалистичным. Выделение признаков или категоризация у животного должна быть самоорганизована на основе анализа чувственных входных сигналов. Чем чаще признак возникает во входных векторах, тем вероятнее он должен принадлежать определенной категории. Выходные сигналы сети должны каким-то образом сходиться к соответствующим векторам-прототипам как к аттракторам.

Как можно создать сеть, включив в нее критерии классификации, без контроля со стороны внешнего учителя? Ряд авторов предполагает, что этот тип самоорганизации зависит от нелинейных взаимодействий и селективного усиления связей в многослойной системе. Процедура обучения организована в дарвиновский процесс отбора и конкуренции.

На рис. 4.12 представлена многослойная архитектура системы конкурентного обучения, осуществляющая такие, по существу, познавательные задачи, как классификация и категоризация [4.34]. Активные элементы представлены черными точками, неактивные — светлыми. Связи от входного слоя к каждому элементу второго слоя являются возбуждающими. Второй слой подразделяется на кластеры, внутри которых каждый элемент подавляет все другие. Элементы одного кластера конкурируют друг с другом, реагируя на входной образ. Согласно правилам Румельхарта и Ципсера, элемент может обучаться только в случае, если он может выиграть соревнование с другими элементами внутри того же кластера. Обучение означает увеличение сигналов в активных связях и уменьшение — в неактивных.

Простая задача классификации опирается на то, как ребенок распознает слово. Очевидно, что двухбуквенные слова AA, AB, BA и BB можно расклассифицировать по нескольким категориям, например, множество $\{AA, AB\}$ слов, начинающихся с буквы A, или множество $\{BA, BB\}$ слов, начинающихся с буквы B, или множество $\{AA, BA\}$ слов, заканчивающихся на A, или, наконец, множество $\{AB, BB\}$ слов, заканчивающихся на B. В экспериментах на компьютерах двухбуквенные слова представлялись состоящей из слоев сетью с одним уровнем конкурирующих элементов, организованных в кластеры из двух элементов. Система была способна определять положение букв. Один из элементов спонтанно обучился действовать как детектор

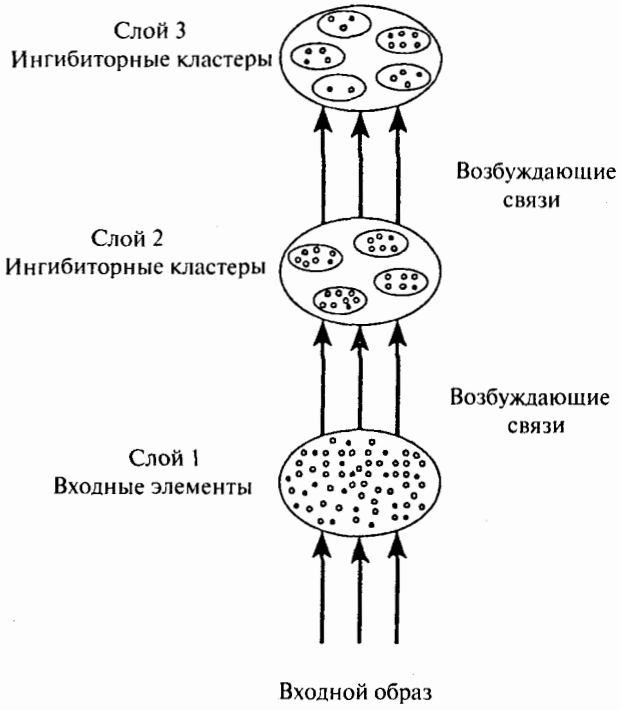


Рис. 4.12. Многослойная сеть с конкурирующим обучением [4.34]

буквы *A* как начальной буквы, а другой элемент детектировал *B* как начальную букву.

В дальнейших экспериментах одновременно с модификацией сетевой структуры было увеличено число букв. Хотя похоже, что эти эксперименты проиллюстрировали ограниченные возможности, они, по крайней мере в принципе, продемонстрировали возникновение когнитивного поведения в неконтролируемых нейронных системах. Эти эксперименты ознаменовали начало интересного исследования, связывающего нейрофизиологию с когнитивными науками в рамках теории сложных систем, которое будет более детально обсуждаться в разд. 4.4.

Другой подход к самоорганизующимся когнитивным системам, основанный на конкурентном обучении, был предложен Тойво Кохоненом. Он — физик, работавший также как физиолог над проблемой ассоциативной памяти. Выполненное Кохоненом математическое моделирование нейронных систем оказалось важным для инженерных приложений в исследованиях искусственного интеллекта (ср. гл. 5). Идеи Кохонена, касающиеся моделирования мозга с помощью самоорганизующихся характеристических карт, опираются на хорошо установленные анатомические и физиологические факты. Большинство нейронных сетей в мозгу является двумерными слоями, состоящими из блоков обработки данных, которыми могут быть клетки или клеточные модули. Эти блоки связаны друг с другом боковыми обратными связями. Например,

в коре головного мозга на каждую основную клетку приходится 10 000 взаимосвязей.

Синаптическая связь от нейрона к его соседям является возбуждающей для всех тех нейронов, расстояние до которых меньше определенной критической величины. Для нейронов, находящихся на большем расстоянии, эта связь тормозящая. Но если расстояния еще больше, связь опять становится слабо возбуждающей. Степень бокового взаимодействия математически моделируется кривой в форме мексиканской шляпы [4.35] (рис. 4.13 *а*).

Очевидно, что активность боковых связей стремится пространственно ограничить кластер. На рис. 4.13 *б* показан двумерный пример кластеризации, смоделированный сетью с квадратным массивом 21 × 21 блоков обработки данных. Явление кластеризации («пузырьки активности») зависит от степени положительной или отрицательной обратной связи, на которую могут оказывать влияние химические явления в нейронной сети. В действительности «пузырьки активности» не имеют правильной формы, характерной для модели. На рис. 4.13 *в* показаны распределения активности в коре головного мозга енота, представляющие не фигуры правильной формы, а довольно размытую карту [4.36].

Тем не менее можно показать, что явление кластеризации оказывается полезным и важным для процессов самоорганизации мозга. В то время как изначально активности нейронной сети распределены однородно,

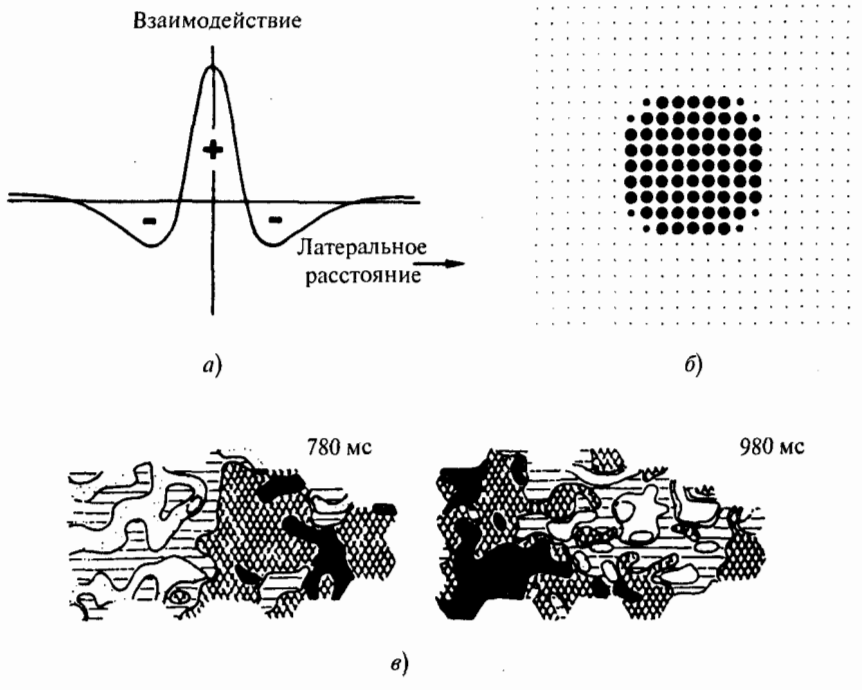


Рис. 4.13. Когнитивные системы на основе самоорганизующихся когнитивных карт: мексиканская шляпа нейронных взаимодействий (*а*); распределение активности нейронов в двумерной модели (*б*); кора головного мозга енота (*в*) [4.36]

можно далее наблюдать прогрессирующую специализацию областей нейронов в соответствии с самоорганизующимся процессом обучения. После предъявления входного образа для обучения выбираются нейрон с максимальной активностью и его соседи. Веса нейронов модифицируются в соответствии с круговой окрестностью данного радиуса с центром вблизи нейрона с наибольшей активностью. Это обучающее правило можно использовать для детектирования и категоризации сходства среди входных данных визуальных или речевых образов.

Формально Кохонен рассматривал нелинейную проекцию P из пространства V входных сигналов на двумерную карту A. На рис. 4.14 показан один шаг обучения: входное значение v выбирает центр s. В окрестности s все нейроны сдвигают свои веса w_s в направлении v. Степень сдвига уменьшается с ростом расстояния от центра s и наглядно проявляется в изменении серого цвета окрестностей нейронов [4.37].

За счет самоорганизации карта сходится к состоянию равновесия с различными областями активности. Проекция должна отображать сходство входных сигналов на сходство их образов на карте нейронов. Поэтому P, на математическом языке, называется топологически инвариантным отображением. Фактически, структура окружающей мозг среды, представляемая сходством сенсорных входных сигналов, должна проецироваться на нейронную карту мозга, который должен получить адекватную модель мира.

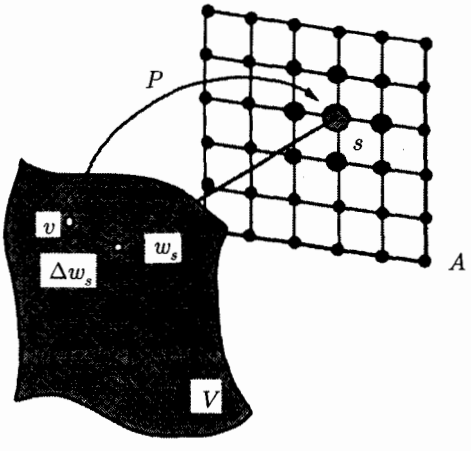


Рис. 4.14. Модель Кохонена самоорганизующихся нейронных карт [4.37]

Насколько реалистично моделирование мозга с помощью самоорганизующихся карт? Величина нейронного поля изменяется в зависимости от важности воспринимаемых чувственных раздражителей, что важно для выживания видов. В нейронном поле есть центры, которые могут анализировать и представлять раздражители с большей точностью, чем окружающую их среду. Например, тонкий анализ зрительной информации в глазу млекопитающего осуществляется «ямкой» — очень маленькой областью вокруг оптической оси сетчатки с очень большой плотностью чувствительных к свету рецепторов. Таким образом, дифференциация сигналов в этом центре существенно больше, чем в окружающей области нейронного поля. Аналогичные непропорциональные представления можно наблюдать в соматосенсорной[7)] системе и двигательной области коры головного мозга. Важность руки для выживания человека представлена той сравнительно большой зоной, которую занимают соматосенсорная и двигательная области коры головного мозга, по сравнению с представлением поверхности тела.

В противоположность этим результатам слуховая кора мозга кошек,

[7)] Соматосенсорный — относящийся к восприятию раздражения всем организмом, например, восприятие света кожей. — *Прим. пер.*

собак и обезьян не проецирует звуковые частоты внешнего мира специальными центрами. Исключением является летучая мышь с ее особой, необходимой для выживания системой ориентации. Летучие мыши способны испускать много различных ультразвуковых сигналов и, принимая отраженные от предметов сигналы, определять расстояние до предметов и их величину. Скорость летучей мыши относительно других тел она может определить с помощью эффекта Доплера для ультразвукового эхо. Такая чувствительная система способна определять даже движения крохотных насекомых.

Специальные свойства летучей мыши можно экспериментально подтвердить самоорганизующейся картой на ее слуховой коре. На рис. 4.15 *а* показан мозг летучей мыши и прямоугольником выделена область слуховой коры. На рис. 4.15 *б* эта область показана в увеличении вместе с распределением по слуховой коре наилучших частот. Одномерный частотный спектр представлен непрерывно и монотонно от задней до передней области слуховой коры. Частота, вызывающая наивысшее возбуждение нейрона, называется наилучшей частотой для данного нейрона. На рис. 4.15 *в* показано распределение наилучших частот в заштрихованной области рис. 4.15 *а*. Большинство измеренных точек группируется вокруг частоты ультразвукового эхо. Для анализа эффекта Доплера в сигнале ультразвукового эхо используется более половины переднезадней области. Примечательно, что компьютерное моделирование самоорганизующимися картами дает реальное представление о слуховой коре на рис. 4.15 *в* [4.38].

Мозг приматов состоит из большого числа областей с различной топологией нейронных сетей. Например, сетчатка развивается уже на ранней стадии онтогенеза[8]. Топология нейронов состоит из пяти отдельных слоев для фоторецепторов, горизонтальных клеток, биполярных клеток, амакринных клеток и клеток ганглий. Слой фоторецепторов у людей содержит примерно $120 \cdot 10^6$ рецепторных клеток. Выходной сигнал сетчатки, представленный пространственно-временной картиной возбуждения всех клеток ганглий, распространяется по оптическому нерву к таламусу. У людей имеется примерно $1{,}2 \cdot 10^6$ клеток ганглий. Таким образом, сетчатка представляет действительно сложную систему. Тем не менее сложность более чем $200 \cdot 10^6$ нейронов сетчатки все еще полностью не понята. Кора головного мозга – филогенетически самая молодая область мозга. В процессе эволюции отношение объема коры головного мозга к объему всего мозга увеличивалось. Низшие позвоночные, вроде рыб, вообще не развивали кору головного мозга. Величина коры росла от малых долей у рептилий и птиц до собак, кошек, и, наконец, обезьян и человека. У приматов кора головного мозга разделена на области с топологиями многослойных нейронных сетей, в том числе зрительную, осязательную, двигательную и ассоциативную кору. Мозжечок состоит из коры мозжечка со многими многослойными подобластями, служащими для выполнения конкретных сенсомоторных функций.

Разнообразные мозговые системы описываются как плотно упакованные множества нейронов со специфическими топологиями сетей, со-

[8] *Онтогенез – процесс индивидуального развития организма, филогенез – процесс эволюционного развития вида. – Прим. ред.*

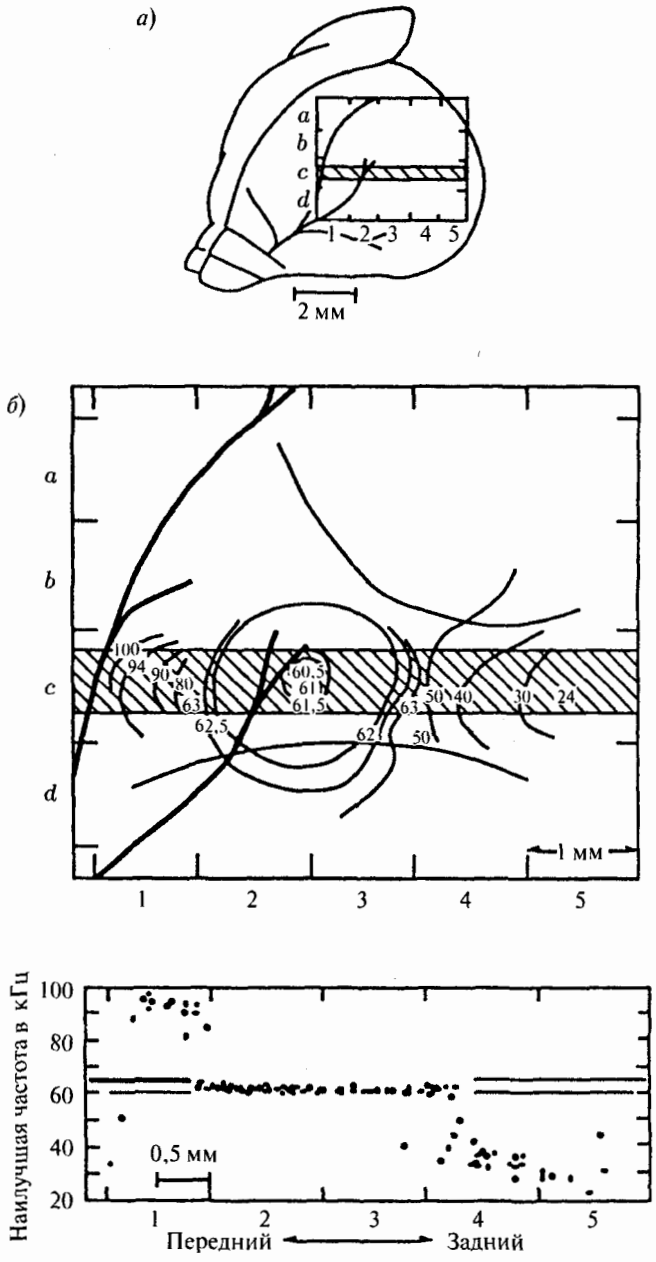


Рис. 4.15. Геометрия и характеристики слуховой коры летучей мыши: мозг летучей мыши со слуховой корой в прямоугольнике (*а*); увеличенное изображение области внутри прямоугольника (*б*); распределение наилучших частот (*в*)

общающиеся друг с другом с помощью множества нервов, состоящих из тысяч аксонов. По контрасту с цифровыми компьютерами с выделенным центральным процессором, памятью и регистрами, мозг и центральную нервную систему можно промоделировать как ансамбль из многих предназначенных для конкретных целей и параллельно работающих сетей. Каждая сеть способна независимо обрабатывать и сохранять информацию для сенсорных, двигательных и ассоциативных функций.

Очевидно, что биологический мозг не использует те принципы, которые известны из устройства централизованных программно управляемых цифровых компьютеров. Для структуры мозга фундаментальную роль играет процесс самоорганизации сети. В течение долгого периода филогенеза образовались сложные структурные формы, цели которых иногда не совсем для нас ясны. В макроскопическом масштабе конкретные области нейронов приспособились для анализа сигналов с разными сенсорными функциями, для операций обработки информации с разными уровнями, управления вегетативными функциями организма. Хотя эти функции распределены в разных областях мозга, их можно понимать как самоорганизующиеся сложные или коллективные явления.

Самоорганизация, как процесс обучения, демонстрирует, что организмы не полностью определяются генами, содержащими шаблон, детально описывающий организм. Каждая стадия организации мозга включает определенный тип самоорганизации. Гены не смогли бы запомнить сложную структуру мозга. Учитывая, что кора головного мозга содержит 10^{14} синапсов, онтогенез не смог бы выбрать правильную монтажную схему из всех альтернатив, если все они равновероятны. Таким образом, чтобы справиться со сложностью систем нейронов, онтогенез должен использовать их самоорганизацию. Но структуру коры нельзя понять, если неизвестны принципы ее онтогенеза.

В предыдущих главах мы изучали возникновение упорядоченных структур в сложных системах в физике, химии, биологии, метеорологии и астрономии. Глобальный порядок возникает в сложных системах с большим числом локально взаимодействующих элементов. Это могли быть взаимодействующие атомы или молекулы в жидкости или кристалле, выделенные объемы в эволюционирующей системе звезд или нейроны и синапсы в сложной нейронной системе типа мозга. Напомним читателю о конвекции Бенара (конвективные вращающиеся валы или шестигранные ячейки), возникающей в результате тепловых флуктуаций жидкости.

Каким образом можно организовать глобальный порядок с помощью локальных взаимодействий? Например, межмолекулярные силы, действующие в объеме жидкости, имеют очень короткий радиус действия, в то время как картина конвективного движения, вызванного молекулярными взаимодействиями, может быть упорядочена в больших масштабах. Этот принцип, проявляющийся в физической, химической и биологической эволюции, имеет важное значение для мозга, в котором локальные взаимодействия между соседними клеточными элементами порождают состояния глобального порядка, приводящие к согласованному поведению организма. Картина упорядочивания организуется силами, действующими между элементами сложной системы, а также начальными и граничными условиями. В примере с

конвекцией Бенара силы порождаются гидродинамическими взаимодействиями, теплопроводностью, тепловым расширением и гравитацией. Граничные условия — это, например, заданная температура жидкости. В мозге схемы соединений упорядочены рядом правил взаимодействия клеточных элементов. Так как нейроны связаны иногда очень длинными аксонами, локальное взаимодействие двух нейронов предполагает не их пространственную близость в анатомии мозга, а лишь их непосредственную связь через аксоны.

Хотя общая структура всех типов нейронов и синапсов универсальна, могут встречаться многочисленные качественные и количественные различия. Например, система нейронов у беспозвоночных детерминирована, причем значительная часть закодированной информации определяется особым местоположением отдельных нейронов. Для ассоциативной системы в коре головного мозга млекопитающих конкретные отклики на конкретные входные образы достигаются с помощью правил обучения, облегчающих обратное получение информации от выходного сигнала.

Насколько модели сложных систем адекватны реальным нейронным сетям? С методологической точки зрения, мы должны критично сознавать, что модели нельзя наивно идентифицировать с каждой функцией и каждым элементом реальности. Модели — это специализированные абстракции, способные объяснять и моделировать определенную часть центральной нервной системы, совершенно не касаясь других частей. Иногда модельные сети критикуют за то, что они, как черный ящик, только демонстрируют правильное исполнение функции входа-выхода. Но мы не можем ничего узнать и о том, как эту функцию исполняют биологические нейронные сети. Скрытые элементы были лишь теоретическими понятиями, такими как скрытые переменные в квантовой физике, которые, по предположению, являются внутренними элементами системы, реализующими связь между наблюдаемыми и измеряемыми входными и выходными значениями. Помимо архитектуры, возможно, многослойной сети, важными проблемами моделирования являются динамика и обучающие процедуры.

Насколько реалистичны процедуры настройки параметров модельных сетей для минимизации ошибок? Многие правила обучения модельных сетей требуют неприемлемо большого времени для сходимости к множеству правильно расклассифицированных весов. Хотя иногда и можно добиться успешной настройки весов, оптимальность этой процедуры ни в коей мере не очевидна. В 1960 г. Уайдроу и Хофф предложили простое и элегантное обучающее правило, побудительным мотивом для которого были соображения технической оптимизации, а не проникновение в биологические функции мозга [4.39]. В последние годы правило Уайдроу—Хоффа и его варианты широко использовались в технических нейронных сетях (см. гл. 6).

Правило предполагает, что задан входной образ, а также выходная классификация входного образа адаптивным нейроном, которая может принимать значения либо $a + 1$, либо $a - 1$. Таким образом, предполагается, что «учитель» знает, какой ответ правилен для данного входа. Адаптивный нейрон вычисляет взвешенную сумму активностей входных сигналов, умноженных на синаптические веса.

Система способна выработать сигнал ошибки между тем значением выходного сигнала, которое предполагается, и тем, которое вычислил сумматор. Синаптические веса настраиваются в соответствии с разностью этих сигналов, и сумма вычисляется вновь, пока сигнал ошибки не станет равным нулю.

Стратегия Уайдроу и Хоффа заключается в том, чтобы свести к наименьшему возможному значению квадрат сигнала ошибки. Значение ошибки порождают все возможные значения входных весовых коэффициентов. На рис. 4.16 ситуация наглядно изображена поверхностью ошибок в пространстве весов [4.40].

Минимум поверхности ошибок точно не известен, так как невозможно увидеть всю поверхность. Но можно измерить ее локальную топографию. Таким образом, направления подгонки, уменьшающие ошибку, в большинстве своем могут быть рассчитаны. Так называемый *метод градиентного спуска*, хорошо известный в дифференциальной геометрии, физике, теории оптимизации, всегда подстраивает веса так, что изменения весов сдвигают систему вниз по поверхности ошибок в направлении локально наискорейшего спуска.

На рис. 4.16 показан расчет градиента поверхности ошибок, с тем чтобы найти направление наискорейшего спуска. Веса изменяются, возрастая на определенное значение Δw вдоль этого направления. Процедура повторяется до тех пор, пока веса не достигают значения w_{ideal}, отвечающего минимуму ошибки. Для нелинейной сети поверхность ошибок может иметь много локальных минимумов. В общем случае проблемы с методом градиентного спуска связаны с возможностью попадания в

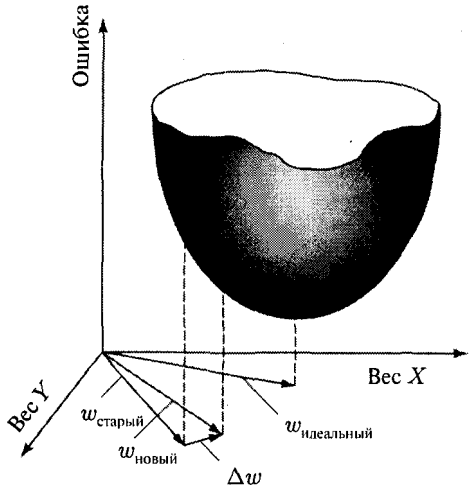


Рис. 4.16. Поверхность ошибок и обучение методом градиентного спуска [4.40]

локальные минимумы. В этом случае дно долины функции ошибок не соответствует наименьшей глобальной ошибке.

Уайдроу и Хофф доказали, что существует простая поверхность квадратичной ошибки только с одним глобальным минимумом. Математически вычисление градиента в данной точке означает вычисление частных производных от квадрата ошибки по весам. Уайдроу и Хофф доказали, что эта производная пропорциональна сигналу ошибки. Таким образом, измерение сигнала ошибки определяет направление движения, приводящее к корректировке ошибки. Технически для ряда специальных целей может быть оправдано существование «учителя» с идеальным знанием. Но предположение о существовании в природе определенных контролирующих обучающих процедур кажется довольно неправдоподобным.

Наилучшим из известных контролирующим алгоритмом в сетевых моделях является так называемое *обратное распространение ошибки*, являю-

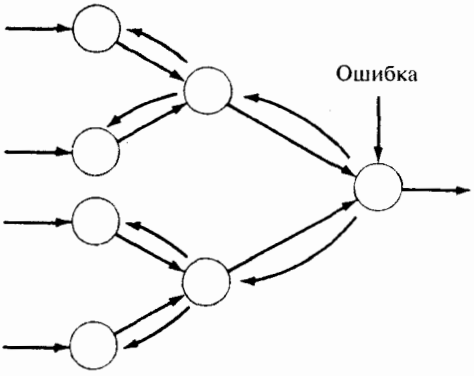


Рис. 4.17. Обратное распространение ошибки

щееся обобщением простого правила Уайдроу–Хоффа. Вкратце, обратное распространение ошибки – это обучающий алгоритм для настройки весов в нейронных сетях. Ошибка для каждого элемента, равная разности желаемого и реального выходов, может быть вычислена на выходе и рекурсивно передана назад в сеть. Этот метод позволяет системе решить, как следует изменить веса внутри сети, чтобы исправить ее характеристики. На рис. 4.17 показан метод обратного распространения ошибки через всю сеть с несколькими слоями [4.41].

Хотя модели с обратным распространением ошибки могут успешно описывать биологические сети, предположение о том, что реальный мозг организован по этому принципу, не рассматривается. Многие значения параметров реальной сети иногда известны благодаря измерениям и экспериментам в анатомии, физиологии и фармакологии. Например, можно грубо оценить число типов клеток и число самих клеток. Можно описать топологию и архитектуру сети, решить вопрос о том, какие конкретные синапсы являются возбуждающими, а какие – тормозящими, и т. д. Но конкретные веса остаются неизвестными. Когда этих весов тысячи, то вероятность того, что глобальный минимум мозговой сети точно совпадет, вес за весом, с минимумом модельной сети, довольно мала.

Таким образом, хотя стратегии минимизации ошибок в модельных сетях могут, в общем случае, быть гипотетическими, они необходимы для того, чтобы бороться со сложностями, вызванными наличием, возможно, тысяч неизвестных параметров. Эти стратегии позволяют предсказать некоторые локальные или глобальные свойства мозговых сетей при условии, что степень сходства топологии, архитектуры и синаптической динамики модели и мозговой сети достаточно высока. В нейробиологии метод обратного распространения ошибки используется как инструмент для поиска локальных минимумов, но не как замена нейробиологическому анализу, который может установить реальную обучающую процедуру нейронной сети.

Стратегия минимизации ошибок имеет давнюю традицию в эволюции природы и не возникла впервые в обучающих процедурах для мозга. Например, естественный отбор экологической популяции можно часто смоделировать как процесс спуска по градиенту ошибки к минимуму ошибки, представляющему нишу выживания в окружающей среде. Однако с помощью процедуры настройки параметров можно найти не обязательно глобальный, а лишь локальный минимум. Насколько мы знаем, эволюция, вообще говоря, находила не самое лучшее из возможных решение, а лишь удовлетворительное решение, достаточное для выживания. Эмпирически можно оценить только локальные минимумы всей эволюции по отношению к их эволюционному значению для выживания. Эта оценка зависит

от наблюдаемых и измеренных ограничений для выбранной модели.

Итак, с методологической точки зрения, представление о всегда глобально и идеально оптимизированной природе является метафизической фантазией. В оптимистичном веке Просвещения, чтобы заменить христианского Бога с его планом творения, родилась секуляризованная идея божества по имени «природа» или «эволюция». Уже Кант критиковал идею полностью самоорганизующейся природы, называя ее человеческой фантазией, которую нельзя ни в каком смысле эмпирически подтвердить. Не существует суперкомпьютера с отдельным центральным процессором, который мог бы полностью и в течение долгого времени оптимизировать эволюционную стратегию. Существуют только локально более или менее удовлетворительные решения, и еще больше ошибок, и несовершенство в реальных эволюционных процессах. Их сложность противоречит упрощенным моделям идеального мира по Лапласу.

4.3. Мозг и возникновение сознания

Каким образом можно объяснить сознание с помощью взаимодействия нейронов в сложных моделях мозга? Лейбниц уже столкнулся с проблемой, состоящей в том, что сознание, мысли и чувства невозможно найти в отдельных областях мозга, интерпретируемого просто как машина. Кант подчеркивал, что для одушевления физической системы необходима организующая сила. Вплоть до XX в. некоторые физики, биологи и философы верили в нематериальный организующий жизненный фактор, называвшийся «жизненным порывом» (Бергсон) или «энтелехией» (Дриш). С точки зрения сложных систем, интересным подходом была гештальтпсихология[9] Келера, ссылавшаяся на существование физических систем, в которых сложные психические структуры спонтанно возникали из собственной внутренней динамики системы. На простом языке, макроскопический образ («Gestalt») воспринимаемого объекта больше суммы его крохотных частей и не может быть сведен к микроскопическому масштабу.

Идея Келера состояла в том, что возникновение зрительных явлений можно объяснить в рамках термодинамических моделей. Но в те дни он мог ссылаться только на больцмановскую линейную равновесную термодинамику. Келер предположил: «Соматические процессы, лежащие в основе статических зрительных полей, являются стационарными равновесными распределениями, развившимися из внутренней динамики самой оптической системы» [4.42]. Келер даже понял, что организм не является замкнутой системой, и попытался объяснить возникновение упорядоченных состояний как особого типа интуитивно понимаемой совместной деятельности. В этом отношении Келер правильно отметил ясное различие между микроскопическим уровнем элементарных взаимодействий и макроскопическим уровнем возникающих упорядоченных состояний в синергетической[10] системе. Но для построения формализма термодинамики вдали от теплового равновесия

[9] Гештальтпсихология (от *нем.* облик, образ, форма) – одно из ведущих направлений западноевропейской психологии, подчеркивающее целостный и структурный характер психических образований. – *Прим. пер.*

[10] Синергетический эффект – эффект согласованного взаимодействия частей системы. – *Прим. пер.*

ему не хватило адекватной основы в виде теории сложных динамических систем.

Подход, основанный на теории сложных систем, дает возможность моделировать нейронные взаимодействия в мозговых процессах в микроскопическом масштабе и возникновение познавательных структур в макроскопическом масштабе. Следовательно, представляется возможным проложить мост через пропасть, разделяющую нейробиологию мозга и науку о мышлении, что традиционно рассматривалось как нерешаемая проблема.

Сложные модели включают пространства состояний и уравнения нелинейной эволюции, описывающие динамику системы. Человеческий мозг с его примерно 10^{11} нечувствительными нейронами представляется пространством состояний с 10^{11} измерениями. Даже типичная подсистема содержит около 10^8 элементов. В пространстве состояний с 10^8 измерениями и только 10 уровнями нейронного возбуждения существует по меньшей мере 10^{10^8} определенных положений, представляющих векторы возбуждения. Если предположить наличие 10^3 синаптических соединений между каждым нейроном и другими 10^8 нейронами подсистемы, то необходимо различать примерно 10^{11} синапсов. Следовательно, всего лишь для 10 определенных весов на каждом синапсе мы получаем чудовищное количество $10^{10^{11}}$ весов только в одной подсистеме. Такая сложность обеспечивает многочисленные возможности для кодирования, представления и обработки информации, что можно математически моделировать преобразованиями векторов и тензоров [4.43].

В самоорганизующейся карте Кохонена система самоорганизуется так, что соседние векторы отображаются на соседние точки сети. Иными словами, похожие образы представляются похожими векторами, находящимися на малых расстояниях от некоторых векторов-прототипов. При этом в сети векторы-прототипы интерпретируются как аттракторы. Таким образом, две разные категории или класса представляются двумя разными аттракторами в пространстве состояний (рис. 4.7 *б*). Процесс обучения сети включает такую настройку весов, при которой входной вектор (например, зрительный или звуковой образ) предлагается для сравнения наиболее похожему вектору-прототипу.

Понятие прототипа в нейронных пространствах состояний допускает интересные интерпретации познавательных процессов. Как сеть различает образ, если входной образ задан только частично? Проблема дополнения векторов жизненно важна для животных в лесу. Представьте себе койота в степи, увидевшего в траве хвост крысы (рис. 4.18 *а*). Входной образ на сетчатке койота ограничивается этой деталью крысы. Предположение или «гипотеза» о том, что в траве есть крыса, позволяет зрительной системе койота дополнить входной вектор ранее заученным вектором-прототипом крысы. В этом смысле можно сказать, что у койота есть «идея» крысы, представленная соответствующей структурой возбуждения прообраза в мозгу [4.44].

Пол Черчленд даже предлагает интерпретировать сильно развитые познавательные возможности человека с помощью подхода, основанного на векторах-прототипах. Так, объяснение и понимание сводится к возбуждению конкретного вектора-прототипа в хорошо обученных сетях. Эти векторы-прототипы включают

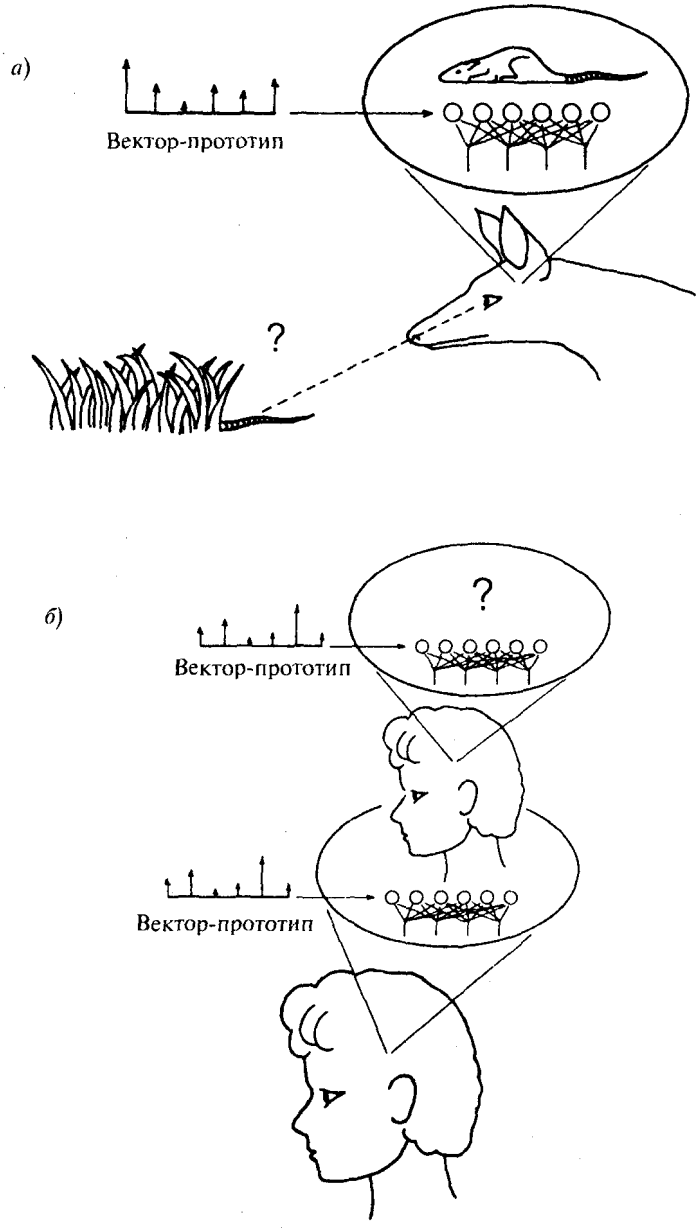


Рис. 4.18. Распознавание путем возбуждения прообраза в нейронных сетях: койот распознает хвост крысы (*а*) [4.44]. Саморефлексия путем итерации связанных с собой возбуждений прообраза (*б*)

огромный объем информации, которая может быть различной для разных людей. Причина этого заключается в том, что разные люди не всегда могут иметь одни и те же объекты, удовлетворяющие ограничениям, накладываемым на векторы-прототипы. Действительно, в большинстве случаев степень понимания у людей различается, хотя они классифицируют объект или ситуацию примерно одинаково. Например, плотник обладает более высокой степенью понимания того, что может быть стулом, чем большинство других людей. Тем не менее в большинстве случаев все придут к согласию. Таким образом, модель возбуждения прототипов довольно реалистична, так как она учитывает расплывчатость человеческих представлений и понимания.

В эпистемологии и когнитивной психологии обычно различают разные типы объяснений. Существуют классифицирующие объяснения («Почему кит — млекопитающее?»), причинные объяснения («Почему камень падает вниз?»), функциональные объяснения («Почему у птицы есть крылья?») и ряд других, которые соответствуют прообразам возбуждений кластеров, причинным связям, функциональным свойствам и т. п. Даже освоение социальных ситуаций — это вопрос возбуждения прототипов социальных взаимодействий, которым люди обучались в течение всей жизни.

В модели сложных систем психические состояния скоррелированы с нейронными структурами возбуждения мозга, которые моделируются векторами в пространствах сложных состояний. Внешние психические состояния, относящиеся к восприятию внешнего мира, могут быть доступны для проверки опытом и скоррелированы с возбуждениями нейронов в мозге. Каким образом мы можем проверить и объяснить внутренние состояния сознания, относящиеся не к событиям внешнего мира, а к самим психическим состояниям?

Хорошо известно, что мы можем рефлексировать по поводу наших саморефлексий, а также рефлексировать по поводу рефлексий по поводу наших саморефлексий и т. д., осуществляя в принципе неограниченный процесс итераций (рис. 4.18 *б*). Самопознание и саморефлексия приводят к понятию *самосознания*, которое традиционно рассматривалось как важнейшее понятие философии разума и когнитивной психологии. Самосознание определялось как ключевое свойство человеческой личности. Те определения самосознания, которые исторически обсуждались, представляют не только философский интерес. Очевидно, что эти предлагаемые определения приводят к важным следствиям для медицины и юриспруденции. Какие критерии должны быть выполнены, чтобы человеческое существо обладало сознанием и поэтому было бы ответственным за свои действия? Существуют ли медицинские критерии сознания? Как можно повредить или даже разрушить сознание? Что можно сказать о сознании животного? Можем ли мы чувствовать себя, как наш сосед или как животное?

Возникают фундаментальные вопросы: 1) существуют ли специфические процессы в мозге, приводящие к возникновению сознания? 2) можно ли с помощью сложных систем смоделировать возникновение сознания на основе известных мозговых процессов? Методологическая трудность заключается в том, что для самоанализа доступны только субъективные ощущения, например боли, запахов и т. п.

Эти субъективные состояния ощущения и сознания называют иногда феноменальными состояниями. Некоторые философы утверждали, что физическое описание мозговых состояний не способно ухватить суть того, что такое воспринимаемое состояние. Сторонники противоположной точки зрения утверждали, что понятия воспринимаемых состояний можно свести к понятиям нейрофизиологических состояний в мозге. Эти аргументы — не что иное, как современные вариации традиционных взглядов, известных как физикализм и ментализм (антифизикализм). Обе позиции представляют идеологический редукционизм и преувеличение,которые не подтверждаются исследованиями и не помогают их проводить [4.45].

Согласно подходу теории сложных систем, нейрофизиологические и ментальные состояния моделируются математическими средствами без редукционистских устремлений. Некоторые философы глубоко заблуждаются со своим предубеждением в отношении математики, поскольку они, похоже, верят, что одни только формулы могут обозначить «физические» состояния. Читатель может вспомнить, например, систему Хопфилда, содержащую формулу «энергии», по аналогии с формулой для энергии физической системы спинов. Тем не менее в рамках системы Хопфилда не следует отождествлять так называемую формулу «энергии» с энергией в физике твердого тела. Математическое выражение определяет всего лишь динамику сети, которая может воплощаться реальными биологическими мозгами, или компьютерами, созданными на кремниевой или другой основе.

Математическая модель эмпирически подтверждается, если она описывает наблюдаемые данные. В противном случае она должна быть модифицирована или отброшена. Мы должны быть уверены, что проверяемая и подтверждающаяся теория ментальных состояний и сознания не позволяет нам чувствовать себя как наш сосед. Например, врач или хирург, который хочет устранить у пациента боль в животе, не нуждается в том, чтобы самому чувствовать эту боль. Он должен хорошо знать устройство живота, основанное на анатомии, физиологии, биохимии, психологии и т. д. В терминах теории сложных систем, он должен знать возможные состояния живота и их динамику. В этом смысле модель ментальных состояний и сознания должна развиваться и проверяться без всяких редукционистских претензий.

Очевидно, существует много проверяемых корреляций между воспринимаемыми состояниями сознания и нейробиологическим функционированием мозга. Каждый знает, что краткий период кислородного голодания приводит к потере сознания. На степень сознания могут влиять также электрические стимуляции, психотропные лекарства, анестезия и повреждения мозга, что не только испытывается в самоисследовании (аутоцереброскопия), но может быть клинически проверено при наблюдениях и измерениях функциональных отклонений. Причина состоит в том, что мозг является открытой системой, состояния которой зависят от физического, химического и биологического метаболизма с окружающей средой вдали от теплового равновесия.

Сознательные и бессознательные состояния кажутся зависящими от довольно сложной нейробиологической системы, содержащей петли обратной связи и соединения на разных

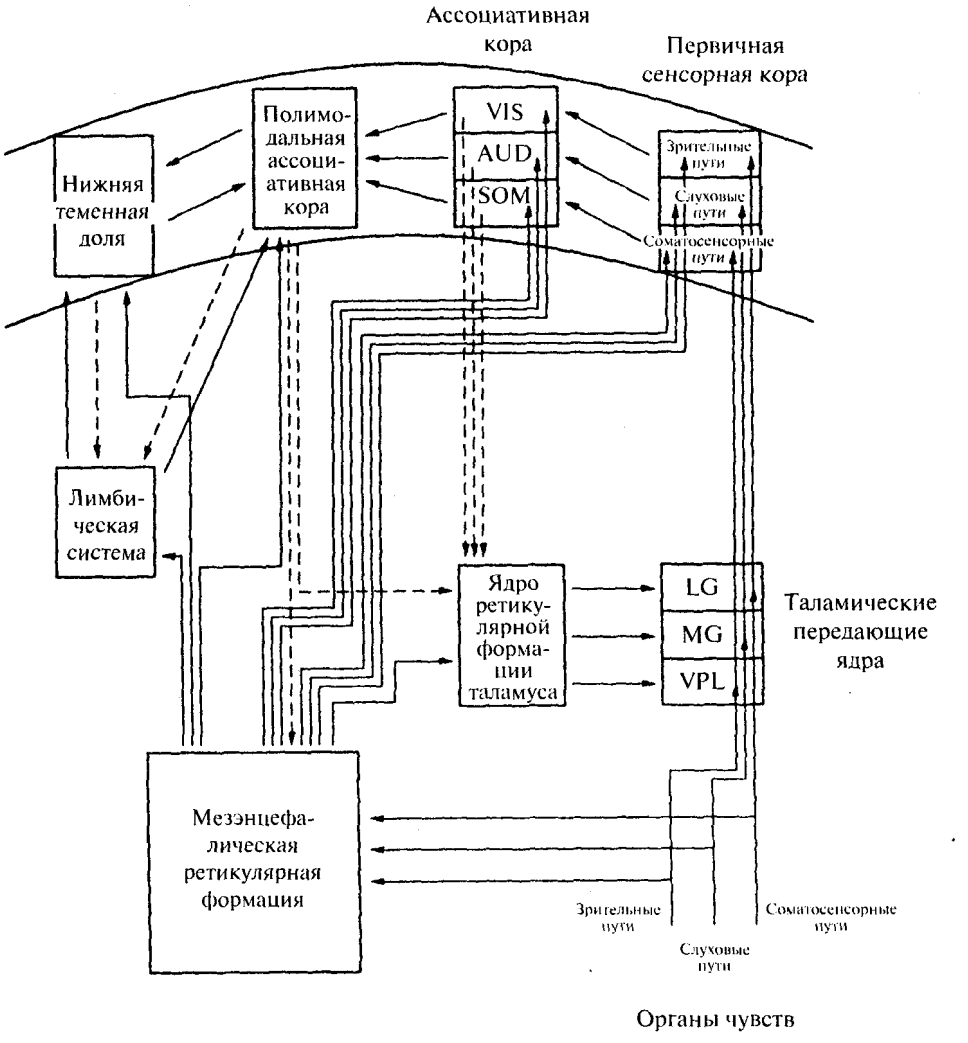


Рис. 4.19. Входные сигналы в кору головного мозга с соматосенсорными путями (SOM), слуховыми путями (AUD), зрительными путями (VIS), латеральным коленчатым телом (LG), медиальным коленчатым телом (MG), заднелатеральным нижним ядром (VPL) [4.46]

уровнях. На рис. 4.19 показана сеть коры головного мозга с ее подсистемами первичной сенсорной коры и ассоциативной коры. Специфические входные сигналы («афференты») от органов чувств достигают областей проекции первичной коры по специальным передающим подсистемам и путям. Неспецифические входные сигналы достигают коры от подсистемы под названием «мезэнцефалическая ретикулярная формация». Ретикулярная формация обозначает сложную сеть нейронов и нервных волокон с широко распределенными соединениями синаптических контактов. Из-

вестно, что она играет существенную роль при пробуждении, бодрствовании и внимании [4.46].

Повреждения в сложной сети приводят к различным нарушениям сознания, которые могут быть как глобальными, так и локальными, с конкретными недостатками сознательного восприятия при общем бодрствовании. Нейрофизиология может экспериментально продемонстрировать, что степень сознания зависит от двух потоков специфических и неспецифических афферентных сигналов, вырабатываемых в коре головного мозга. Но возникает вопрос, каким образом из этих сетей возникают ментальные состояния сознания. В терминологии Лейбница, мы видим взаимодействующие элементы типа зубчатых колес в мельнице, но не можем перекинуть мост между нейрофизиологическими механизмами и ментальными состояниями сознания. Общепринятый взгляд традиционной нейрофизиологии состоит в том, что функции мозга становятся возможными благодаря электрическим импульсам, распространяющимся по сети нейронов, связанных жесткими синапсами, аналогично жестким связям зубчатых колес в механистической модели мельницы Лейбница.

Подход, основанный на теории сложности, предлагает рассматривать самоорганизующиеся сети, изменяющие свои синаптические связи, что стимулируется синаптическим возбуждением и зависит от степени этого возбуждения. В рамках сложных нейронных систем микроскопический уровень взаимодействующих нейронов отличается от макроскопического уровня глобальных структур, возникающих как ансамбли клеток за счет самоорганизации. В предыдущих разделах уже отмечалось, что понятие самоорганизующихся нейронных клеточных ансамблей было предложено Хеббом. Оно было модифицировано Кристофом фон дер Мальсбургом, Тойво Кохоненом и другими. Если в некоторых нейронах сети под действием структурированного входного сигнала возникает одновременная активность, то согласно обучающему правилу хеббовского типа в результате синхронного возбуждения будет образован ансамбль.

Предложенная Мальсбургом модификация состоит в том, что формирование ансамбля не является медленным процессом, а создается быстрыми синаптическими изменениями [4.47]. Эти так называемые «синапсы Мальсбурга» используются для моделирования сетей с быстрой динамикой настройки весов. Сегодня существует эмпирическое свидетельство существования в мозге обладающих большой пластичностью синапсов хеббовского и мальсбурговского типов, правила взаимодействий которых можно понять с помощью молекулярных механизмов. Образование ансамблей в сети зависит от степени возбуждения ее нейронов.

Однако не существует «материнского нейрона», который способен чувствовать, думать или, по меньшей мере, координировать соответствующие нейроны. Проблема связи пикселей и общего вида при восприятии объясняется клеточными ансамблями синхронно возбуждающихся нейронов, управляемых обучающими аттракторами динамики мозга. Проблема связи состоит в следующем: каким образом может быть достигнуто восприятие объекта в целом без разложения на миллионы несвязанных пикселей и сигналов от возбужденных нейронов? Теория Барлоу [4.48] предполагает наличие отдельных нейронов, отвечающих каждому свойству воспринимаемого объекта, других ней-

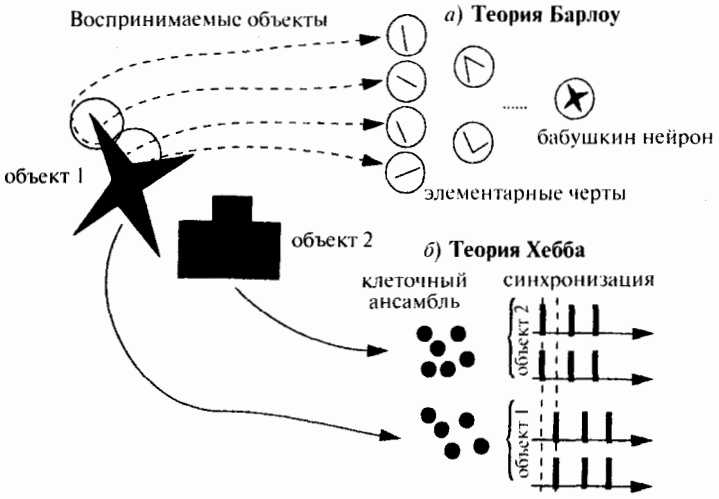


Рис. 4.20. Проблема связывания в теории Барлоу бабушкиного нейрона (*а*) и теории Хебба клеточных ансамблей (*б*)

ронов для кластеров свойств и, наконец, отдельного нейрона для всего объекта («бабушкин нейрон»). Таким образом, мозгу требуется громадное количество специализированных нейронов, существование которых должно постулироваться в особой гипотезе для каждого нового восприятия изменяющейся ситуации (рис. 4.20 *а*). Вольф Зингер [4.49] и другие путем наблюдений и измерений подтвердили хеббовскую концепцию синхронно возбуждаемых нейронов (рис. 4.20 *б*). Таким образом, для объяснения восприятия целостной формы теория Барлоу не нужна.

При рассмотрении сознательных и бессознательных состояний предполагается, что глобальное возбуждение популяции клеток, вызванное влиянием ретикулярной формации на кору (рис. 4.19), будет в общем случае увеличивать вероятность образования ансамблей. Поэтому Ганс Флор предположил, что степень сознания изменяется с той скоростью, с которой могут генерироваться ансамбли. Например, скорость образования клеточных ансамблей определяет количество, сложность и длительность существования представлений чувственных образов от внешнего мира. Сознание — это самоотносимое состояние саморефлексии (рис. 4.18 *б*). Таким образом, сознательное состояние основано на клеточном ансамбле, представляющем внутреннее состояние (а не только состояние внешнего мира). Например, я не только имею впечатление от зеленого дерева, но я сознаю, что смотрю на зеленое дерево. Кроме того, я могу размышлять о моем состоянии, в котором я сознаю, что смотрю на зеленое дерево, и продолжать итеративное производство мета-мета...представлений, начинающихся от воспринимаемых впечатлений и чувств и кончающихся абстрактными и весьма изощренными состояниями саморефлексии. Воспринимаемые состояния должны возникать всякий раз, когда преодолевается критический порог скорости образования ансамблей. Недо-

статки сознания возникают ниже критического порогового уровня.

Эта гипотеза может быть проверена с помощью определенных изменений электроэнцефалограммы (ЭЭГ), соответствующих растущей скорости образования ансамблей, представляющих определенную степень внимания. Так как скорость образования клеточных ансамблей основана на конкретных синапсах с меняющимися весами, степени сознания могут быть проверены путем вмешательства в синаптические связи. На самом деле пациенты, подвергнутые анестезии химическими веществами, влияющими на пластичность синапсов, испытывают яркие сновидения, чувственные иллюзии, зрительные и слуховые галлюцинации и путающиеся мысли. В этом смысле понимание можно рассматривать как результат способности системы генерировать представления и метапредставления.

Нейронная сеть с высокой скоростью образования ансамблей может порождать более сложные представления, чем сеть с меньшей скоростью образования. Таким образом, при достаточно высокой скорости образования сложные системы будут проявлять самоотносимую и метакогнитивную деятельность. Можно вообразить шкалу более или менее сознательных систем, соответствующих степеням сознания в эволюции живых существ со сложными нервными системами, от червя до человека. Из этой шкалы следует, что в рамках сложных систем возникновение сознания не является побочным явлением эволюции. Это основанное на законах природы возникновение глобальных состояний согласно динамике сложных систем, образующей макроскопические упорядоченные структуры за счет микроскопических взаимодействий их элементов, если при этом удовлетворены определенные критические условия.

Если подход, основанный на теории сложных систем, правилен, тогда нервные системы в биологической эволюции есть просто конкретные реализации самоотносимых систем, и в принципе нельзя исключить существование других, возможно, технических систем с самоотносимыми возможностями, основанных на механизмах, отличающихся от биохимии человеческого мозга (см. гл. 6). Может быть, мы даже способны транслировать представления из одной сложной системы в другую, чужую систему. Так как представления в обеих системах не совсем одинаковы, мы не будем чувствовать себя точно так же, как наш сосед, будь то животное или иная чужая система. Но мы будем иметь представление в форме знания или теории о том, что они чувствуют или думают. В этом смысле субъективность сохраняется, и в человеческом общении остается широкое поле закрытых явлений, даже в случае технических имитаций.

В том, что касается традиционной проблемы разум-тело, подход теории сложности показывает, что познавательная активность не является ни полностью независимой и отличной от активности мозга, ни просто ей тождественной, ни побочным явлением. Предполагается, что мысли и чувства являются одновременно продуктом и производителем нейронных процессов, но не идентичны этим процессам. В рамках теории сложных систем мозг моделируется как самоорганизующаяся система, работающая вдали от теплового равновесия и вблизи от некоторых пороговых значений, являющихся точками неустойчивости. Во время нейронной неустойчивости различные моды коллективных возбуждений эволюци-

онируют к когерентным макроскопическим структурам, которые нейрофизиологически основаны на определенных клеточных ансамблях, а психологически выражаются в виде определенных чувств или мыслей [4.51].

Мы все по собственному опыту знаем, что в ситуации эмоциональной неустойчивости определенное чувство может доминировать над остальными, скрытыми чувствами и даже руководить нашими действиями. В синергетике конкуренция устойчивых и неустойчивых мод объясняется принципом подчинения. Читатель наверняка сам вспомнит ситуации принятия решения, когда одна мысль или одна идея начинает «подчинять себе» все другие возможные мысли. Такие неравновесные фазовые переходы управляются очень малым числом параметров порядка, имея в виду минимальность информации. Действительно, действие после принятия решения означает колоссальное уменьшение сложности. Слишком большое количество знаний мешает действию или, цитируя Гёте: «Человек действия всегда беспринципен».

Когнитивные явления относятся к макроскопическим свойствам динамики мозга и к параметрам порядка, управляющим лежащими в основе этих явлений микроскопическими процессами. Таким образом, так называемое взаимодействие разум—мозг есть всего лишь устаревшая формулировка неадекватной и вышедшей из употребления метафизики, предполагающей существование определенных взаимодействующих субстанций, подобных сталкивающимся шарам в механике. Перекрывающаяся область наук о мозге и познании связана с возникновением макроскопических свойств из микроскопических нейронных взаимодействий во время фазовых переходов в сложных нейронных системах.

В синергетике фазовые переходы интерпретируются как тип нарушения симметрии, который можно проиллюстрировать движением частицы с большим затуханием в симметричном потенциале (рис. 4.21 *а*) [4.52].

В максимуме потенциальной энергии положение частицы симметрично, но неустойчиво, так что крохотные начальные флуктуации решают, в какое из двух эквивалентных устойчивых состояний с минимумом потенциальной энергии скатится частица. В теории сложных систем две впадины на рис. 4.21 *а* интерпретируются как аттракторы. Очевидно, что неопределенность восприятия и спонтанное решение о том, как интерпретировать визуальный образ, представляют хорошо известный психологический пример нарушения симметрии. На рис. 4.21 *б* имеется неустойчивость фигуры и фона. Мы видим белый или черный крест? На рис. 4.21 *в* показана неустойчивость возникающего образа. На картинке нарисована молодая девушка или старая леди?

Нарушение симметрии в психологии определяется нелинейной причинностью сложной системы («эффект бабочки»), грубо говоря, означающей, что малая причина может иметь большие последствия. Маленькие детали начальных индивидуальных точек зрения и, кроме того, когнитивные предубеждения могут «подчинить» другие моды и привести к одной доминирующей точке зрения. Нейрофизиологическая модель должна моделировать соответствующие фазовые переходы клеточных ансамблей.

Хорошо известны фазовые переходы в движении животных, например, в походке лошади. С увеличением скорости, чтобы минимизировать

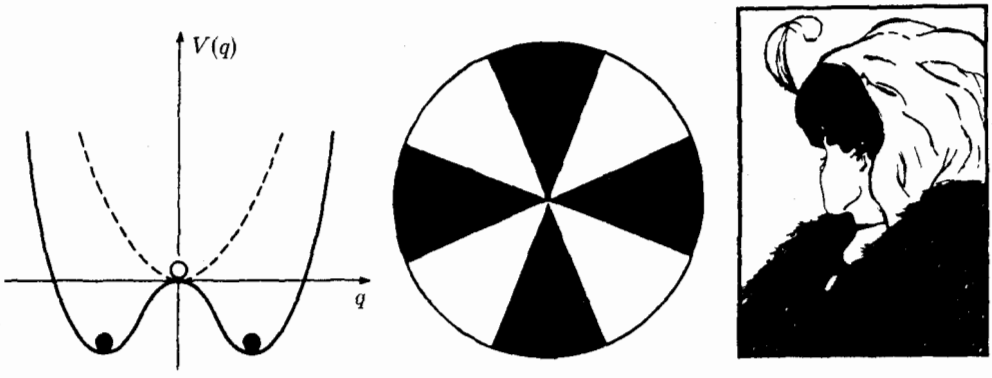


Рис. 4.21. Нарушение симметрии при движении частицы с большим затуханием в симметричном потенциале (*а*). Неоднозначность смысла: *б* — белый или черный крест? *в* — пожилая или молодая женщина? [4.53]

потери энергии, лошадь переходит к разным типам движения — от ходьбы к рыси, затем к галопу. Такое явление гистерезиса часто наблюдается в неравновесных фазовых переходах и интерпретируется как последовательность устойчивых состояний или аттракторов в нервной системе. Фазовые переходы возникают также в мышлении. «Озарение» и внезапное «понимание» — удивительные явления, возникающие в ситуации флуктуаций и неустойчивости. В истории существует много известных примеров, когда ученые, инженеры, артисты и композиторы, находясь в ситуации «созидательной нестабильности» и беспорядка, внезапно находили новое решение задачи, изобретение, идею картины, мелодию и т. д.

Подход теории сложных систем предлагает не замкнутую доктрину психологии, а междисциплинарную исследовательскую программу исследования старых и новых проблем науки о познании и приближения их к эмпирическому и экспериментальному анализу. Так, предлагается исследование корреляций между скоростями изменения клеточных ансамблей и интеллектуальными возможностями обучения, креативностью, познавательной гибкостью и способностью к визуализации. Предполагается, что явления познавательной неустойчивости — это макроскопические свойства микроскопической неустойчивости нервных процессов. Мысли и ожидания интерпретируются как параметры порядка, управляющие активностью всей системы, если она функционирует вблизи точек неустойчивости. Подтверждение этой теории можно видеть в психологических тестах, порождающих галлюцинации под гипнотическими воздействиями, соответствующими измеряемым физиологическим эффектам. Путем записи потока крови через области коры, было показано, что даже мысль или намерение действия увеличивает активность нейронов в двигательной области.

Кто будет отрицать, что мысли могут изменить мир и что они являются не только интерпретациями мира? Например, в области психосоматических явлений эффект плацебо

показывает, что одна лишь вера или руководящая идея может изменить не только эмоциональное, но и психологическое состояние. Очевидно, что психосоматические состояния близки к неустойчивым точкам. Соответствующие параметры порядка являются не просто теоретическими концепциями психологов, а реальными модами, управляющими и подчиняющими остальные степени свободы в деятельности центральной нервной системы.

Последние примеры показывают, что применение самоорганизующихся сложных систем в психологии нельзя просто оценить их способностями к прогнозам и количественной измеримостью. Внутренним свойством сложной системы является то, что ее нелинейная динамика на микроскопическом уровне и ее чувствительность к начальным условиям не позволяют прогнозировать конечное состояние объекта. В исследованиях мозга и познания мы сталкиваемся с огромной степенью сложности, исключающей точные вычисления или долговременные прогнозы. Тем не менее подход, основанный на теории сложности, раскрывает существенные качественные свойства системы разум—мозг, такие как высокая чувствительность по отношению к крохотным внутренним флуктуациям и изменениям во внешнем мире.

4.4. Интенциональность и крокодил в мозге

Помимо сознания, есть еще одно традиционно выделяемое фундаментальное свойство человеческого разума, а именно, *интенциональность*.

Интенциональность есть соотнесение ментальных состояний с объектами и ситуациями внешнего мира: я вижу *что-то*, я верю во *что-то*, я ожидаю *чего-то*, я боюсь *чего-то*, я хочу *чего-то* и т. д. Интенциональные ментальные состояния можно отличить от неинтенциональных состояний, не имеющих референтного объекта: я волнуюсь, я испуган, я устал, я счастлив, я подавлен и т. д.

Явление интенциональности можно также проиллюстрировать простыми примерами. Каждый человек, смотрящий на рис. 4.22, видит квадрат, хотя физически ни одна из сторон квадрата не нарисована. Конфигурация линий внушает зрительной системе, что имеется некоторая замкнутая фигура. Достигается интенциональное соотнесение между наблюдателем и конфигурацией раздражителей [4.54].

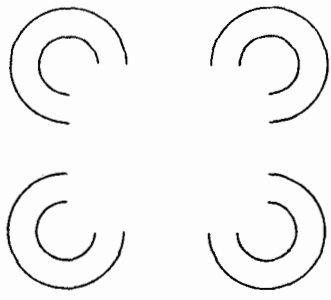


Рис. 4.22. Подразумеваемый объект восприятия (квадрат)

Интенциональные объекты или состояния могут быть как фиктивными, так и реальными. Очевидно, что культура людей полна знаков и символов для интенциональных объектов и состояний, от дорожных указателей до религиозных символов. Даже здания, от мемориалов и церквей до фабрик, могут представлять интенциональные объекты. Интенциональный смысл языков установился в результате долгого развития человеческих культур. В традиционной эпистемологии некоторые философы, на-

пример Франц Брентано, провозгласили даже, что интенциональность есть специфическая способность человеческого разума соотноситься с миром. Интенциональность понималась как свойство разума, которое не может быть сведено к физическим, химическим или биологическим свойствам.

Некоторые современные философы, например Джон Сёрл, отстаивают точку зрения, что интенциональность есть определенное свойство человеческого разума. Но они соглашаются с тем, что биологическая эволюция человеческого мозга каким-то образом развивала интенциональную мощь ментальной связи с миром [4.55].

На самом деле интенциональность «не запасена» в мозге. Это свойство определенных сложных систем, которые можно смоделировать динамикой возникновения все более сложных аттракторов в процессе эволюции жизни. Устройство жилищ общественных насекомых является примером коллективной интенциональной динамики. Специфическим свойством этой сложной системы является автокаталитический механизм, с помощью которого проводится целенаправленная работа по постройке гнездовых экосистем, каждая из которых состоит из обитателей термитника и окружающей среды. В рамках подхода, основанного на теории сложности, предполагается, что эта социальная система уже иллюстрирует основополагающие свойства, которые можно наблюдать в более развитых структурах в мозге или центральной нервной системе [4.56].

Процесс сооружения гнезда включает на микроскопическом уровне координацию действий более 5 миллионов особей и приводит к созданию определенных макроскопических типов строений. Например, африканские термиты строят сооружения, достигающие 4,5 м в высоту и весящие более 10 т. Каждое насекомое работает независимо от любого другого термита. Но их действия локально определяются распределением определенного химического вещества, которое выделяют сами термиты. Строительный материал помечен химическим веществом. В начале строительства материал распределен случайным образом, затем он распределяется все более регулярно, пока в результате локальных взаимодействий насекомых, определяемых распределением химического вещества, не возникает архитектурное сооружение.

Структура определяет несколько центров — целей коллективных усилий, которые математически можно интерпретировать как аттракторы в диффузионном поле. В предыдущих главах аттрактор был определен как решение, к которому стремится множество траекторий, определяемых разными начальными условиями. Локальные траектории сходятся к аттрактору. В физических или химических полевых моделях аттракторы часто определяют локальные области, в которых градиент потенциальной энергии уменьшается, стремясь к нулю. Область, окружающая аттрактор, называется *областью притяжения* и определяется градиентными потоками, сходящимися к аттрактору. Структура потока насекомых глобально организована схемой аттракторов в их рабочем пространстве, которое является фазовым портретом динамики насекомых. Хорошо известно, что аттракторы никогда не достигаются [11]. Если меняются определенные параметры

[11] Пусть $\dot{x} = -x$. Здесь $x(t) \to 0$ при $t \to 0$, однако аттрактор $x = 0$ не достигается. В общем случае ситуация такая же.

порядка, структура может стать неустойчивой и разрушиться, за чем последует формирование новой структуры аттракторов.

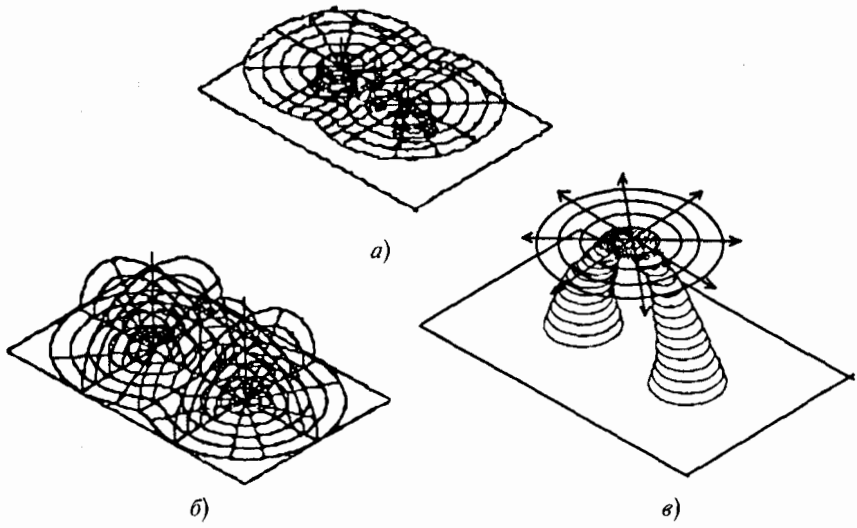
На рис. 4.23 *а* показан градиент химической диффузии вокруг двух аттракторов, которые станут основаниями двух опор. Так как для термитов две опоры действуют как конкурирующие аттракторы, между опорами возникает седловая точка. На последующей стадии строительства начальное двумерное поле рис. 4.23 *а* сменяется трехмерным полем (рис. 4.23 *б*), определяющим направление строительства опор. На рис. 4.23 *в* показано образование дуги с одним аттрактором градиента химической диффузии [4.57].

Очевидно, интенция (намерение) в рамках экологической шкалы не требует, чтобы отдельный компонент системы был уверен в глобальных последствиях своих действий. Интенция проявляется глобально через длительный промежуток времени за счет динамики системы. На рис. 4.23 *г* показан автокаталитический цикл интенциональной сложной системы построения термитника. Так как этот цикл не является контролируемым процессом, у контролирующей власти, вроде «Бога» или «Природы», не существует «цели» или «плана». Утверждение о контроле сверху может быть только упрощенной антропоморфной метафорой, которая не описывает корректно нелинейную причинность рассматриваемой самоорганизующейся сложной системы. Тем не менее глобально существует целенаправленное коллективное поведение, возникающее из сложных нелинейных взаимодействий.

Так как мозг и центральная нервная система являются сложными системами с нелинейной динамикой, управляющей их нейронами и синапсами, то не удивительно, что они также достигают уровня интенциональных структур поведения. Интенциональность не падает с небес, как волшебное свойство, ведущее и отличающее человеческий разум от природы. Это глобальная структура, возникающая в конкретных сложных системах при определенных условиях. Однако в зависимости от возрастающей сложности, возникающей в ходе эволюции, существуют различные уровни интенциональности.

Интенции не должны быть обязательно сознательными. На рис. 4.22 интенциональным объектом нашей зрительной системы без всякого волевого усилия является квадрат. Так называемые иллюзии восприятия также являются интенциональными структурами нашей зрительной системы, спонтанно возникающими без сознательных волевых усилий. На рис. 4.24 показан эффект искажения фигур, который кажется вызванным отражательными градиентами различных зрительных аттракторов. Две эквидистантные параллельные линии кажутся изменяющими свою кривизну за счет пары отталкивающих градиентов слева и одного отражающего градиента справа. Пространство состояний зрительной системы наблюдателя указывает на разные значения кривизны в результате действия различных зрительных градиентных полей, хотя на физическом рисунке линии остаются эквидистантными и параллельными друг другу.

Даже сознательные интенциональные структуры поведения присущи не только людям. Собака не просто прыгает, она прыгает, чтобы схватить жертву, поприветствовать хозяина и т. п. Интенциональность в смысле сознательного целенаправленного поведения является в разной степени свойством всех животных. Возникает



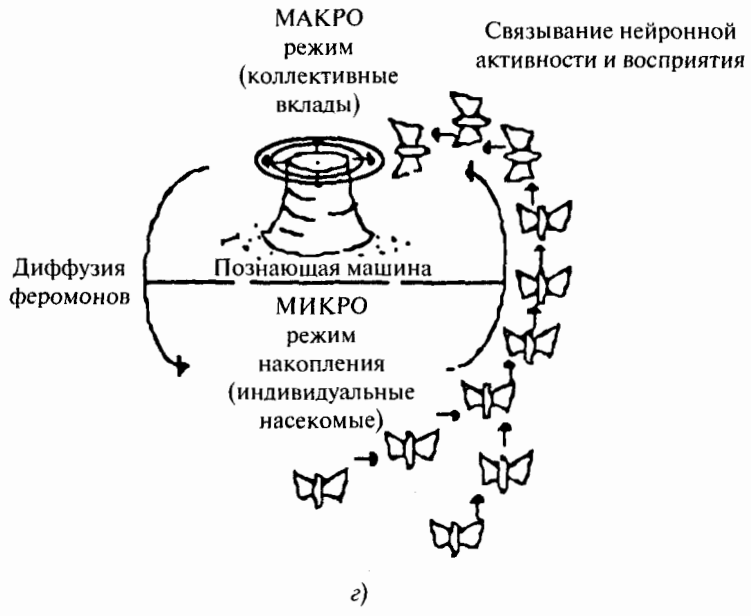


Рис. 4.23. Образование дуги как интенциональная динамика термитов: *а* — основание двух опор как два аттрактора в двумерном поле градиента диффузии; *б* — трехмерное поле, определяющее направление строительства опор; *в* — образование дуги, определяющееся аттрактором градиента диффузии [4.57]. Автокаталитический цикл интенциональной сложной системы построения термитника (*г*)

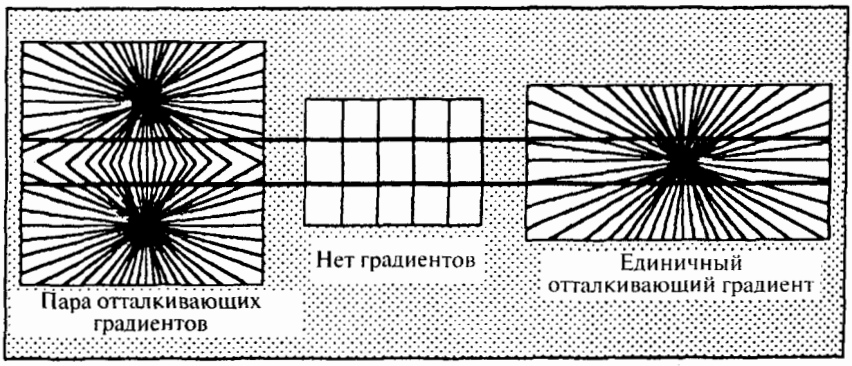
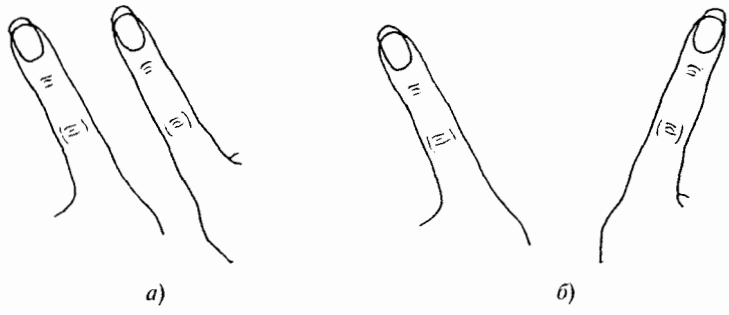


Рис. 4.24. Эффекты искажения двух эквидистантных параллельных линий зрительными аттракторами

вопрос, каким образом в рамках подхода теории сложных систем можно построить модель интенционального поведения и каким образом эту модель можно экспериментально проверить.

В этом контексте интенция определяется как намеренная структура поведения, которая может изменить динамические свойства объекта. Таким образом, психологи могут моделировать внутреннюю динамику типов поведения, которая может меняться за счет динамики намерений. Напомним читателю о внутренней динамике, управляющей поведением, которую можно моделировать в рамках синергетики. Келзо, Хакен и др. анализировали следующие простые примеры. Когда испытуемых просили двигать пальцы параллельно (рис. 4.25 *а*), они могли это делать без труда только с малой частотой. Если же их просили увеличить частоту движений, то без всякого волевого намерения пальцы внезапно начинали двигаться симметрично и антипараллельно (рис. 4.25 *б*) [4.58].

Чтобы построить модель этого фазового перехода в структурах поведения, частота интерпретировалась как управляющий параметр, а макроскопической переменной, описывающей движение пальцев, являлась фаза φ. Поведение можно моделировать на энергетическом рельефе как функцию меняющейся фазы. Рельеф должен быть симметричным, так как



а) *б)*

Рис. 4.25. Два пальца, двигающихся: *а* — параллельно; *б* — антипараллельно [4.58]

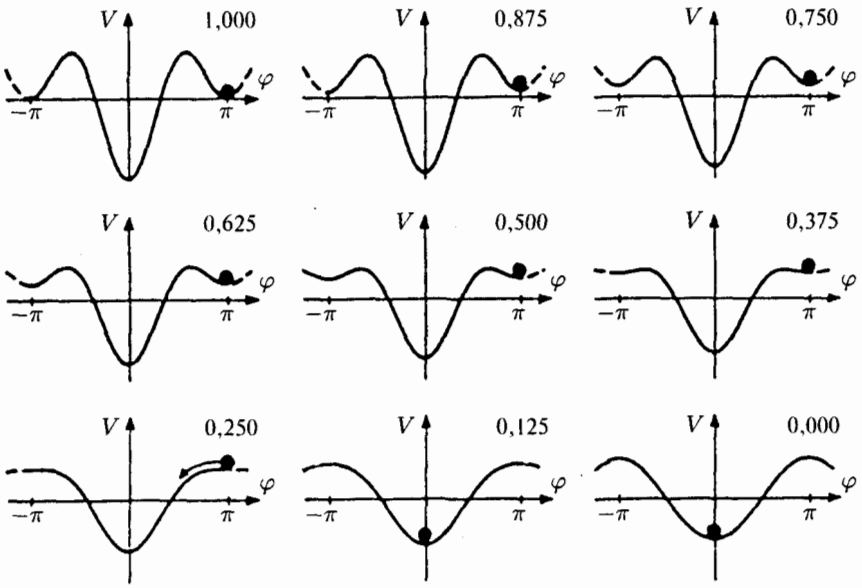


Рис. 4.26. Динамика движущихся пальцев на графике энергетического рельефа; параметром порядка является относительная фаза φ

левый и правый пальцы имеют одинаковые функции. Он также должен быть периодичен по фазовому углу (рис. 4.26). Если частота возрастает, рельеф, имевший первоначально крутые впадины, деформируется. В начале медленного движения структура устойчива, что соответствует стабильной фазе, имеющей значение π (рис. 4.26 *а*). В конце концов впадина при значении π исчезает, и мяч, находившийся вначале в точке π, скатывается в самый глубокий минимум, соответствующий симметричному движению пальцев (рис. 4.26 *в*).

В ряде экспериментов испытуемых просили намеренно переключиться между двумя типами координации движений обеих рук. Длительность переходного режима соответствует измеренному времени переключения. Устойчивость обеих структур измеряется флуктуациями параметра порядка. Динамика относительной фазы описывалась нелинейным уравнением эволюции.

На рис. 4.27 *а* наглядно представлена внутренняя динамика, соответствующая потенциальной функции этого уравнения с двумя минимумами. Вклад интенциональной информации в динамику относительной фазы соответствует потенциальной функции на рис. 4.27 *б*. В результате суммирования внутренней и интенциональной динамики приходим к полной динамике, показанной на рис. 4.27 *в*. В соответствии с эмпирически измеренным временем переключения, мяч на кривой рельефа движется быстрее по более крутому склону при $\varphi = 0$, чем при $\varphi = 180^\circ$. Очевидно, что интенция может изменять внутреннюю динамику путем дестабилизации одной структуры и стабилизации другой. Говорят, что интенциональная информация есть часть структурной динамики, притягивающая систему к

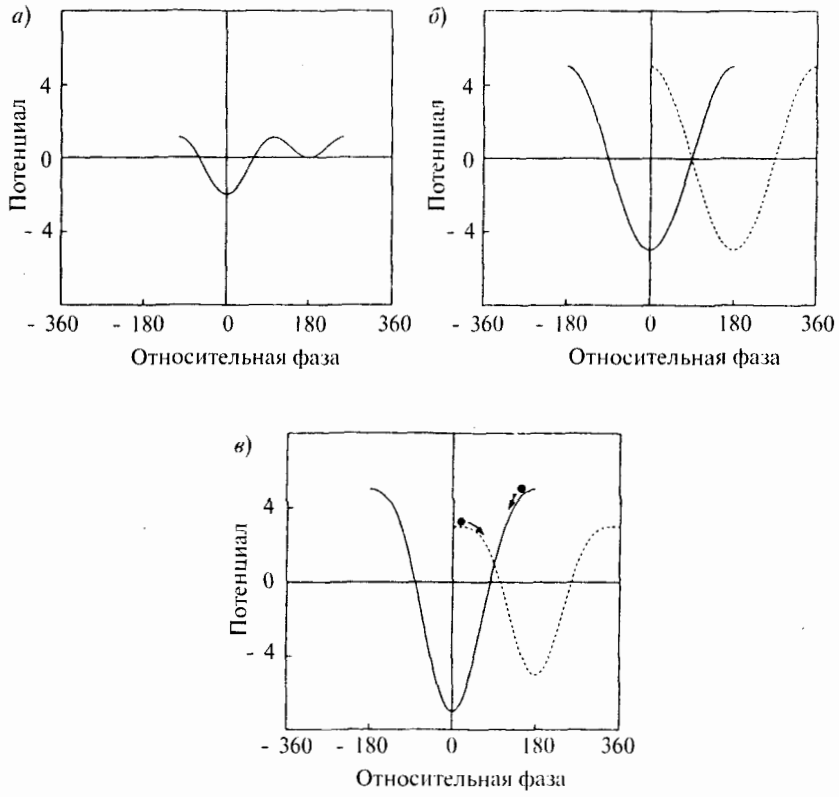


Рис. 4.27. Динамика относительной фазы с интенциональной информацией [4.59]

намеченной структуре. В этом смысле интенциональная информация определяет аттрактор в том же пространстве состояний, в котором моделируется внутренняя динамика [4.59].

Интенциональность и лингвистический смысл часто объявляются существенными свойствами человеческого разума. Примерами интенциональных состояний служат боли, щекотка и зуд, верования, страхи, надежды, желания, опыт восприятий, опыт действий, мысли, чувства и т. п., которые выражаются соответствующими фразами типа: «У меня болит живот», «Я хочу иметь автомобиль», «Я верю в Бога» и т. п. Сёрл утверждает, что ментальные состояния столь же реальны, как и любые другие биологические явления вроде лактации, фотосинтеза или пищеварения. По его мнению, ментальные состояния являются макросостояниями биологического мозга, причиной которых являются нейрофизиологические взаимодействия между нейронами на микроскопическом уровне. Таким образом, их нельзя идентифицировать с нейрофизиологическими состояниями отдельных нейронов.

Различие между микро- и макросостояниями в мозге иллюстрируется, например, аналогией с микро- и макросостояниями в жидкостях: макросостояние текучести нельзя свести к отдельным молекулам или, иными

словами, отдельные молекулы не могут быть жидкими. В этом смысле верования, желания, ощущение жажды и зрительные впечатления есть реальные причинные свойства мозга, такие же, как твердость стола или текучесть воды. Интенциональные состояния могут сами быть вызваны и реализованы в структуре мозга.

Сёрл утверждает, что никакая чисто формальная модель никогда не будет достаточной для описания интенциональности, так как сами по себе формальные свойства не являются для нее основополагающими. Причина, по которой Сёрл придерживается этой точки зрения, основана на мысленном эксперименте с «китайской комнатой». Человек, понимающий только английский язык, заперт в комнате, где имеется большой запас китайских иероглифов и набор написанных по-английски сложных правил преобразования для осуществления операций с последовательностями этих иероглифов. Периодически человек получает через щель в стене определенные последовательности иероглифов (рис. 4.28). Он применяет правила преобразования для того, чтобы получить другую последовательность иероглифов, которая передается через щель наружу [4.60].

Человеку в комнате неизвестно, что запас последовательностей содержит записанное по-китайски большое количество информации по ряду тем. Входные последовательности, поступающие через щель, являются вопросами или замечаниями по этим темам. Выходные последовательности представляют реакции и замечания на полученные последовательности. Используемые правила преобразования являются формальной программой для имитации манеры беседы носителя китайского языка. Человек внутри китайской комнаты правильно применяет формальные правила преобразования, совершенно не понимая последовательностей иероглифов, которые остаются для него бессмысленными.

Сёрл отстаивает точку зрения, в соответствии с которой формальные манипуляции с символами сами по себе

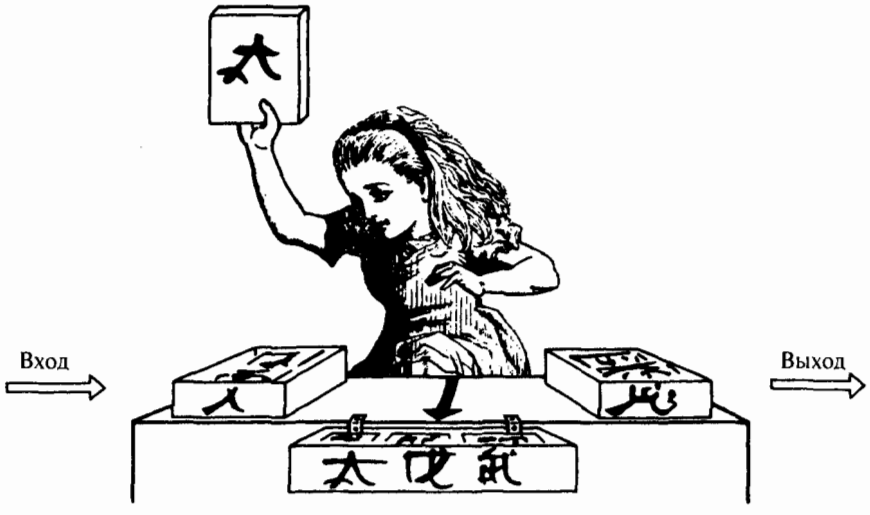


Рис. 4.28. Алиса в китайской комнате

не обладают интенциональностью, так как они совершенно бессмысленны для пользователя. В этом контексте интенциональность есть свойство формальных символов типа слов, фраз и т. п., относящихся к определенным «подразумеваемым» сущностям (семантическая зависимость символа) и к пользователю (прагматическая зависимость символа). Сёрл утверждает, что это свойство внутренне присуще только ментальным состояниям мозга.

Его доводы против «компьютерной имитации» не имеют силы, если он ограничивает имитации формальными алгоритмами, выполняемыми на компьютерах с программным управлением, таким как у машины Тьюринга. Но мы показали, что мозг обладает типичной характеристикой самоорганизующейся и соотносимой сложной системы, существенно отличающейся от компьютера с программным управлением (ср. гл. 6). Самоорганизация и соотнесенность сложных систем не ограничиваются мозгом человека или млекопитающих. Они являются лишь биохимическими и нейрофизиологическими реализациями определенных сложных структур, возникших в процессе биологической эволюции. Таким образом, в принципе нельзя исключить, что эти сложные структуры с их характерной динамикой могут быть реализованы с помощью совершенно других материалов, когда-нибудь созданных человеческой технологией. Следовательно, так как интенциональность становится возможной благодаря свойствам соотнесенности и самоорганизации, в принципе нельзя исключить ее частичную имитацию с помощью сложных моделей, отличных от тех типов мозга, которые изучают биологи.

В традиционных философских учениях интенциональность часто основывается на так называемом «я» человеческого существа, про которое утверждается, что оно способно относиться к миру и к себе («самосознание» как соотнесенность). Но где в мозге спрятано это «я»? Ряд современных исследователей мозга поддерживают даже традиционные философские трактовки платонизма, или спиритуализма, или материализма. Например, для сэра Джона Экклза «я» представляется духовной сущностью, взаимодействующей с мозгом, но полностью отличающейся от него по своей природе [4.61]. Но каким образом можно подтвердить или опровергнуть эту гипотезу? Это всего лишь постулат большой метафизической ценности, в который можно верить или не верить.

Гипотезы должны поддаваться критике, возможно ошибочной, но полезной для дальнейшего исследования. Таким образом, их метафизическая ценность весьма велика. Известный в философии принцип бритвы Оккама требует, чтобы мы отбрасывали излишние гипотезы, экономно постулировали метафизические сущности и ограничивались минимальным числом кажущихся необходимыми для эмпирического исследования сделанных предположений. Подход, основанный на теории сложных систем, это математическая программа исследований междисциплинарных моделей, избегающая метафизических догм. В долгосрочной перспективе она может оказаться неверной. Но эта стратегия моделирования была подтверждена впечатляющим количеством успехов в разных науках и технологиях и, что более важно, она предлагает плодотворные идеи для дальнейших эмпирических исследований. С другой стороны, традиционный материализм, отождествляю-

щий ментальные состояния с нейрофизиологическими процессами в отдельных нейронах, просто неверен [12].

Тем не менее при исследованиях мозга возникает вопрос, какая часть мозга является центром «я». Кора головного мозга есть часть мозга, позволяющая нам обучаться, запоминать, думать и создавать все продукты человеческой культуры и цивилизации. Но если кора в основном моделируется как сложная ассоциативная память, заполненная определенными обучающими процессами, то это просто сложный и весьма изощренный инструмент, развившийся в процессе биологической эволюции, чтобы обеспечить выживание сильнейших.

Действительно, кора является самой молодой частью, возникшей в процессе эволюции человеческого мозга. Существуют более старые, но и более примитивные структуры, которые можно найти также в мозгу птиц, рептилий, амфибий и рыб. Некоторые ученые предполагают, что основные чувства, такие как удовольствие или боль, а также все сервомеханизмы, которые были необходимы для выживания рептилий, по существу, были реализованы в этих первичных структурах мозга. Этот центр давал импульсы для всех видов деятельности, используя кору только в качестве огромного и эффективного ассоциативного запоминающего устройства. Таким образом, в этой интерпретации «я» заменяется маленьким крокодилом в мозгу, оперирующим очень сложными инструментами, такими как кора, с тем чтобы выжить во все более усложняющейся окружающей среде [4.62]. Интенциональность могла стать возможной благодаря коре, но начало ей было положено основными инстинктами крокодила в мозге человека.

По-видимому, идея крокодилов с высокоэффективными нейронными инструментами для выживания ранит наше тщеславие больше, чем популярное дарвинистское утверждение последнего столетия о том, что обезьяна — предок человека. С научной точки зрения, конечно, не ущемленное тщеславие заставляет нас критиковать идею о «нейронном крокодиле». Главное возражение состоит в том, что наши чувства не остались на уровне чувств крокодила, а развились в процессе биологической и культурной эволюции.

Наши чувства удовольствия и боли довольно сложны, так как на них оказала стимулирующее воздействие весьма сложная и изощренная цивилизация, порожденная человеческим мозгом. Таким образом, имеется сложная обратная связь, формирующая наши чувства и желания от уровня крокодила до уровня, достигнутого в наши дни. История литературы, искусства и психологии демонстрирует, что удовольствие и боль — очень тонкие состояния человеческого мозга, находящиеся в постоянной эволюции. Следовательно, даже традиционное представление о более или менее чувствительной человеческой душе все еще имеет смысл в рамках сложной системы. Но мы должны отвергнуть традиционные идеи о том, что человеческий разум и душа являются странными субстанциями, взаимодействующими с человеческим телом и контролирующими его каким-то волшебным, в принципе непостижимым образом.

[12] В отечественной философской литературе такую философскую трактовку сознания называют вульгарным материализмом, не отождествляя его с материализмом в целом. — *Прим. ред.*

Глава 5

Сложность и эволюция вычислимости

Эволюцию сложности в природе и обществе можно понимать как эволюцию вычислительных систем. В начале современной эпохи Лейбниц уже высказывал идею о том, что иерархия природных систем от камней и растений до животных и людей соответствует природным автоматам возрастающих степеней сложности (разд. 5.1). Современная теория вычислимости позволяет различать классы сложности задач, имея в виду порядок соответствующих функций, описывающих время вычислений их алгоритмов или расчетных программ. Однако, определяя алгоритмическую сложность символических структур, можно также рассматривать размер компьютерной программы (разд. 5.2).

Динамика информации в сложных системах анализируется с помощью понятий информационной энтропии Шеннона и энтропии Колмогорова–Синая. Таким образом, с помощью хорошо установленных методов можно различать потоки информации в сложных системах с устойчивой, колебательной, хаотичной или случайной динамикой. Однако, чтобы понять принципы формирования и оперирования человеческими знаниями, информационной динамики недостаточно. Первый подход заключался в создании систем с базой знаний, имитирующих операции со знаниями человека. Далее, мы задаемся вопросом, можно ли ожидать от квантовых компьютеров и квантовой теории сложности более высокой эффективности обработки информации? Является ли материя не чем иным, как «конденсированной» квантовой информацией с разными уровнями сложности (разд. 5.3)? Идея Лейбница о природных автоматах была облечена в математически точную форму в понятии клеточных автоматов Джона фон Неймана. В рамках клеточных автоматов можно анализировать формирование образа сложных систем. С помощью простых правил клеточных автоматов можно генерировать даже хаос и случайность, что недавно продемонстрировали компьютерные эксперименты Стивена Уолфрема (разд. 5.4).

5.1. Лейбниц и mathesis Universalis

Одним из наиболее спорных приложений теории сложных систем является эволюция *искусственного интеллекта* (ИИ) [5.1]. В традициях классического ИИ мозг понимался как компьютерная аппаратура самой передовой конструкции, в то время как разум является соответствующей компьютерной программой с детерминированными алгоритмами. Даже экспертные системы [1], основанные на

[1] Системы, использующие базу знаний (правил) для решения задач (выдачу рекомендаций) в некоторой предметной области, например в медицине, диагностике неисправностей, выборе

знаниях, считаются алгоритмическими представлениями языков программирования высокоразвитого ИИ. Но теоретические результаты математической логики (Черч, Тьюринг, Гёдель и т. д.) и практические проблемы программирования ограничивают механизацию мысли в рамках классического ИИ.

Для моделирования природы мозга и его ментальных состояний с помощью нелинейной динамики («самоорганизации») сложных нейронных сетей была предложена теория «мозгового компьютера» как продукта естественной эволюции. Возникает вопрос, передает ли проникновение в динамику этих сетей «светокопии» новой революционной технологии, которая будет неотступно следовать за естественной эволюцией мозга и разума. В действительности развитие человеческих знаний и технологии знаний представляется тем типом технической эволюции, которая привела к инновациям в технике, подобным мутациям в биологической эволюции.

Первый уровень был реализован простыми инструментами вроде молотка, рычага и т. п. На следующем уровне были изобретены машины, использующие силу и энергию. Сегодняшние вычислительные машины с программным управлением и обрабатывающие информацию автоматы стали повседневными инструментами. Специалисты по компьютерам различают в истории развития этих устройств несколько поколений «железа» [2)] и программного обеспечения. В исследованиях ИИ говорят о «втором компьютерном веке», имея в виду переход от машин с обработкой чисел к системам обработки знаний, например, к экспертным системам [5.2].

Ранние исторические корни компьютерной науки восходят к веку классической механики. Механизация мыслей начинается с изобретения механических устройств для автоматического осуществления элементарных арифметических операций. Механическая вычислительная машина шаг за шагом выполняет последовательные инструкции. Таким образом, ее динамика определяется механической монопричинностью, существенно отличающейся от параллелизма и самоорганизации сложных систем. В общем случае традиционная конструкция механических вычислительных машин содержит следующие элементы.

Во-первых, в ней имеется *механизм ввода*, с помощью которого число вводится в машину. *Селекторный механизм* отбирает и осуществляет механическое движение, приводящее к сложению или вычитанию значений на регистровом механизме. *Регистр* необходим для того, чтобы указывать значение числа, хранящегося внутри машины, и технически реализуется последовательностью колесиков или дисков. Если из-за того, что одна из цифр в регистре результата передвинулась с 9 до 0, генерируется перенос в следующий разряд, то этот перенос должен быть распространен механизмом переноса на следующую цифру или даже по всему регистру результата. *Контрольный механизм* обеспечивает правильное расположение всех шестеренок в конце каждого цикла сложения, чтобы избежать ошибочных результатов или сбоя машины. *Стирающий механизм* должен восстанавливать исходное положение регистрового ме-

конфигурации сложной компьютерной системы, планировании последовательности действий и др. Они должны обладать способностью объяснить, почему предложено то или иное решение, и доказать его обоснованность. — *Прим. пер.*

[2)] Детали компьютера (процессор, платы, монитор и т. д.). — *Прим. пер.*

ханизма для сохранения нулевого значения.

Изобретателем первой механической вычислительной машины, осуществлявшей четыре арифметических действия, считается Вильгельм Шикард (1592–1635), профессор иврита, восточных языков, математики, астрономии и географии. Та часть его машины, которая осуществляла сложение и вычитание, была реализована зубчатой передачей с автоматическим механизмом переноса. Механизм умножения и деления был основан на таблицах умножения Напье. Великий французский математик и философ Блез Паскаль (1623–1662) изобрел суммирующую и вычитающую машину с хитроумным механизмом переноса, который, в принципе, до сих пор используется в современных одометрах[3] [5.3].

Но только механическая вычислительная машина Лейбница, выполнявшая четыре первых действия арифметики, содержала все механические элементы от ввода, селектора и регистрового механизма до переноса, контроля и стирающего механизма. Машина Лейбница стала прототипом ручного арифмометра. Если мы отвлечемся от технических деталей и конкретных механических конструкций машины Лейбница, то получим модель идеальной вычислительной машины, в принципе способной рассчитать все вычислимые функции целых чисел.

На рис. 5.1 приведена схема такой идеальной машины с рукояткой C и тремя числовыми регистрами SM, TM, RM [5.4]. Ввод целых чисел осуществляется на регистре ввода SM с помощью ручек ввода SH. Если рукоятка C поворачивается по часовой

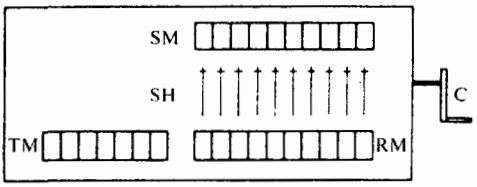


Рис. 5.1. Ручной арифмометр

стрелке, то содержимое SM добавляется к содержимому регистра результата RM, а содержимое поворотного регистра TM увеличивается на 1. Поворот рукоятки C против часовой стрелки вычитает содержимое SM из содержимого RM и уменьшает содержимое TM на 1.

Сложение означает следующее. В начале вычислений применяется процедура очистки регистров TM и RM до нуля. Затем с помощью SH на регистре SM устанавливается первое число. Поворот рукоятки C по часовой стрелке переносит это число в RM. Иными словами, число прибавляется к нулю на RM. Затем на SM устанавливается второе число, и поворотом по часовой стрелке оно прибавляется к содержимому RM. Теперь на RM можно прочесть сумму обеих чисел. После двукратного поворота рукоятки регистр TM показывает 2. Умножение означает просто повторяющееся добавление одного и того же числа. Произведение $b \cdot a$ получается b-кратным добавлением числа a к самому себе.

Лейбниц даже создал механическую вычислительную машину для действий с числами, записанными с помощью только двух цифр 0 и 1 в открытой им за несколько лет до этого двоичной системе счисления. Он описал механизм перевода десятичного числа в соответствующее двоичное число и обратно. Так как рабочие ячейки современных электронных компьютеров имеют только два

[3] Одометр – прибор для измерения количества оборотов колеса. – *Прим. ред.*

состояния 1 (электронный импульс есть) и 0 (электронного импульса нет), можно утверждать, что Лейбниц стал поистине одним из первооткрывателей науки о компьютерах [5.5].

Исторические машины Лейбница страдали множеством технических недостатков, так как доступные в то время материалы и технические навыки не отвечали нужным требованиям. Тем не менее его замысел был частью общей исследовательской программы универсальной науки (*mathesis universalis*), имевшей целью имитацию человеческого мышления с помощью вычислительных процедур («алгоритмов») и использование их в механических вычислительных машинах. Лейбниц провозгласил две главные дисциплины своей *mathesis universalis*.

Искусство споров (*ars iudicandi*) должно позволить решить каждую научную проблему с помощью соответствующего арифметического алгоритма, после того как проблема закодирована в числовых символах. *Искусство открытий* (*ars inveniendi*) должно позволить ученым искать и перечислять возможные решения научных задач. *mathesis universalis* Лейбница предвосхитила сформулированную в начале XX в. знаменитую программу Гильберта с ее требованиями формализации и аксиоматизации математических знаний. Действительно, Лейбниц открыл ряд процедур формализации и кодификации языков. Он был глубоко убежден, что существуют универсальные алгоритмы для решения всех задач в мире с помощью механических устройств [5.6].

Таким образом, он утверждал, что природные системы — клетки, растения, животные и даже люди — представляют собой более или менее сложные автоматы. В «Рассуждении о метафизике» (1686) Лейбниц подчеркивает, что механистическое описание и причинное объяснение живых систем не противоречит телеологическому рассмотрению, имеющему большую эвристическую ценность в науке (§ 22). В «Монадологии» (§ 18) он вводит простейшую субстанцию (монаду) как элементарный автомат (*automates incorporels — бестелесный автомат*), характеризующийся (непрерывным) рядом состояний («ощущений»). Элементарные автоматы образуют скопления большей или меньшей сложности, которые характеризуются разными корреляциями и могут интерпретироваться как составные автоматы. В «Теодицее» (§ 200) Лейбниц обсуждает иерархическую структуру и субординацию в живых системах:

> ...Вследствие связи и порядка вещей тела всех живых существ и всех растений состоят из других животных и других растений, или из других живых и органических существ; поэтому здесь существует подчинение, и каждое тело, каждая субстанция служит другим... [4)]

Единство живой системы гарантируется ее формой организации, которую Лейбниц, следуя идее Аристотеля, называет «энтелехией». Но Лейбниц только использует старый метафизический термин, чтобы ввести свое новое понятие. Для Лейбница система может быть более или менее единой в смысле большей или меньшей степени подчинения и иерархии. Скопление с одинаковой корреляцией между всеми ее субстанциями не имеет иерархического порядка и менее структурировано, чем примитивный клеточный организм, но в то же время в растениях, животных и людях можно наблюдать растущую степень субординации.

[4)] *Лейбниц Г. В.* Сочинения. Т. 4. М.: Мысль, 1989. С. 270. — *Прим. пер.*

Для Лейбница телеологическая терминология имеет эвристическую ценность, хотя в принципе природу можно объяснить механическими причинами. Но было бы фундаментальной ошибкой и непониманием считать Лейбница последователем витализма. Главное различие состоит в том, что для объяснения живых систем Лейбницу не нужен новый принцип или «жизненная сила». На определенном уровне сложности просто эвристически удобнее описывать природные системы в терминах телеологии. Но, в противоположность природным системам, искусственные механические автоматы построены людьми за конечное число шагов. Только бесконечный анализ может продемонстрировать сложность природного автомата, скоррелированного с каждым отдельным автоматом («субстанцией») в мире. Очевидно, что Лейбниц создал теорию сложных систем, но все еще в рамках классической механики и веры в разрешимые универсальные алгоритмы.

В XIX в. английский математик и экономист Чарльз Бэббидж не только сконструировал первую программно управляемую вычислительную машину («аналитическая машина»), но также изучил экономические и социальные последствия ее появления [5.7]. Предтечей его знаменитой книги «Об экономике машин и фабрик» (1841) была идея Адама Смита о законах экономики, аналогичных механическим законам Ньютона (ср. разд. 6.2). В своей книге «Благосостояние наций» Смит описал промышленное производство булавок как алгоритмическую процедуру и предвосхитил идею Генри Форда о программно управляемом массовом промышленном производстве.

5.2. Вычислимость и алгоритмическая сложность

Программа *mathesis universalis* Лейбница оказала сильное влияние на современную формальную логику Фреге и Рассела и математическую теорию доказательств Гильберта и Гёделя. Ручная вычислительная машина (рис. 5.1), схема которой была извлечена из описания машины Лейбница в разд. 5.1, может быть легко обобщена на случай так называемой регистровой машины Марвина Минского [5.8]. Эта машина позволяет в рамках современной компьютерной науки определить общее понятие вычислимости.

У ручной вычислительной машины имеется только два регистра TM и RM, и в нее можно ввести только сравнительно небольшие натуральные числа. Идеальная регистровая машина имеет конечное число регистров, на которых можно сохранять любое конечное число желаемых величин. Регистры обозначаются натуральными числами $i = 1, 2, 3, \ldots$. Содержимое регистра i обозначается $\langle i \rangle$. Например, устройство $\langle 4 \rangle := 1$ означает, что содержимое регистра с номером 4 равно 1. Регистр пуст, если его содержимое равно 0.

В ручной вычислительной машине сложение или вычитание было реализовано только для двух регистров $\langle \mathrm{SM} \rangle$ и $\langle \mathrm{RM} \rangle$, причем $\langle \mathrm{SM} \rangle + \langle \mathrm{RM} \rangle$ или $\langle \mathrm{SM} \rangle - \langle \mathrm{RM} \rangle$ переходили в регистр RM. В регистровой машине результат вычитания $\langle i \rangle - \langle j \rangle$ должен быть равным нулю, если $\langle j \rangle$ больше, чем $\langle i \rangle$. Такое модифицированное вычитание обозначается $\langle i \rangle \dot{-} \langle j \rangle$. В общем случае программа идеальной регистровой машины определяется с использованием в качестве строительных блоков следующих элементарных процедур:

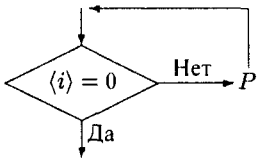
1) Прибавить 1 к $\langle j \rangle$ и поместить результат в регистр i, коротко:
$$\langle i \rangle = \langle j \rangle + 1.$$
2) Вычесть 1 из $\langle j \rangle$ и поместить результат в регистр i, коротко:
$$\langle i \rangle = \langle j \rangle - 1.$$

Эти две элементарные процедуры можно комбинировать, используя следующие принципы:

3) Если P и Q — хорошо определенные программы, то цепочка $P \to Q$ — хорошо определенная программа. $P \to Q$ означает, что машина должна выполнить программу Q после программы P.
4) Итерация программы, необходимая, например, для умножения как повторяющегося сложения, управляется вопросом о том, является ли какой-то определенный регистр пустым.

Эту обратную связь иллюстрирует диаграмма 1.

Диаграмма 1

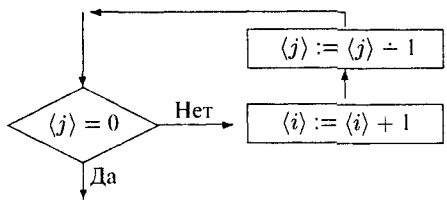


Если P — хорошо определенная программа, то следует выполнять P до тех пор, пока содержимое регистра с номером i не обратится в нуль.

Каждая элементарная операция (1) или (2) программы засчитывается как шаг вычисления. Простой пример — следующая программа сложения (диаграмма 2).

Каждое состояние машины иллюстрируется следующей матрицей, которая по возрастанию складывает содержимое y регистра $\langle j \rangle$ с содержимым x регистра $\langle i \rangle$ и одновременно

Диаграмма 2



уменьшает содержимое $\langle j \rangle$ до нуля. Результат сложения $x+y$ показан в регистре $\langle j \rangle$:

$\langle i \rangle$	$\langle j \rangle$
x	y
$x+1$	$y \dot{-} 1$
$\vdots$	$\vdots$
$x+y$	$y \dot{-} y$

По определению, регистровая машина с программой F вычисляет функцию f с n аргументами, если для произвольных аргументов $x_1, \ldots, x_n$ в регистрах $1, \ldots, n$ (с нулями во всех остальных регистрах) программа F выполняется и останавливается после конечного числа шагов, причем аргументы функции находятся в регистрах $1, \ldots, n$, а значение функции $f(x_1, \ldots, x_n)$ — в регистре $n+1$.

Программа
$$\langle 1 \rangle := x_1; \quad \ldots; \quad \langle n \rangle := x_n$$
$$\downarrow$$
$$F$$
$$\downarrow$$
$$\langle n+1 \rangle := f(x_1, \ldots, x_n)$$
работает согласно соответствующей матрице. Функция f называется вычислимой с помощью регистровой машины RM (RM-вычислимой), если существует программа F, вычисляющая f.

Число шагов, которые нужны определенной программе F для вычисления функции f, определяется программой и зависит от аргументов

функции. Сложность программы F измеряется функцией $s_F(x_1, \ldots, x_n)$, подсчитывающей шаги вычисления согласно программе F. Например, матрица программы сложения для $x + y$ показывает, что необходимо y элементарных шагов прибавления 1 и y элементарных шагов вычитания 1. Таким образом, $s_F(x, y) = 2y$. Так как RM-вычислимая функция f может быть вычислена разными программами, то функция g называется счетчиком шагов вычисления функции f, если существует программа F для вычисления f с

$$g(x_1, \ldots, x_n) = s_F(x_1, \ldots, x_n)$$

для всех аргументов $x_1, \ldots, x_n$. *Сложность функции* определяется как сложность наилучшей программы, вычисляющей эту функцию за наименьшее число шагов.

Очевидно, что регистровая машина Минского является интуитивным обобщением ручной вычислительной машины Лейбница. Но исторически сначала в 1936 г. были независимо Аланом Тьюрингом и Эмилем Постом предложены другие, эквивалентные типы машин. Машина Тьюринга (рис. 5.2 *а*) может выполнять любую эффективную процедуру при условии, что она правильно запрограммирована [5.9]. Эта машина состоит из:

1) блока управления, в котором размещена конечная программа;
2) потенциально бесконечной ленты, разделенной в продольном направлении на квадраты;
3) устройства для считывания содержимого или печати на одном квадрате ленты в данный момент времени, а также для перемещения вдоль ленты или остановки по командам блока управления.

Если используемые в машине Тьюринга символы ограничены черточкой | и звездочкой *, то можно доказать, что RM-вычислимая функция вычислима и с помощью машины Тьюринга и наоборот. Нужно помнить, что каждое целое число x можно представить последовательностью черточек (например, 3 это |||), каждая из которых занимает один квадрат на ленте машины Тьюринга. Звездочка * используется для обозначения того, что квадрат пуст (или соответствующее число равно нулю). В частности, звездочка необходима для разделения последовательностей черточек, представляющих числа. Так, машина Тьюринга, вычисляющая функцию f с аргументами $x_1, \ldots, x_n$, начинается с ввода значков

$$\cdots * x_1 * x_2 * \cdots * x_n * \cdots$$

на ленте и останавливается, когда на ленте появляются значки

$$\cdots * x_1 * x_2 * \cdots * x_n * f(x_1, \ldots x_n) * \cdots .$$

С логической точки зрения, универсальный компьютер, подобный тем, которые создали коллеги Джона фон Неймана в Америке и Конрад Зузе в Германии, — это техническая реализация универсальной машины Тьюринга, способной имитировать программу Тьюринга любого типа. Аналогично, можно определить универсальную регистровую машину, способную выполнять регистровую программу любого типа. В действительности, общая схема компьютера фон Неймана состоит из центрального процессора (программного контроллера), памяти, арифметического блока и устройств ввода-вывода. Эта машина шаг за шагом выполняет последовательные операции. Современный компьютер типа предложенного фон Нейманом действительно представляет собой обобщенную машину Тьюринга. Эффективность машины Тьюринга

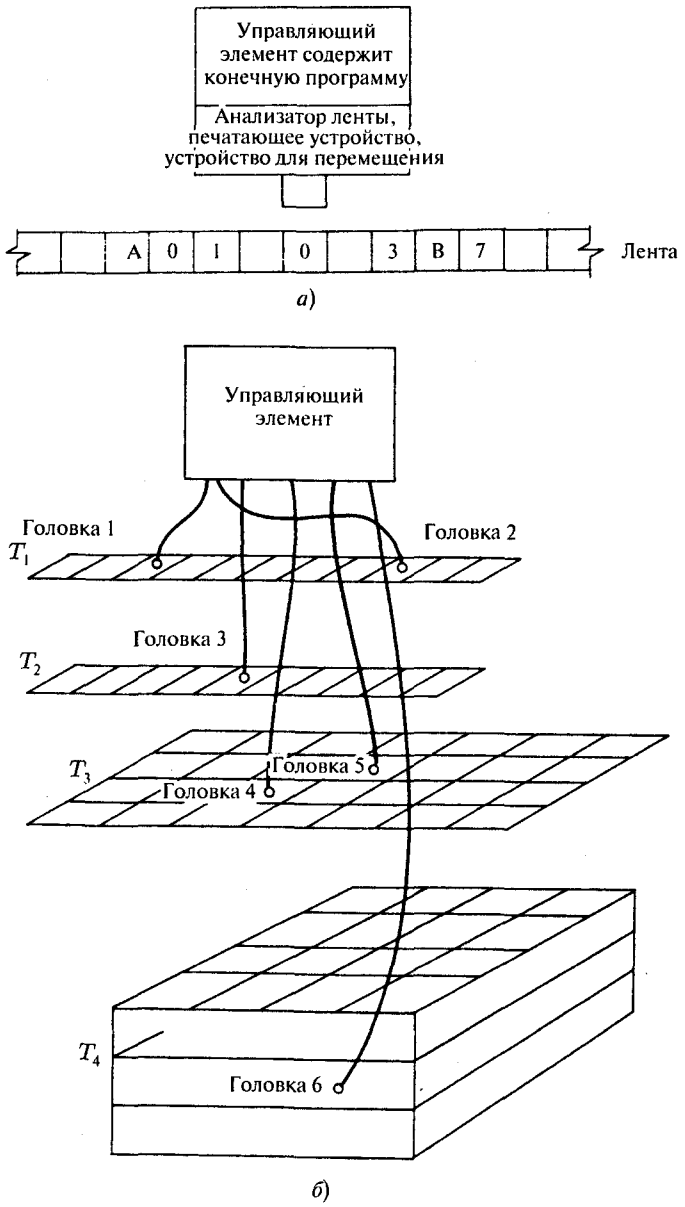


Рис. 5.2. Машина Тьюринга с одной (*а*) и с несколькими лентами (*б*) [5.10]

может быть увеличена путем введения нескольких, не обязательно одномерных лент, на каждую из которых действуют одна или несколько считывающих головок, передающих информацию с ленты в единственный блок управления, координирующий все действия машины (рис. 5.2 *б*) [5.10]. Следовательно, всякое вычисление на такой более эффективной

машине может быть произведено и на обычной машине Тьюринга. Если говорить о подходе, основанном на теории сложных систем, то даже машина Тьюринга с несколькими многомерными лентами остается последовательным программно управляемым компьютером, существенно отличающимся от самоорганизующихся систем типа нейронных сетей.

Помимо машин Тьюринга и регистровых машин существует много других математически эквивалентных процедур для определения вычислимых функций. Рекурсивные функции определяются процедурами функциональной подстановки и итерации, начиная с некоторых элементарных функций (например, функция упорядочивания $n(x) = x + 1$), которые очевидно вычислимы. Можно доказать, что все эти определения вычислимости с помощью машин Тьюринга, регистровых машин, рекурсивных функций и т. д. математически эквивалентны. Очевидно, что каждое из этих точных понятий определяет процедуру, которая интуитивно эффективна.

Таким образом, Алонсо Черч постулировал свой знаменитый тезис, что *неформальное интуитивное понятие эффективной процедуры тождественно одному из указанных точных понятий, например, понятию машины Тьюринга.* Конечно, утверждение Черча нельзя доказать, так как математически точные понятия сравниваются с неформальным интуитивным понятием. Тем не менее математическая эквивалентность ряда точных понятий вычислимости, являющихся интуитивно эффективными, подтверждает тезис Черча. Следовательно, можно говорить о вычислимости, эффективности и вычислимых функциях, не ссылаясь на конкретные эффективные процедуры («алгоритмы»), машины Тьюринга, регистровые машины, рекурсивные функции и т. д. Согласно тезису Черча, можно, в частности, сказать, что каждая вычислительная процедура (алгоритм) может быть реализована на машине Тьюринга. Поэтому всякая рекурсивная функция, являясь типом машинной программы, может быть вычислена на универсальном компьютере [5.11].

Теперь у нас есть возможность определить эффективные процедуры разрешимости и перечислимости, которые уже требовались в программе *mathesis universalis* Лейбница. *Характеристическая функция* $f_M(x)$ подмножества M натуральных чисел определяется как $f_M(x) = 1$, если x — элемент M, и как $f_M(x) = 0$ в противном случае. Таким образом, множество M определяется как *эффективно разрешимое*, если его характеристическая функция, показывающая, принадлежит или нет данное число к M, *эффективно вычислима* (или рекурсивна).

Множество M определяется как *эффективно* (рекурсивно) *перечислимое*, если существует эффективная (рекурсивная) процедура f для генерации его элементов одного за другим (формально $f(1) = x_1$, $f(2) = x_2$ для всех элементов $x_1, x_2, \ldots$ из M). Можно легко доказать, что всякое рекурсивное (разрешимое) множество является рекурсивно перечислимым. Но существуют рекурсивно перечислимые множества, которые не разрешимы. Здесь мы видим первые указания на то, что существуют пределы первоначально оптимистичной программы Лейбница, основанной на вере в универсальные разрешимые процедуры.

Что касается естественного и искусственного интеллекта, то парадигма эффективной вычислимости требует, чтобы разум был представлен

программно управляемыми машинами, а ментальные структуры относились к структурам символических данных, в то время как ментальные процессы реализовали бы алгоритмы. Исторически суть исследований по ИИ была установлена во время Дартмутской конференции в 1956 г., где ведущие ученые, такие как Джон Маккарти, Алан Ньюэлл, Герберт Саймон и другие представители разных наук, образовали новое научное сообщество по изучению ИИ. Все участники конференции были воодушевлены вопросом Тьюринга «Может ли машина мыслить?», заданным в его знаменитой статье «Вычислительные машины и разум» (1950).

В традициях лейбницевского *mathesis universalis* можно считать, что человеческое мышление формализуется с помощью какого-нибудь универсального исчисления. Говоря современным языком, можно предполагать, что человеческое мышление представимо некоторым мощным формальным языком программирования. В любом случае формулы — это последовательности символов, которые кодируются натуральными числами. Тогда утверждениям об объектах соответствовали бы функции от чисел, заключения следовали бы из своего рода эффективной численной процедуры и т. п. В действительности машинный язык современного компьютера состоит из последовательности чисел, кодирующих каждое состояние и действие машины. Таким образом, действия компьютера могут быть описаны эффективной или рекурсивной численной процедурой.

Если человеческое мышление можно представить рекурсивной функцией, тогда, в силу тезиса Черча, оно представимо программой Тьюринга, которую можно выполнить с помощью универсальной машины Тьюринга. Таким образом, человеческое мышление можно имитировать универсальным компьютером и, в этом смысле, на вопрос Тьюринга следует ответить «да». Предположение о том, что человеческое мышление может быть закодировано и представлено рекурсивными процедурами, конечно, вызывает сомнения. Даже процессы математического мышления могут быть более сложными, чем рекурсивные функции. Рекурсивность или вычислимость по Тьюрингу есть, согласно тезису Черча, лишь теоретический предел вычислимости.

В последующем мы хотим рассмотреть проблемы, связанные со степенью сложности, в областях одновременно ниже и вдали от этого предела. Ниже этого предела существует множество практических задач, касающихся разных ограничений на то, насколько можно увеличить скорость выполнения алгоритма. Особенно среди математических задач существуют определенные классы проблем, которые гораздо труднее решить алгоритмически, чем другие. Таким образом, для машин Тьюринга существуют степени вычислимости, точное определение которых дается в теории сложности вычислений [5.12].

Классы сложности задач (или соответствующих функций) можно охарактеризовать уровнями сложности, определяющими порядок функций, описывающих время вычислений (или число элементарных шагов вычислений) алгоритмов (или вычислительных программ) в зависимости от длины вводимых чисел. Длина вводимых чисел может быть измерена числом десятичных цифр. В соответствии с машинным языком компьютера удобно закодировать десятичные числа двоичными кодами всего лишь с двумя

двоичными числами, 0 и 1, и определить длину этих чисел числом двоичных цифр. Например, числу 3 в двоичном коде соответствует 11, и длина этого числа равна 2. Время вычислений функции f линейно, если оно не больше чем $c \cdot n$ для всех вводимых чисел длиной n, где c — некоторая константа.

Сложение двух (двоичных) чисел требует, очевидно, только линейного времени вычислений. Например, задача $3 + 7 = 10$ соответствует двоичному вычислению

$$\begin{array}{cccc} & 0 & 1 & 1 \\ & 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 0 & 1 & 0 \end{array},$$

требующему 5 элементарных вычислительных шагов по сложению двух двоичных цифр (включая перенос регистра). Напомним читателю, что элементарные шаги при сложении двоичных цифр — это

$$0+0=0, \quad 0+1=1,$$
$$1+0=1, \quad 1+1=10$$

и перенос цифры в старший разряд. Удобно предполагать, что два числа, которые нужно сложить, имеют одинаковую длину. Если это не так, можно просто начать более короткое число с ряда нулей, например, 111 и 011 вместо 11. В общем случае, если длина конкретной пары складываемых чисел равна n, длина числа равна $n/2$ и поэтому для вычисления с учетом переноса требуется не более чем $n/2+n/2 = n$ элементарных шагов.

Время вычислений функции f квадратично, если оно не больше чем $c \cdot n^2$ для всех вводимых чисел длиной n, где c — некоторая константа.

Простой пример квадратичного времени вычислений — умножение двух (двоичных) чисел. Например, задача $7 \cdot 3 = 21$ соответствует двоичному вычислению

$$\begin{array}{ccccccc} 1 & 1 & 1 & \cdot & 0 & 1 & 1 \\ \hline & & 0 & 0 & 0 & & \\ & & & 1 & 1 & 1 & \\ & & & & 1 & 1 & 1 \\ \hline & & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{array}.$$

Согласно предыдущим соглашениям $n = 6$. Число элементарных двоичных умножений равно

$$\frac{n}{2} \cdot \frac{n}{2} = \frac{n^2}{4}.$$

С учетом переноса число элементарных двоичных сложений равно

$$\frac{n}{2} \cdot \frac{n}{2} - \frac{n}{2} = \frac{n^2}{4} - \frac{n}{2}.$$

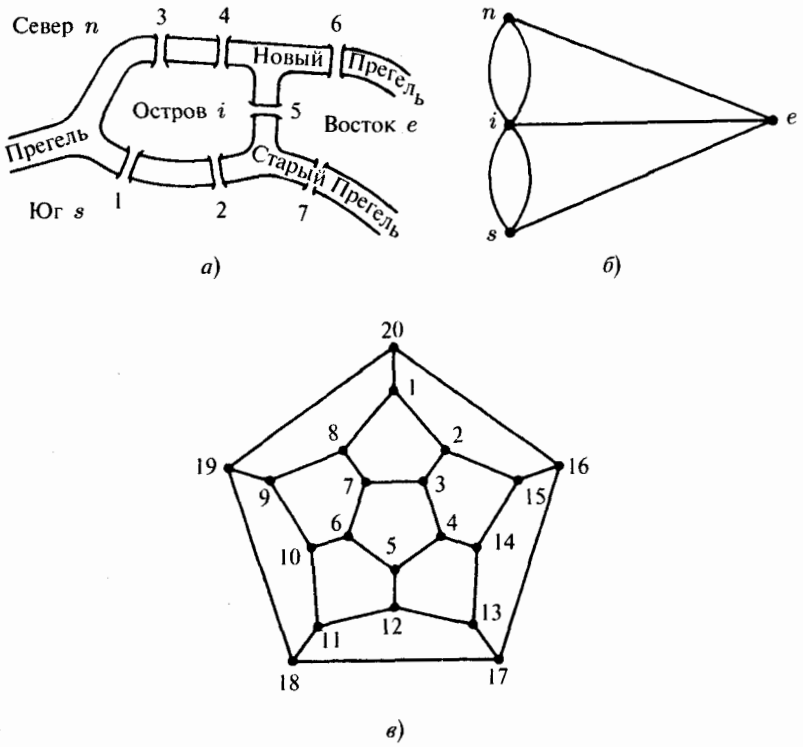
В целом находим

$$\frac{n^2}{4} + \frac{n^2}{4} - \frac{n}{2} = \frac{n^2}{2} - \frac{n}{2},$$

что меньше, чем $n^2/2$.

Время вычислений функции f полиномиально, если оно не больше, чем $c \cdot n^k$, что, по предположению, является старшим членом полинома $p(n)$. Время вычислений функции f экспоненциально, если оно не больше чем $c \cdot 2^{p(n)}$. Многие практические и теоретические задачи принадлежат к *классу сложности* P всех функций, которые можно вычислить детерминистской машиной Тьюринга за *полиномиальное время*.

В истории математики известны некоторые изящные задачи теории графов, иллюстрирующие основные понятия теории сложности [5.13]. В 1736 г. выдающийся математик Леонард Эйлер (1707–1783) решил одну из первых задач теории графов. В городе Кёнигсберге, столице Пруссии, две реки, называемые Старый Прегель и Новый Прегель, сливаются в реку Прегель. В XVIII в. существовало семь мостов, связывающих южный s, северный n и восточный e районы



а) *б*) *в*)

Рис. 5.3. Задача Эйлера о мостах через реки в Кёнигсберге (*а*); граф, соответствующий задаче Эйлера (*б*); задача Гамильтона (*в*)

города с островом i (рис. 5.3 *а*). Существует ли путь, который проходит по всем мостам только один раз и возвращается в исходную точку?

Эйлер свел задачу к теории графов. Районы n, s, i, e заменены вершинами графа, а мосты между двумя районами — ребрами, соединяющими соответствующие вершины (рис. 5.3 *б*).

На языке теории графов задача Эйлера состоит в выяснении, существует ли для каждой вершины путь («контур Эйлера»), проходящий по каждому ребру ровно один раз и возвращающийся в исходную вершину. Эйлер доказал, что для произвольных графов контур Эйлера существует тогда и только тогда, когда в каждой вершине сходится четное число ребер («условие Эйлера»). Так как граф на рис. 5.3 *б* не удовлетворяет этому условию, решения задачи Эйлера для него не существует. В общем случае существует алгоритм, проверяющий с помощью условия Эйлера, является ли данный граф контуром Эйлера. Входящими параметрами алгоритма являются множество V всех вершин $1, \ldots, n$ и множество E всех ребер, являющееся подмножеством множества всех пар вершин. Время вычислений по этому алгоритму линейно зависит от размера графа, определяемого суммой числа вершин и ребер.

В 1859 г. математик Уильям Гамильтон (1805–1865) предложил довольно похожую задачу, которая на самом деле намного сложнее задачи

Эйлера. Гамильтон рассмотрел произвольный граф, т. е. конечную совокупность вершин, определенное число пар которых связаны ребрами. Задача Гамильтона состоит в определении, существует ли замкнутый контур («контур Гамильтона»), проходящий каждую вершину (а не каждое ребро, как в задаче Эйлера) ровно один раз. На рис. 5.3 *в* показан некоторый граф и контур Гамильтона, проходящий вершины в порядке их нумерации.

Однако, в противоположность задаче Эйлера, мы не знаем какого-либо условия, которое точно определяет, содержит ли данный граф контур Гамильтона или нет. Мы можем только построить алгоритм, проверяющий, содержит ли произвольный граф контур Гамильтона или нет. Алгоритм проверяет все перестановки вершин, с тем чтобы увидеть, образуют ли они контур Гамильтона. Так как имеется $n!$ различных перестановок n вершин, то для нахождения решения алгоритму требуется не более чем $c \cdot n!$ шагов, где c — некоторая константа. Можно легко доказать, что порядок $n!$ соответствует порядку n^n. Следовательно, алгоритм для задачи Гамильтона требует экспоненциального времени вычислений, в то время как задача Эйлера может быть алгоритмически решена за линейное время вычислений. Отсюда следует, что задача Гамильтона практически не может быть решена на компьютере даже при малых числах n.

Главной причиной большого времени вычислений может быть большое число отдельных подслучаев, которые должны проверяться детерминированным компьютером по одному, шаг за шагом. Более удобно использовать недетерминированный компьютер, позволяющий случайным образом выбрать вычислительную процедуру среди конечного числа возможных, вместо того чтобы выполнять их последовательно, шаг за шагом. Рассмотрим снова задачу Гамильтона. Исходный граф может иметь n вершин $v_1, \ldots, v_n$. Недетерминированный алгоритм случайным образом выбирает определенный порядок $v_{i_1}, \ldots, v_{i_n}$ вершин. Затем алгоритм проверяет, образует ли данный порядок контур Гамильтона. Вопрос состоит в том, соединены ли ребрами последовательные вершины v_{i_j} и $v_{i_{j+1}}$ и начальная и конечная вершины v_{i_n} и v_{i_1} для всех чисел j ($j = 1, \ldots, n-1$). Время вычислений по этому недетерминированному алгоритму линейно зависит от размера графа[5)].

В общем случае NP означает класс сложности функций, которые могут быть рассчитаны недетерминированной машиной Тьюринга за полиномиальное время. Задача Гамильтона есть пример NP-задачи. Другой NP-задачей является «задача коммивояжера», довольно похожая на задачу Гамильтона, с той разницей, что разные ребра имеют присвоенные им номера. Ищется контур Гамильтона, для которого сумма номеров, или, на более понятном языке, расстояние, пройденное коммивояжером, минимально.

По определению, всякая P-задача является NP-задачей. Но ключевым вопросом теории сложности является справедливость равенства P = NP, или, иными словами, вопрос о том, могут ли задачи, «решаемые» недетерминированным компьютером за полиномиальное время, быть также решены детерминированным компьютером за полиномиальное время [5.14].

[5)] Иными словами, если мы «угадали» решение, то проверить, что оно действительно является решением, здесь можно за полиномиальное время. — *Прим. ред.*

Задача Гамильтона и задача коммивояжера являются примерами так называемых NP-полных задач. Это означает, что любая другая NP-задача может быть сведена к ней за полиномиальное время. Следовательно, если будет доказано, что NP-полная задача на самом деле есть P-задача (например, если можно построить детерминированный алгоритм для решения задачи Гамильтона за полиномиальное время), то отсюда будет вытекать, что все NP-задачи являются P-задачами. Обратно, если $P \neq NP$, то ни одна NP-полная задача не может быть решена с помощью детерминированного алгоритма за полиномиальное время.

Очевидно, теория сложности устанавливает степени алгоритмической силы машин Тьюринга и компьютеров тьюринговского типа. Теория имеет практические следствия для научных и промышленных приложений. Но подразумевает ли она ограничения для человеческого разума? Фундаментальные вопросы теории сложности (например, $N = NP$ или $N \neq NP$) относятся к измерению скорости выполнения, времени вычислений, объему памяти и т. п. алгоритмов. Другой вопрос заключается в том, как кто-то намеревается искать более или менее сложные алгоритмы. В этом и состоит созидательная работа ученого-компьютерщика, которая не рассматривается в теории сложности алгоритмов.

С другой стороны, иногда говорят, что знаменитые теоремы Гёделя ограничивают математическую мощь компьютеров и человеческого разума. *Теорема Гёделя о неполноте* утверждает, что в каждом непротиворечиво аксиоматизированном расширении формальной теории чисел существует (замкнутая) формула, которая невыводима. Действительно, теорема утверждает, что любая достаточно непротиворечивая арифметическая логика неполна в том смысле, что существуют истинные утверждения относительно целых чисел, которые недоказуемы в рамках этой логики. Даже если расширить аксиоматизацию, включив в нее невыводимую формулу, то будет существовать другая формула, неразрешимая в рамках расширенного формализма. Результат Гёделя показывает, что формалистический поиск полностью непротиворечивой арифметической логики в традициях Лейбница и Гильберта обречен на неудачу [5.15].

Кроме того, Гёдель показал, что невозможно доказать непротиворечивость (возможно, неполной) арифметической логики с помощью методов, которые можно представить самой этой логикой. Через несколько лет после знаменитого результата Гёделя, Герхард Гентцен (1909–1945) доказал непротиворечивость элементарной теории чисел, используя так называемую ε_0-индукцию, представляющую инфинитарное расширение обычной арифметической индукции на натуральные числа. Однако непротиворечивость расширенного метода доказательства Гентцена столь же сомнительна, как и непротиворечивость системы, которую следует доказать. Иными словами, сложность метода доказательства не меньше, чем сложность доказываемой системы. Таким образом, имеются только относительно непротиворечивые доказательства, использующие методы, которые следует доказывать методами, которые следует доказывать, и т. д. Для человеческого мышления не существует абсолютной основы самосогласованности, которую можно было бы подтвердить формальными алгоритмами.

Благодаря Гёделю мы знаем, что непротиворечивая аксиоматическая система арифметики не может быть

полной [5.16]. Но мог бы существовать процесс принятия решений, который позволил бы решить, верно или нет данное утверждение. В 1936 г. Тьюринг доказал, что такой универсальной процедуры принятия решений существовать не может — утверждение полностью в духе Лейбница и Гильберта [5.17]. Доказательство Тьюринга в определенном смысле глубже, чем у Гёделя, так как он свел проблему принятия решений Гильберта к так называемой проблеме останова — основной проблеме вычислимости и алгоритмической сложности. Универсальная процедура принятия решений была бы способна определить, остановится ли произвольная компьютерная программа после конечного числа шагов. Тьюринг доказал, что проблема останова в принципе неразрешима. Отсюда гёделевская неполнота есть лишь следствие доказательства Тьюринга.

Тьюринг начинает свое доказательство с вопроса: «Вычислимы ли действительные числа?» Действительное число, например, $\pi = 3{,}1415926\ldots$, имеет бесконечное число цифр, кажущихся случайным образом распределенными после запятой. Тем не менее существуют простые конечные программы для расчета этих цифр шаг за шагом и получения все более точного значения числа π. В этом смысле π называется вычислимым действительным числом. На первом шаге своего доказательства Тьюринг строит невычислимое действительное число. Напомним, что компьютерная программа для машины Тьюринга состоит из конечного списка символов. Следовательно, она может быть закодирована натуральным числом, которое называется программным номером. Вообразите список всех возможных компьютерных программ, упорядоченных по возрастанию их программных номеров $p_1, p_2, p_3 \ldots$. Если программа вычисляет действительное число с бесконечным числом цифр после запятой (например, π), то эти цифры должны быть выписаны за соответствующим программным номером. В противном случае в списке остается пустая строка:

$$
\begin{aligned}
p_1 &\quad -.\underline{d_{11}}d_{12}d_{13}d_{14}d_{15}d_{16}d_{17}\ldots\\
p_2 &\quad -.d_{21}\underline{d_{22}}d_{23}d_{24}d_{25}d_{26}d_{27}\ldots\\
p_3 &\quad -.d_{31}d_{32}\underline{d_{33}}d_{34}d_{35}d_{36}d_{37}\ldots\\
p_4 &\\
p_5 &\quad -.d_{51}d_{52}d_{53}d_{54}\underline{d_{55}}d_{56}d_{57}\ldots\\
&\ \ \vdots
\end{aligned}
$$

Следуя диагональной процедуре Кантора, Тьюринг изменил подчеркнутые цифры на диагонали списка и поместил эти измененные цифры в виде цифр нового числа с десятичной запятой впереди:

$$-, \neq d_{11} \neq d_{22} \neq d_{33} \neq d_{44} \neq d_{55}\ldots .$$

Это новое число не может находиться в списке, так как его первая цифра после запятой отличается от первой цифры первого числа, следующего за p_1, вторая цифра отличается от второй цифры второго числа за p_2, и т. д. Следовательно, это невычислимое действительное число. Построив такое число, Тьюринг доказывает неразрешимость проблемы останова. Если бы мы могли решить проблему останова, тогда мы могли бы решить, выдаст ли когда-нибудь n-я компьютерная программа n-ю цифру после запятой. В этом случае мы смогли бы на самом деле осуществить диагональную процедуру Кантора и вычислить действительное число, которое, по его определению, должно отличаться от любого вычислимого действительного числа.

Неразрешимость проблемы останова опровергает проблему принятия решений Гильберта. Если существует полная формальная система аксиом, из которой следуют все математические истины, то эта система предоставила бы нам процедуру для решения вопроса о том, остановится ли когда-нибудь компьютерная программа. Мы должны просто пробежаться по всем возможным доказательствам, пока либо найдем доказательство того, что программа остановится, либо найдем доказательство того, что она никогда не остановится. Таким образом, если бы было возможно установить гильбертово конечное множество аксиом, из которых следовали бы все математические утверждения, то, пробежавшись по всем возможным доказательствам и проверяя, какие из них правильны, мы смогли бы решить, остановится программа или нет. Согласно доказательству Тьюринга такое невозможно.

Формальная аксиоматическая система имеет то большое преимущество, что она сжимает много теорем в одно множество нескольких аксиом. Следовательно, она допускает сокращенное описание математической истины. Даже физическую теорию можно понимать как сокращенное описание многих эмпирических данных. В общем случае формальную теорию можно рассматривать как компьютерную программу, вычисляющую правильные теоремы или данные. Чем меньше размер программы, по сравнению с размером вывода, тем лучше теория. Очевидно, что, помимо времени счета, важной мерой вычислительной сложности является размер компьютерной программы. Так как программа есть конечный список символов, ее длина может быть измерена числом символов в двоичном коде:

$$s_1 = 1111111111111111$$
$$s_2 = 0101010101010101$$
$$s_3 = 0110100011011110100.$$

Для s_1 и s_2 существуют более короткие описания или печатающие программы, чем реальный вывод: «14 раз по 1» или «8 раз по 01». Но для s_2, похоже, не существует более короткой записи, кроме реального вывода. Григорий Дж. Чайтин и Андрей Николаевич Колмогоров высказали идею, что *алгоритмическая сложность* последовательности s символов должна определяться (измеренной в битах) длиной самой короткой компьютерной программы для генерации s [5.18]. Алгоритмическую сложность иногда называют алгоритмическим информационным содержанием последовательности символов, являющимся предметом изучения алгоритмической теории информации. Так как случайные последовательности не содержат регулярностей, они не могут быть описаны более короткими программами. Они несжимаемы с алгоритмической сложностью, эквивалентной их длине. Здесь мы снова сталкиваемся с проблемами неполноты и неразрешимости. Дело в том, что мы никогда не можем решить, удовлетворяет ли отдельная строка цифр этому определению случайности и несжимаемости. Мы никогда не сможем вычислить сложность, связанную с размером программы, поскольку, в общем случае, невозможно решить, является ли какая-то программа самой короткой из возможных. Если у нас есть программа, генерирующая последовательность, ее размер — это только верхняя граница сложности последовательности, связанной с размером программы. Но нам никогда не удастся найти нижнюю границу, и это есть первый резуль-

тат, характеризующий неполноту алгоритмической теории информации.

В теории вычислительной сложности, по отношению ко времени выполнения программ, нижние границы найти намного сложнее, чем верхние. Если найдена быстрая программа, мы получаем только верхнюю границу времени вычислений. По крайней мере, в ряде случаев можно доказать, что определенная программа является наибыстрейшей из возможных. Но в алгоритмической теории информации мы никогда не сумеем доказать существование любой нижней границы. Тем не менее существуют некоторые относительные результаты. Сложность формальных теорий и программ, связанная с их размерами, может иметь отношение к языкам программирования, на которых они написаны. Чайтин предпочитал ИИ-программирующий язык LISP [5.19]. В этом языке формальная аксиоматическая система со связанной с размером программы сложностью N не может быть использована для доказательства того, что для любого выражения на языке LISP длиной более чем $N + 356$ знаков не существует более короткой программы с тем же выходом. Таким образом, эта формальная аксиоматическая система может только доказать, что для многих конечных выражений не существует меньшей программы с тем же выводом. В принципе случайность формальной последовательности не может быть бесспорной. Но для практических приложений мы можем, по меньшей мере, сослаться на стандартные процедуры выявления регулярностей в последовательности. Если мы не преуспеем в этом, последовательность называется случайной по отношению к данным алгоритмам.

5.3. От обработки информации к обработке знаний

Вычислительные системы можно рассматривать как машины, обрабатывающие информацию. Чтобы определить алгоритмическое информационное содержание послания, алгоритмическая теория информации обращается к размеру компьютерной программы. Согласно теории информации Шеннона [5.20], послание от отправителя (например, с телефона, ПК) передается получателю путем кодирования знаков в послании с помощью двоичных цифр («битов»), реализованных посредством каких-либо технических средств (например, электрических импульсов), и декодирования их при получении послания. Связь означает обмен информацией. Информационное содержание символа равно числу двоичных выборов, которые требуются, чтобы выбрать его из доступного множества символов (алфавита). Для N символов имеется $N = 2^I$ выбирающих процедур с I двоичными выборами, т. е. $I = \mathrm{ld}\, N$ бит[6]. Если символы s_i ($1 \leqslant i \leqslant N$) возникают с разными вероятностями p_i, тогда их информационное содержание равно

$$I(s_i) = \mathrm{ld}\, p_i^{-1} = -\mathrm{ld}\, p_i \text{ бит.}$$

Более вероятный символ имеет меньшее информационное содержание, чем менее вероятный. В этом смысле информационное содержание символа можно рассматривать как меру неожиданности сообщения для получателя.

Среднее информационное содержание послания с символами s_i равно математическому ожиданию инфор-

[6] Через ld здесь обозначен логарифм по основанию $2 - \log_2$. — *Прим. ред.*

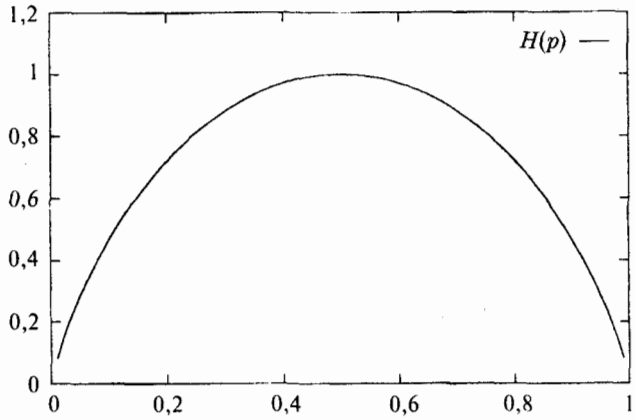


Рис. 5.4. Среднее информационное содержание (информационная энтропия) системы с двумя символами (состояниями) с $p_1 = p$ и $p_2 = 1 - p$

мационных содержаний $I(s_i)$ его символов s_i, т. е.

$$H = c \sum_i p_i I(s_i) = - \sum_i p_i \operatorname{ld} p_i,$$

где $\sum_i p_i = 1$. Среднее информационное содержание H можно рассматривать как меру неопределенности для распределения вероятностей символов источника информации (рис. 5.4). Причина в том, что в случае однородного распределения вероятностей среднее информационное содержание $H_{\max}$ источника максимально, т. е. неопределенность символа максимальна. Если $H = 0$, то $p_i = 1$, т. е. символ s_i определяется источником.

Шенноновское понятие информации, которое мы обсудили выше, применимо не только в технике. В процессе эволюции химическая и биологическая информация была закодирована молекулами и может быть распознана (декодирована) с помощью подходящих молекул, клеток или организмов (молекулярное распознавание образов). *Генетическая информация* организма закодирована четырьмя химическими веществами: аденином (А), цитозином (Ц), гуанином (Г) и урацилом (У)[7]. В двоичной кодировке А = 00, У = 11, Г = 01, Ц = 10, и мы получаем генетический код в битах. Чувственные раздражители человеческого организма представляют собой аналоговые сигналы (например, механическое сдавливание кожи или мускулов, акустические волны в ухе, электромагнитные волны в сетчатке, химические раздражители в носу), которые воспринимаются сенсорными клетками, кодируются в цифровые биопотенциалы и посылаются как двоичные коды (возбуждающие или не возбуждающие нейроны) в центральную нервную систему (ЦНС) мозга[8]. Конкретные нервные сигналы (нейронная информация) декодиру-

[7] Здесь автор имеет в виду рибонуклеиновую кислоту (РНК), в дизоксирибонуклеиновой кислоте (ДНК) вместо урацила фигурирует близкое основание тимин, и мы имеем дело с четырехбуквенным алфавитом А, Т, Г, Ц. — *Прим. ред.*

[8] Это большое упрощение реальной картины. Видимо, мозг имеет дело не с цифровыми сигналами, удобными для технических систем, а с аналоговыми, типичными для живого. Способ кодировки сигналов в мозге (психологический код) — нерешенная научная проблема. — *Прим. ред.*

ются в определенных областях мозга в виде чувственных восприятий, эмоций, воображения или мыслей. Механический стимул (например, сокращение мускула) воспринимается сенсорной клеткой как аналоговый сигнал и преобразуется в цифровой биопотенциал. Интенсивность возбуждения кодируется числом равных биопотенциалов. Согласно теории, информация может быть сведена к битам — наименьшим единицам двоичных состояний 0 и 1. Согласно квантовой теории, элементарные частицы (например, фотоны) обладают бинарными спиновыми состояниями ↑ (вверх) и ↓ (вниз), которые могут смешиваться в когерентные состояния, называемые квантовыми битами [5.21]. Таким образом, каждое состояние материи можно рассматривать как определенный сорт «сжатой» квантовой информации.

Сохранение информации и информационный поток в веществе, в жизни и в мозге зависят от динамики сложных систем. Согласно Л. Больцману, энтропия S есть мера вероятностного распределения микросостояний элементов (например, скоростей и координат молекул в газе) в сложной динамической системе, порождающего макросостояние (например, газа с данной температурой), т. е. $S = k_B \ln W$, где k_B — постоянная Больцмана, а W — число возможных распределений микросостояний, порождающих данное макросостояние[9]. Согласно второму началу термодинамики, энтропия есть мера нарастающего беспорядка в изолированных системах. Обратимый процесс крайне маловероятен. В теории информации энтропию можно ввести как меру неопределенности случайных величин. Информационная энтропия $H(X)$ случайной переменной X есть математическое ожидание вероятностного распределения ее значений x, т. е.

$$H(X) = \sum_x p(x) \log p(x).$$

Таким образом, в термодинамических системах $H(X)$ есть математическое ожидание распределения вероятностей их микросостояний. При $H(X) = 0$ процесс X детерминирован. При максимальном значении $H(X)$ имеется однородное распределение с максимальной неопределенностью x. Информационная энтропия рассматривается как мера неопределенности.

Согласно Шеннону, чтобы измерить информационный поток в динамической системе, нужно ввести еще ряд понятий теории информации. *Общая энтропия* $H(X, Y)$ случайных переменных X и Y есть математическое ожидание распределения совместных вероятностей $p(x, y)$ значений x и y переменных X и Y. *Условная энтропия* $H(Y \mid X)$ переменных X и Y есть средняя степень неопределенности значения переменной Y, взятая по всем конкретным исходам X. *Относительная* или *перекрестная энтропия* есть мера разности («расстояния») между двумя распределениями $p(x)$ и $q(x)$. *Взаимная информация* $I(X; Y)$ есть мера статистической независимости случайных переменных X и Y, с которыми связаны распределения вероятности $p(X)$ и $p(Y)$. Если X и Y независимы, то $I(X; Y) = 0$. Взаимная информация есть симметричная мера, так как

$$I(X; Y) = I(Y; X),$$
$$I(X; X) = H(X).$$

Взаимную информацию можно рассматривать как меру корреляции между X и Y. Если X — вход, а Y — выход стохастического канала, то $I(X; Y)$

[9] Изменение основания логарифма — lg, ln, ld, log — не принципиально, оно сводится к умножению величины на константу. — *Прим. ред.*

есть количество информации, переданной через стохастический канал. В исследованиях мозга понятие взаимной информации находит замечательное применение. В самоорганизующемся процессе обучения мозг отвечает на разные возбуждения разными кластерами синхронно возбуждающихся нейронов. Согласно теории Хебба (ср. разд. 4.2), эти клеточные ансамбли кодируют связь отдельных свойств в воспринимаемом объекте. Надежность различения между разными возбуждениями и разными кластерами измеряется взаимной информацией между соответствующими случайными переменными.

Информационная система порождает временной ряд N различных символов s_i $(1 \leqslant i \leqslant N)$. Пусть β — распределение символической динамики, а p_i^β — вероятность наблюдения символов s_i в распределении β. Энтропия символической последовательности с распределением β определяется как

$$H^\beta = -\sum_i p_i^\beta \log p_i^\beta.$$

Поток информации I_i^β измеряет предсказуемость динамического шага, совершаемого после p шагов вперед, если задано все прошлое из $n \to \infty$ шагов при $\lim\limits_{n\to\infty} I^\beta(n;p)$, где $I^\beta(n;p)$ — взаимная информация между словом из n последовательных символов и символом, находящимся на p шагов впереди [5.22]. Поэтому такое понятие информационного потока есть расширение понятия энтропии Колмогорова–Синая (табл. 2.1), измеряющей предсказуемость всего на один шаг вперед [5.22]. Имеем $0 \leqslant I^\beta(n;p) \leqslant H^\beta$, где минимальное значение (0) соответствует статистической независимости, а максимальное значение (H^β) — точной предсказуемости. Для хаотичных временны́х рядов

$$I^\beta(n;p) > I^\beta(n;p+1),$$

что отражает потерю информации с ростом числа шагов (рис. 5.5).

Динамическую систему можно рассматривать как машину для обработки информации, вычисляющую на выходе настоящее или будущее состояние по начальному прошлому состоянию на входе. Таким образом, вычислительные попытки определить состояния системы характеризуют вычисли-

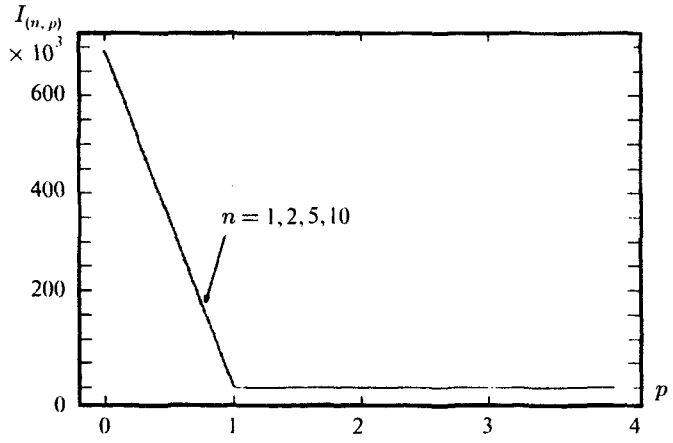


Рис. 5.5. Информационный поток с потерей информации на одном шаге ($p = 1$) для хаотичного логистического отображения $x_{n+1} = 4x_n(1-x_n)$ при $n = 1, 2, 5, 10$ и деления на две части [5.23]

тельную сложность динамической системы. Переход от регулярных к хаотическим системам соответствует росту вычислительных проблем согласно степеням вычислимости в теории вычислительной сложности. В статистической механике информационный поток динамической системы описывает внутреннюю эволюцию статистических корреляций между прошлыми и будущими состояниями этой системы. Энтропия Колмогорова–Синая (КС) является необычайно полезным понятием при изучении потери предсказуемой информации в динамических системах в соответствии со степенями сложности их аттракторов (табл. 2.1). В действительности энтропия КС дает меру неопределенности предсказания будущего состояния при условии, что (с конечной точностью) известно все прошлое [10].

В случае неподвижных точек и предельных циклов, колебательного или квазипериодического поведения неопределенность или потеря информации отсутствуют, и будущие состояния можно вычислить по прошлому. В хаотичных системах, обладающих чувствительностью по отношению к начальным данным, при предсказании будущего возникает конечная потеря информации в соответствии с убыванием корреляций между прошлыми состояниями и будущим предсказываемым состоянием. Конечная степень неопределенности предсказываемого состояния линейно растет в зависимости от числа шагов в будущее при полном задании прошлого. Но в случае шума энтропия КС становится бесконечной, что означает полную потерю предсказываемой информации, отсутствие корреляций (т. е. статистической независимости) между прошлым и состоянием в будущем. Степень неопределенности становится бесконечной. В общем случае динамические системы могут рассматриваться как детерминированные, стохастические или квантовые компьютеры, рассчитывающие по соответствующим динамическим уравнениям и заданным начальным условиям информацию о настоящих или будущих состояниях. В случае квантовых систем двоичное представление информации заменяется квантовой информацией с суперпозицией двоичных цифр. Таким образом, квантовая информация обеспечивает только вероятностные предсказания будущих состояний.

В технике содержание шенноновской информации в послании означает степень ее новизны для человека-приемника. Но, чтобы решать задачи, недостаточно быть хорошо информированным. Информация должна быть преобразована в знания, в умение принимать решения. Знания и принятие решений стали ключевыми понятиями в развитии искусственного интеллекта (ИИ). В первый период развития исследований по ИИ (1957–1962) главными были вопросы эвристического программирования, т. е. автоматизированного поиска решений человеческих задач в возможных деревьях вывода, контролируемого и вычисляемого эвристикой [5.24]. Примером

[10] Здесь автор перебрасывает мостик между статистической физикой, имеющей дело с микроинформацией (каждое данное состояние не должно распознаваться), и биологией, оперирующей макроинформацией, характерной для живого (например, последовательностью оснований в ДНК). В последнем случае речь идет о случайном запомненном выборе. И, в отличие от статистической физики, здесь есть и механизмы запоминания, и механизмы распознавания этой информации. Этот круг проблем исследуется в построенной Д. С. Чернавским динамической теории информации. Подробнее это описано в книге: *Чернавский Д. С.* Синергетика и информация: Динамическая теория информации. М.: URSS, 2004. 288 с. – *Прим. ред.*

может служить «Логический теоретик» (1957) Ньюэлла, Шоу и Саймона, предоставивший доказательства первых 38 теорем из *Principia Mathematica* Рассела и Уайтхеда. Его эвристика была извлечена из эмпирических правил, используемых рядом людей в психологических тестах.

В 1962 г. эти имитационные процедуры были обобщены и расширены до так называемого «Решателя Общих Задач» (РОЗ), который, по предположению, должен был представлять эвристические рамки принятия решений человеком. Но РОЗ могла только решать некоторые несущественные задачи в формализованном микромире. Другим примером эвристического программирования был поиск выигрышных стратегий в играх (шахматы, шашки). Первые программы распознавания образов (например, лексических и синтаксических списков слов и символов) были основаны на статистических методах. Но в конце концов в этот ранний период ни одна программа не подтвердила эйфорическую веру в общие когнитивные процедуры моделирования. По крайней мере, метафизика этого периода вдохновила Маккарти на создание языка программирования LISP, который был введен как функциональный язык программирования для удобной обработки списков символов и стал самым мощным до сего дня языком программирования для систем работы с базами знаний.

После краха общих методов исследователи ИИ распространили специальные процедуры «семантической обработки информации». Второй период исследований ИИ (1963–1967) характеризовался развитием специализированных программ типа STUDENT для решения простых алгебраических задач, ANALOGY для распознавания образов аналогичных объектов и т. п. Марвин Минский, ведущая фигура в Массачусетском технологическом институте (МТИ) в этот период, отказался от требования психологической имитации. «Современный подход, — сказал он, — характеризуется специальными решениями умно выбранных задач, которые дают иллюзию сложной интеллектуальной деятельности». Впервые было подчеркнуто, что успешное практическое программирование зависит от специальных знаний, что позднее стало центральной идеей для систем работы с базами знаний.

Поиск общих принципов решения задач все еще живет в теоретической компьютерной науке. Дж. А. Робинсон ввел так называемый принцип разрешения, основанный на исчислении предикативной логики и теореме полноты Хербранда, допускающей поиск доказательств с помощью процедур логического опровержения.

Переход к практическому и специализированному программированию в ИИ ускорился во время третьего периода исследований (1967–1972). Этот период характеризовался построением специализированных систем, методов представления знаний и интересом к естественным языкам. Дж. Мозес, который изобрел успешную программу MACSYMA для математических приложений, так описывал изменение парадигм в исследованиях по ИИ: «На самом деле, 1967 г. стал поворотной точкой в моих мыслях, когда стало достаточно ясно, что старые идеи об общих принципах должны уйти... Я выступил с доводом в пользу того, что я назвал приматом экспертизы».

Другим известным достижением в этот период стала программа DENDRAL, которая использовала специализированные знания химика-специ-

алиста по масс-спектроскопии для поиска структурных формул молекул. Парадигмальным примером в этот период стала программа SHRDLU для робота, который мог манипулировать игрушечным миром разных кубиков. Система могла понимать и отвечать по-английски на вопросы, касающиеся мира из кубиков, выполнять приказы по манипулированию кубиками, разделять приказы на серии действий, понимать, что сделано и почему, и описывать все эти действия на английском языке.

В четвертый период (1972–1977) центральной парадигмой, объединившей технику и философию ИИ, стало описание, организация и обработка знаний. Митчелл Фейгенбаум ввел термин «инженерия знаний»[11] для развития так называемых экспертных систем. Примером стала программа MYCIN для медицинской диагностики, которая имитировала врача со специальными медицинскими познаниями в области бактериальных инфекций.

Новым методом представления знаний стала концепция фреймов Марвина Минского. Новым языком программирования для символьной обработки знаний стал PROLOG («ПРОграммирование в ЛОГике»), который можно сравнить с LISP.

Пятый период исследований по ИИ (1977–1986) можно назвать «нормальным» в смысле Томаса Куна, имея в виду, что была разработана и переведена на коммерческую основу парадигма экспертных систем. Были созданы средства, позволявшие строить новые экспертные системы, подобно автомобилям в массовом производстве. ИИ возникает из лабораторных и философских исследований и становится ключевой технологией распространившейся по всему миру индустрии знаний.

В последующем делается упор на экспертные системы, поскольку они представляются наиболее интересными с философской точки зрения [5.25]. Экспертная система — это компьютерная программа, в которую встроены знания и возможности, позволяющие программе действовать на уровне эксперта (например, DENDRAL в химии, MYCIN в медицине). Рассуждения эксперта-человека иллюстрируются схемой на рис. 5.6.

Некоторые экспертные системы могут даже объяснить, почему они отвергают определенные пути рассуждений и выбирают другие. Дизайнеры приложили много усилий, чтобы достичь этого, так как они понимают, что окончательное использование экспертной системы будет зависеть от доверия к ней со стороны пользователей, а доверие будет расти в том случае, если поведение системы будет прозрачным и объяснимым.

Но в противоположность знаниям людей, знание экспертной системы ограничено специализированной информационной базой, не содержащей обобщенного и структурированного знания мира. Поэтому экспертные системы выполняют промежуточную функцию между обычными программами вычислительных машин и людьми (рис. 5.7).

Архитектура экспертной системы состоит из следующих компонентов: база знаний, компонент, решающий задачи (система заключений), объясняющий компонент, компонент овладения знаниями и диалоговый компонент. Координация этих компонентов показана на рис. 5.8 [5.26].

Знание — ключевой фактор в создании экспертной системы. Знания могут быть двух типов. Первый тип — это факты из определенной области,

[11] Область ИИ, связанная с разработкой экспертных систем и баз знаний. — *Прим. пер.*

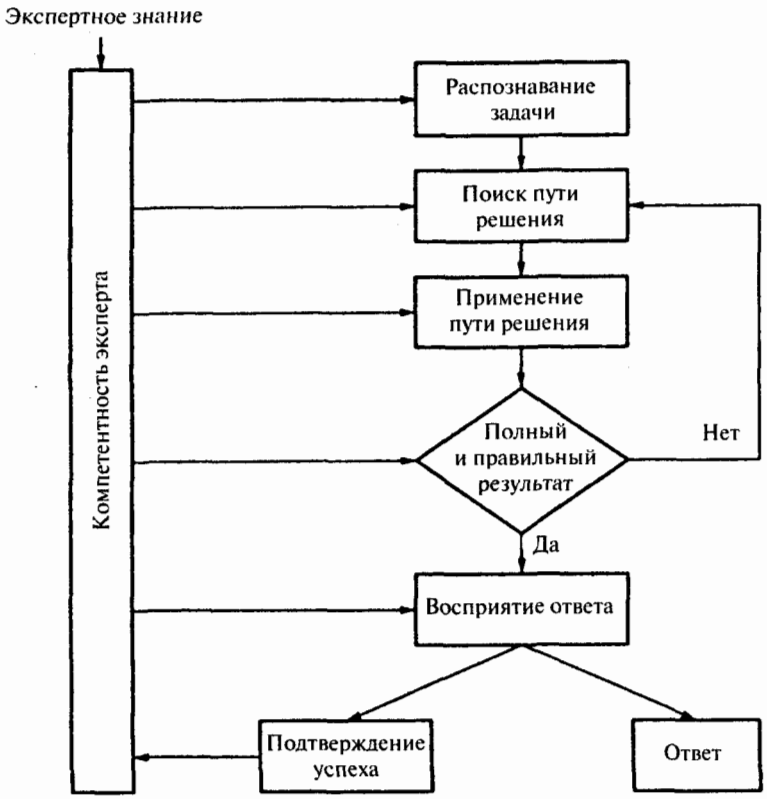


Рис. 5.6. *Рассуждения эксперта-человека*

описанные в учебниках и научных журналах по данной теме. Для работы в какой-то области столь же важны знания второго типа, называемые эвристическими знаниями, т. е. знаниями, возникающими в результате хорошей практики и здравомыслия. Сюда же относятся экспериментальные знания, а также искусство выдвигать хорошие гипотезы, которое приобретается экспертом за годы работы.

Между прочим, базы знаний — не то же самое, что базы данных. Так, для врача, например, база данных — это досье пациента, включающее его историю болезни, измерения жизненно важных показателей, прописанные лекарства и реакцию на них. Эти данные должны интерпретироваться с по-



Рис. 5.7. Положение экспертных систем между числовыми компьютерами и человеком

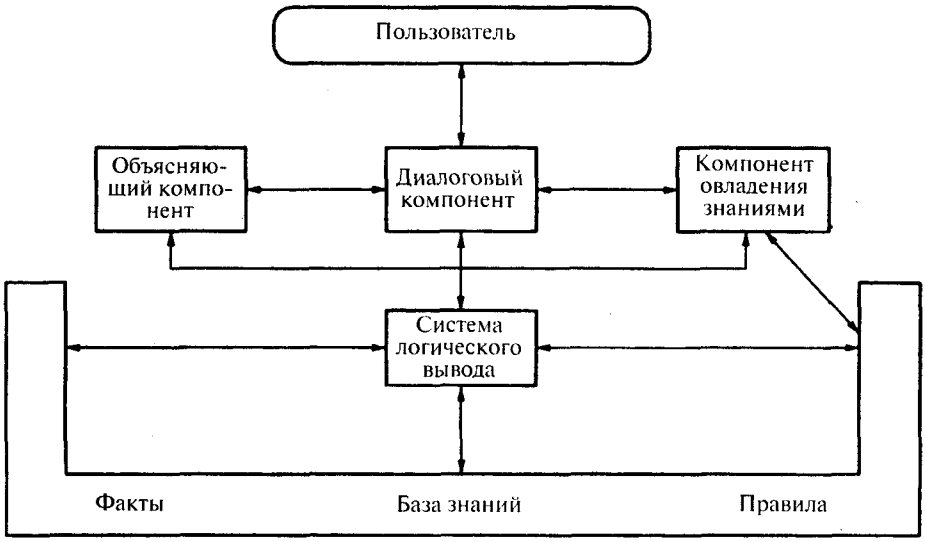


Рис. 5.8. Архитектура экспертной системы

мощью медицинских познаний врача, с тем чтобы продолжить постановку диагноза и выработку плана лечения. База знаний — это то, что выучил врач в процессе своего медицинского образования и за годы работы интерном, в ординатуре, специалистом и практиком. Она состоит из фактов, предубеждений, верований и эвристического знания.

Эвристическое знание труднее всего получить, так как эксперты редко обладают самоанализом [12], чтобы узнать, что это такое. Поэтому инженеры знаний с междисциплинарной подготовкой должны овладевать правилами эксперта, представлять их на программном языке и переводить в работающую программу. Этот компонент экспертной системы называется овладением знаниями. Его центральная функция в обработке знаний в экспертной системе проиллюстрирована на рис. 5.9.

Самые важные методы представления знаний — это производственные системы, логика, фреймы и семантические сети. Вдобавок к знаниям, экспертная система нуждается в процедуре логического вывода, т. е. методе рассуждений, используемом для понимания и воздействия на сочетание знаний и данных задачи. Такие процедуры не зависят от специальной базы знаний и основываются на различных философских методологиях, которые мы проанализируем ниже на нескольких примерах экспертных систем.

Компонент объяснения в экспертной системе имеет задачу объяснить пользователю шаги процедуры. Вопрос «Как?» служит для объяснения фактов или утверждений, которые выводятся системой. Вопрос «Когда?» касается причин или инструкций системы.

Диалоговый компонент управляет связью экспертной системы с поль-

[12] Самоанализ — метод приобретения знаний для использования в системах ИИ. — *Прим. пер.*

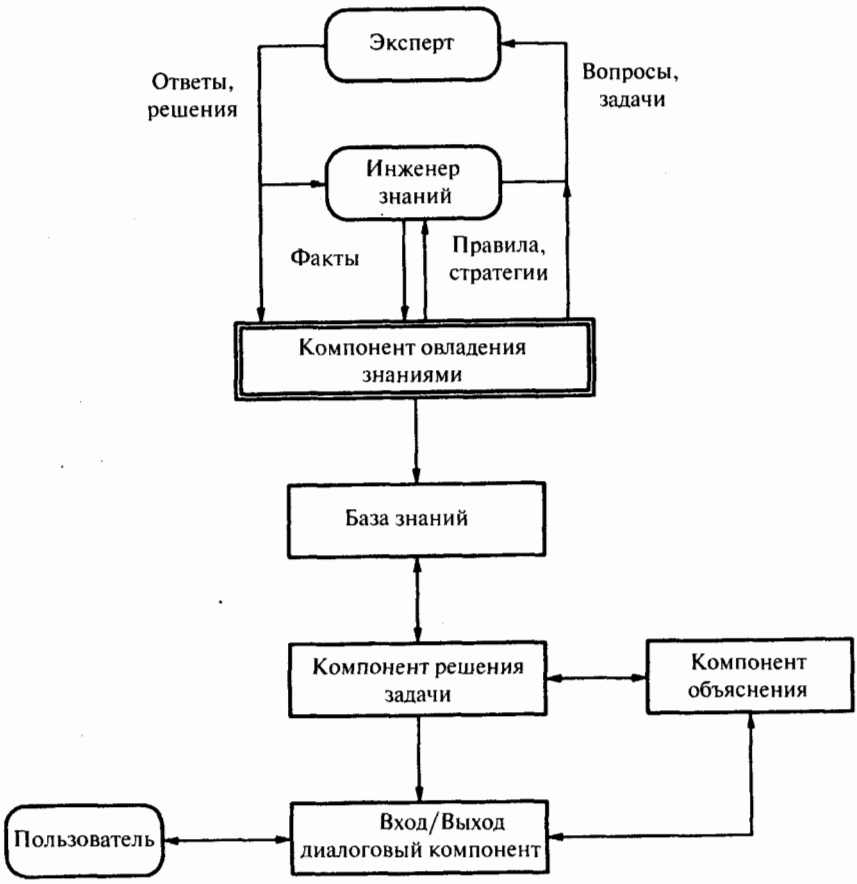


Рис. 5.9. Овладение знаниями в экспертной системе

зователем. Процессор, работающий на естественном языке, может, конечно, увеличить приемлемость системы даже для нетренированного пользователя.

С технологической точки зрения, пределы экспертных систем очевидны. Во-первых, существует проблема представления знаний. Каким образом знание в некоторой области деятельности должно быть представлено в виде структур данных в памяти компьютера и открыто для решения задачи? Во-вторых, есть вопрос об использовании знаний. Каким образом должна быть устроена машина логического вывода[13]? В-третьих, существует вопрос об овладении знаниями. Каким образом можно автоматически приобрести столь важные для решения задачи знания, чтобы компьютер облегчил передачу экспертной оценки от людей к структурам символьных данных?

[13] В ИИ – часть экспертной системы, которая соотносит информацию от пользователя с известными фактами и правилами вывода, хранящимися в базе знаний, и вырабатывает результат, на котором затем основывается решение, предлагаемое экспертной системой. – *Прим. пер.*

Последняя и самая важная проблема экспертных систем – скорее философская. Как следует объединить специализированную базу знаний экспертной системы с обобщенным и структурированным фоновым знанием о мире, влияющем на решения и действия эксперта-человека?

Так, принимая решение об операции, хирург учтет также необъективные впечатления, полученные им при рассмотрении условий жизни пациента (семья, работа и пр.) и его отношение к жизни. Особенно в том, что касается фундаментальных вопросов жизни и смерти, например, в связи с развернувшейся сейчас дискуссией о праве на достойную смерть, общее отношение и кругозор хирурга трансформируется в его решения так, что этот процесс нельзя закодировать, хотя законодательство и пытается установить общие стандарты поведения. Например, в юридических экспертных системах можно увидеть ту же проблему. Несмотря на все согласованные системы норм, судья в конце концов найдет формальные рамки возможных решений, если будет ориентироваться на свой персональный взгляд на жизнь и окружающий мир. Такое вторжение в субъективность следует рассматривать не как недостаток объективности, а как шанс на более гуманные медицину и судопроизводство. Вместе с тем, однако, не исключено, что в будущем компьютерные науки будут стремиться к расширению основанных на знаниях экспертных систем, которые в наши дни все еще слишком специализированы. Пока что очевидны существенные ограничения, вытекающие из природы экспертных систем.

Экспертные системы являются технологическими реализациями процедур принятия решений. Поэтому фактически существующие экспертные системы можно классифицировать по тем конкретным задачам, которые они должны решать. На рис. 5.10 представлены наиболее важные классы задач экспертных систем.

Хорошо проанализированный класс задач включает «диагноз», например в медицине. Вход такой экспертной системы состоит из измеренных данных, симптомов и т. п., и система передает распознанные в закономерностях данных структуры на выход. Другой класс задач относится к «дизайну». Проблема состоит в том,

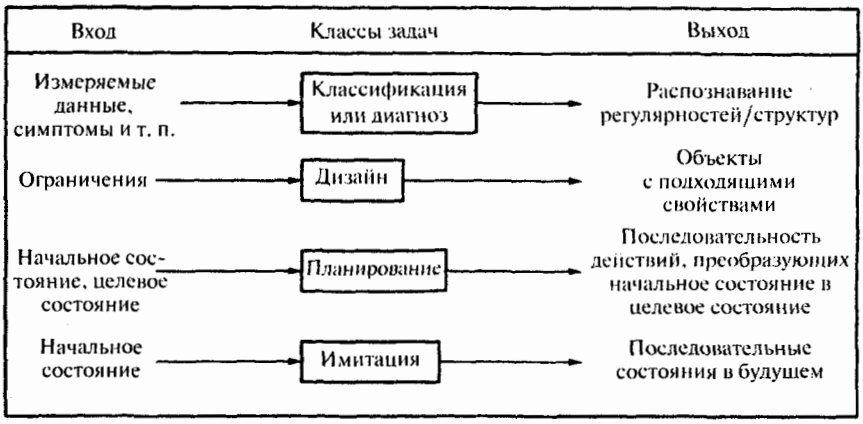


Рис. 5.10. Классы задач экспертных систем

как найти продукт, удовлетворяющий определенным ограничениям. Решение задачи планирования требует последовательности действий, преобразующих начальное состояние в целевое состояние. Задача имитации начинается с начального состояния модели, последующие состояния которой необходимо вычислять и оценивать [5.27].

Стратегии решения задач выводятся из порождающих правил, которые должны выбираться так называемым *интерпретатором правил*. Если применимы несколько правил, то стратегия разрешения конфликтов решает, какое правило подходит. Возможные правила можно упорядочить, например, по степеням приоритета или общности. Тогда может оказаться удобным выбирать правило с наивысшим приоритетом или специализацией.

Комбинация правил в выводе может быть реализована так называемыми *прямой цепочкой вывода*[14] или *цепочкой обратного вывода*[15]. Прямая цепочка вывода начинается с заданных данных и фактов A и применяет механизм дедукции, пока не достигается заданная цель D (рис. 5.11).

В противоположность ведомой начальными данными прямой цепочки вывода, метод обратного вывода направляется конечной целью, иными словами, он начинается с заданной цели и пытается найти исходный набор правил, которые делают цель выводимой. Поэтому должна быть найдена предпосылка A, которая «верна» или реализуема (рис. 5.11).

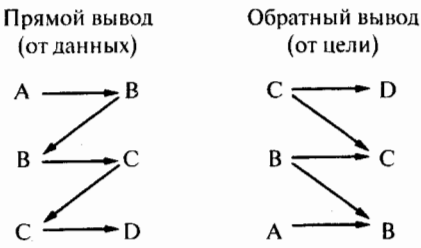


Рис. 5.11. Стратегии решения задач

С методологической точки зрения, процедуры цепочек прямого или обратного выводов для экспертных систем суть не что иное, как хорошо известные со времен античного логика и философа Паппа методы нахождения необходимых и достаточных условий для подтверждений. Неудивительно, что почти все стратегии вывода в экспертных системах основаны на классических философских методологиях.

В наши дни большинство используемых в ИИ философских теорий не извлекаются непосредственно из соответствующей литературы, но это не делает их менее интересными с философской точки зрения. Тем не менее ряд авторов известных экспертных систем испытали непосредственное влияние философов [5.28].

Для того чтобы увидеть, что ИИ является философской логикой и методологией, нужно всего лишь детальнее рассмотреть некоторые экспертные системы. Их класс задач определяет подходящую стратегию для решения задач. В общем случае стратегия стремится к уменьшению сложности задачи. Задача, на решение которой нацелена программа DENDRAL, – это определение молекулярной структуры по данным, состоящим из молекулярной формулы соединения и спектра масс соединения [5.29]. Вывод представляет собой упорядоченный список более или менее возможных

[14] Один из методов поиска решения в экспертных системах. Ход рассуждений ведется от фактов к тому, что нужно доказать. – *Прим. пер.*

[15] Один из методов поиска решения в экспертных системах. Путь рассуждений идет от того, что нужно доказать, к фактам, на которых основывается доказательство. – *Прим. пер.*

структурных формул. Стратегия решения задачи у этой программы называется «создай и проверь» и представляет собой алгоритм генерации топологических структур органических молекул, согласующихся с данной молекулярной формулой и правилами, согласно которым с наибольшей вероятностью разрываются молекулярные связи в молекуле. Коротко можно сказать, что программа уменьшает сложность построенного дерева решений, как можно раньше обрезая засохшие ветки. Методологически программа включает критерий подтверждения.

В общем случае, независимо от химических приложений, важны следующие моменты:

а) существует множество формальных объектов, в котором содержится решение;

б) существует генератор, т. е. полная процедура перебора этого множества;

в) существует тест, т. е. предикат, идентифицирующий генерированный элемент как часть или не часть множества решений.

Этот общий метод определен следующим алгоритмом, т. е. следующей рекурсивной функцией согласно тезису Черча:

> Функция GENERATE_AND_TEST(SET):
>
> Если проверяемое множество SET пусто, тогда неудача,
>
> в противном случае пусть ELEM есть «следующий» элемент SET;
>
> если ELEM — целевой элемент,
>
> тогда взять его как решение,
>
> в противном случае повторить эту функцию с множеством SET без элемента ELEM.

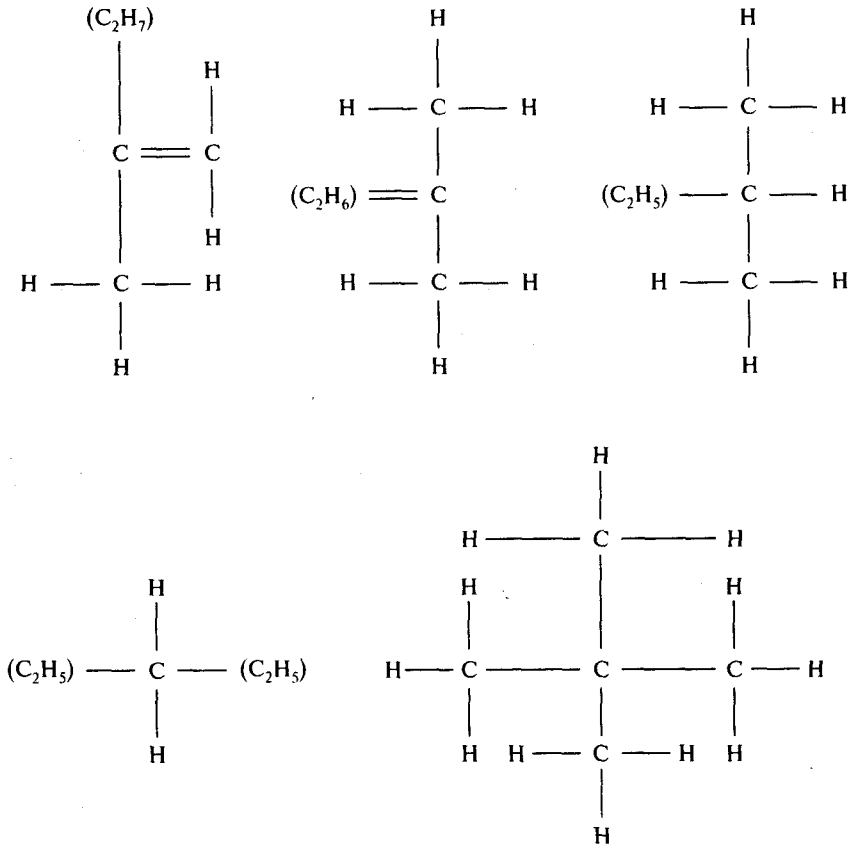
Для трансляции в ИИ языка программирования LISP [5.30] нужно ввести некоторые вспомогательные рекурсивные функции, например, GENERATE (генерирует элемент данного множества), GOALP (предикатная функция, доставляющая T (True), если аргумент есть часть множества решения, в противном случае NIL), SOLUTION (готовит элемент решения для «выхода») и REMOVE (доставляет множество без данного элемента). С учетом общепринятых в LISP сокращений, например, DE (Definition), COND (Condition), EQ (Equation), T (True), и соглашений LISP (например, правила расстановки скобок) при обработке листа символов, получается следующий алгоритм на языке LISP:

```
(DE GENERATE_AND_TEST(SET)
 (COND((EQ SET NIL)'FAIL)
  (T(LET(ELEM(GENERATE SET))
   (COND((GOALP ELEM)(SOLUTION ELEM))
    (T(GENERATE_AND_TEST
     REMOVE ELEM SET)))))))
```

Все химические структуры систематически воспроизводятся по заданной химической формуле сумм. На рис. 5.12 представлен пример для C_5H_{12} на первом шаге.

Ряд химических структур исключается, поскольку они неустойчивы или противоречивы. На следующем шаге вычисляются соответствующие массовые спектрограммы, и затем они сравниваются с эмпирически полученными массовыми спектрограммами. Это сравнение является тестовым шагом процесса. Таким образом, GENERATE_AND_TEST технически реализует методологию генерации допущений с последующим отбрасыванием невозможных и проверкой возможных вариантов.

Программа META-DENDRAL создана для исправления правил программы DENDRAL, касающихся того, какие молекулярные связи будут разрываться в масс-спектрометре. Таким



и т. д.

Рис. 5.12

образом, META-DENDRAL использует программу DENDRAL вместе с прогностическим критерием подтверждения, критически проанализированным Хемпелем.

Программа MYCIN, помогающая врачам диагностировать инфекции, представляет собой дедуктивную систему с цепочкой обратного вывода [5.31]. Базу знаний MYCIN составляют порядка 300 описаний бактериальных инфекций крови. Вот типичный пример:

> *Если* тип инфекции – первичная бактериемия, предполагаемое место попадания инфекции – желудочно-кишечный тракт, а местоположение культуры – одно из стерильных мест, *тогда* есть свидетельство того, что организм заражен бактериями.

Чтобы использовать это знание, MYCIN работает в обратную сторону. Для каждой из 100 возможных гипотез диагноза MYCIN пытается двигаться к простым фактам, известным из лабораторных опытов и клинических наблюдений. Так как MYCIN работает в той области, где дедукции редко оказываются надежными, создатели программы скомбинировали тео-

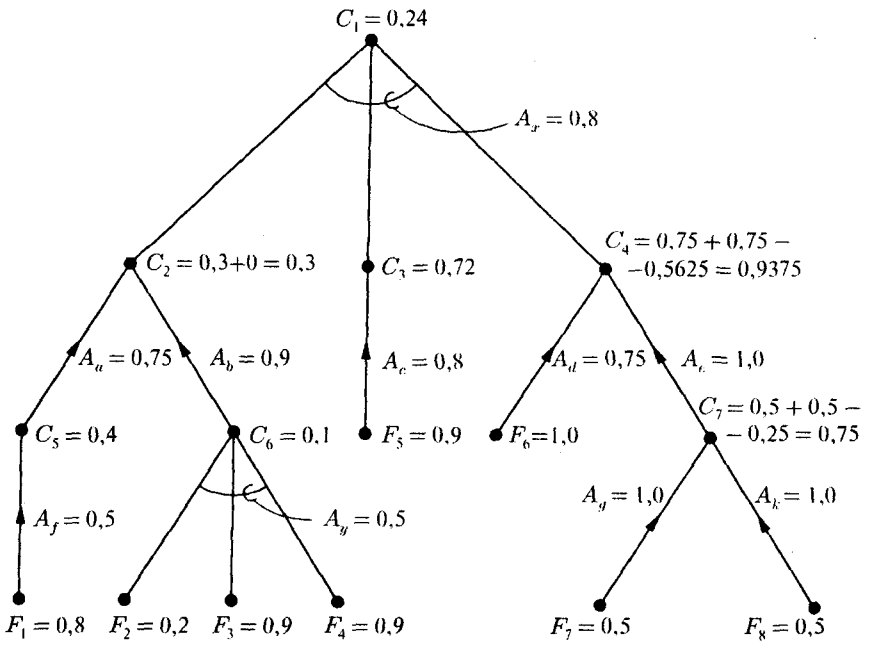


Рис. 5.13. И/ИЛИ дерево в программе MYCIN [5.31]

рию правдоподобного и вероятностного умозаключения с основным порождающим механизмом. Теория используется для определения так называемого коэффициента достоверности[16] для каждого заключения на И/ИЛИ дереве (рис. 5.13).

Здесь F_i — коэффициент достоверности, приписываемый пользователем данному факту, C_i — коэффициент достоверности заключения, A_i — степень достоверности, ожидаемая для порождающего правила[17]. Коэффициенты достоверности непосредственно вычисляются по формулам в узлах И и ИЛИ. Если коэффициент достоверности меньше или равен 0,2, то считается, что истинность соответствующего факта неизвестна, и коэффициенту приписывается значение 0.

Программа вычисляет степени индуктивного обоснования в зависимости от более или менее надежных фактов. Этот подход напоминает теорию индукции Рудольфа Карнапа. Естественно, Карнап не верил в универсальный индуктивный вывод по Бэкону. Умозаключения всегда дедуктивны. Для этого не требовались советы Поппера. Экспертные системы иначе не работают. Тем не менее вероятностные меры, используемые в системах типа MYCIN, делают систему более прозрачной для пользователя.

С другой стороны, имеются, так сказать, поппировские программы со стратегиями «Предположи и проверь», генерирующие самые интересные гипотезы с жесткими тестами. Имеются программы, помогающие постро-

[16] Фактор, приписываемый умозаключению, полученному интеллектуальной системой в процессе «нестрогих» рассуждений. — *Прим. пер.*

[17] Формализм, используемый в ЭС. — *Прим. пер.*

ить линейные причинные объяснения статистических данных. Другие программы используют старое философское утверждение, что индуктивное мышление немонотонно, означающее, что заключение, индуктивно выведенное из множества исходных предпосылок, может не вытекать из непротиворечивых расширений этих предпосылок. Например, птицы могут летать, и Твити — птица, откуда я делаю вывод, что Твити может летать, но это неверно, если я к тому же знаю, что Твити — страус [5.32].

Другой стратегией является разделение сложной задачи на более простые части или менее сложные подпроблемы, что, в частности, использовал Дьердь Пойа в эвристическом математическом путеводителе «Как решить задачу?». Таким образом, область приложений должна допускать разделение на независимые части. Но очевидно, что сложная сеть зависимостей не может быть всегда урезана без изменения исходного состояния системы. Например, рассмотрим экологическую сеть окружающей человека среды или сложные психические зависимости, которые должен анализировать психиатр. Система не всегда является суммой своих частей.

Некоторые отличительные особенности философии науки могут быть интерпретированы как свойства систем, основанных на знаниях. Если исследование широко использует теоретические представления, связанные с внутренними свойствами теории, то процесс открытия описывается как зависящий от теории («управляемый теорией»). Обратный подход, часто называемый бэконовским, использует в качестве исходного пункта массив данных. В этом случае говорят, что процесс открытия управляется данными. Различие между обработкой знаний, управляемой теорией или управляемой данными, хорошо известно в исследованиях по ИИ.

Теперь я хочу обрисовать некоторые программы из основанных на знаниях систем, которые реализуют для разных наук только что отмеченные задачи и преимущества. Первый пример касается математики. *Ассоциативная память* (АП) [5.33] есть основанная на знаниях система, которая рекурсивно генерирует и, так сказать, переоткрывает понятия из теории чисел. В противоположность программе эмпирической науки, критерий успеха в АП заключается не в том, что понятие совместимо с эмпирическими данными, а в том, что оно «интересно» в смысле способности порождать примеры, новые задачи и т. д. Написанная в 1977 г. программа на языке LISP начинается с основных понятий, таких как множества, списки, равенство и операции, и эвристического совета по направлению процесса открытия. Эвристика[18)] предлагает новые задачи и создает новые понятия, основанные на уже существующих. Новые задачи упорядочиваются по их степеням интереса. Задачи, предложенные рядом различных эвристических правил, считаются более интересными, чем те, которые предложены одним правилом.

Используя этот критерий для направления поиска через пространство математических понятий, АП определяет понятия для целых чисел, умножения и простых чисел и находит теоремы, касающиеся простых чисел

[18)] Способ принятия решений, предполагающий использование метода проб и ошибок и иных неформализованных методов (в отличие от решения формализованными методами, опирающимися на четкие математические модели). — *Прим. пер.*

(например, теорему о единственности разложения на множители).

Однако более подробный анализ показывает, что требование имитации исторического процесса открытия не может быть соблюдено. Успех АП в решающей степени зависит от свойств языка программирования LISP. Тем не менее анализ показывает интересные аналогии с процессом исследования, осуществляемым человеком.

Как указывает само название LISP, эта программа систематически обрабатывает списки или символы. Два списка могут быть рекурсивно определены как равные, если оба являются элементарными, причем элементы равны друг другу; в противном случае должны быть равны заголовки списков и все остальное их содержание. В LISP рекурсивная булева функция записывается в виде:

```
(DE LIST-EQUAL(XY)
 (COND((OR(ATOM X)(ATOM Y))
  (EQ X Y))
   (T(AND
    (LIST-EQUAL(CAR X)(CAR Y))
     (LIST-EQUAL(CDR X)(CDR Y))))))
```

Здесь CAR и CDR — базовые операторы LISP, сортирующие заголовки списков и остальные списки, соответственно, по заданным спискам и символам. Эвристическое обобщающее правило АП обобщает понятие тождественности. Два списка называются «обобщенно равными», если оба элементарны и атомы равны друг другу, в противном случае остальные листы «обобщенно равны». На языке LISP

```
(DE L-E-1(XY)
   (COND((OR(ATOM X)(ATOM Y))
      (EQ X Y)
         (T(L-E-1(CDR X)(CDR Y))))))
```

В результате такого обобщения все списки одинаковой длины рассматриваются как эквивалентные. Они определяют класс, называемый «числом». Процесс открытия, реализованный детьми на конкретных объектах, имитируется АП через правила преобразования. Так, сложение вводится как объединение двух списков. Понятие простого числа открывается эвристическим правилом преобразования для образования обратных понятий к уже установленным. За АП последовала EURISKO (1983), способная открывать не только новые понятия, но и новые эвристические правила.

Открытие количественных эмпирических законов было проанализировано последовательностью программ под названием BACON [5.34]. Системы BACON были названы по имени Френсиса Бэкона, так как они включали некоторые идеи Бэкона о природе научного мышления. Это управляемые данными обрабатывающие знания системы, которые собирают данные, обнаруживают закономерности, связывающие две и более переменных, и проверяют законы. Основные методы программы BACON не ссылаются на семантический смысл данных, с которыми они оперируют, и не делают никаких специальных предположений об их структуре. В случаях, когда имеется экспериментальный контроль над независимыми слагаемыми, для отделения влияния каждого независимого слагаемого на зависимые переменные можно использовать традиционный метод «изменения одного слагаемого в данный момент времени». Программа BACON может воспроизводить физические законы, в том числе закон Бойля, третий закон Кеплера, закон Галилея и закон Ома.

Исследование, проведенное с помощью такой основанной на знани-

ях системы, подчиняется, по крайней мере, требованию, чтобы законы, относящиеся к разным дисциплинам, удовлетворяли одним и тем же методологическим и эвристическим рамочным условиям. Соответствующая основанная на знаниях система не только воспроизводит определенные законы, открытые в разных исторических контекстах, но и систематически устанавливает полные методологические рамки понятий, а также отбирает интересные приложения. Последняя из созданных программ BACON является не только управляемой данными, и в этом смысле строго «бэконовской», но и управляемой теорией. В рамках теоретических требований симметрии и законов сохранения программа генерирует, например, закон сохранения импульса.

Другой ряд программ способен выводить качественные законы из эмпирических данных (GLAUBER, STAHL, DALTON). Эти программы могут также выводить структурные и объясняющие модели определенных явлений. Такие качественные законы обычны в химии [5.35].

Соревнование между машиной и ученым не предполагается. Однако была завершена систематическая и структурированная классификация научных законов и теорий, которая позволила лучше проникнуть в сложность научных законов и условий их открытия.

Существует несколько аспектов разнообразной деятельности, известной как научное открытие, например, поиск количественных законов, генерация качественных законов, вывод о компонентах веществ и формулировка структурных моделей. Рассматривается интегрированная система производства открытий, включающая отдельные системы в качестве компонентов. Каждый компонент предполагает ввод информации от одного или нескольких других компонентов.

Например, программа STAHL сосредоточена на определении компонентов химическим веществ, а программа DALTON рассматривает число частиц, участвующих в реакции. Поэтому программу STAHL можно рассматривать как лежащую в основе детальной структурной модели в смысле программы DALTON. Таким образом, возможно развить все более и более сложные основанные на знаниях системы для анализа исследования как процесса обработки знаний и решения задач.

Даже в рамках такой расширенной схемы исследований мы не касаемся механизмов, лежащих в основе планирования экспериментов, или разработки новых измерительных инструментов. Любое существенное понятие вместе с экспериментальным оборудованием, позволяющим его измерить, может использоваться как научный инструмент. В этом случае открытие инструмента совпадает с открытием самого понятия.

Существуют также основанные на знаниях системы, рассматривающие разработку экспериментов и их взаимодействие с другими видами деятельности в научном исследовании. На рис. 5.14 показана созданная исследовательской группой Саймона система, называемая KEKADA, с генераторами гипотез, выборщиками экспериментов, приборами, задающими ожидаемые результаты, и т. п. [5.36]. Программа была создана для моделирования плана эксперимента в биохимии (открытие Кребсом цикла мочевины в 1935 г.). Как инженеры по знаниям, Саймон и члены его команды проанализировали лабораторные записи Кребса, определили его мето-

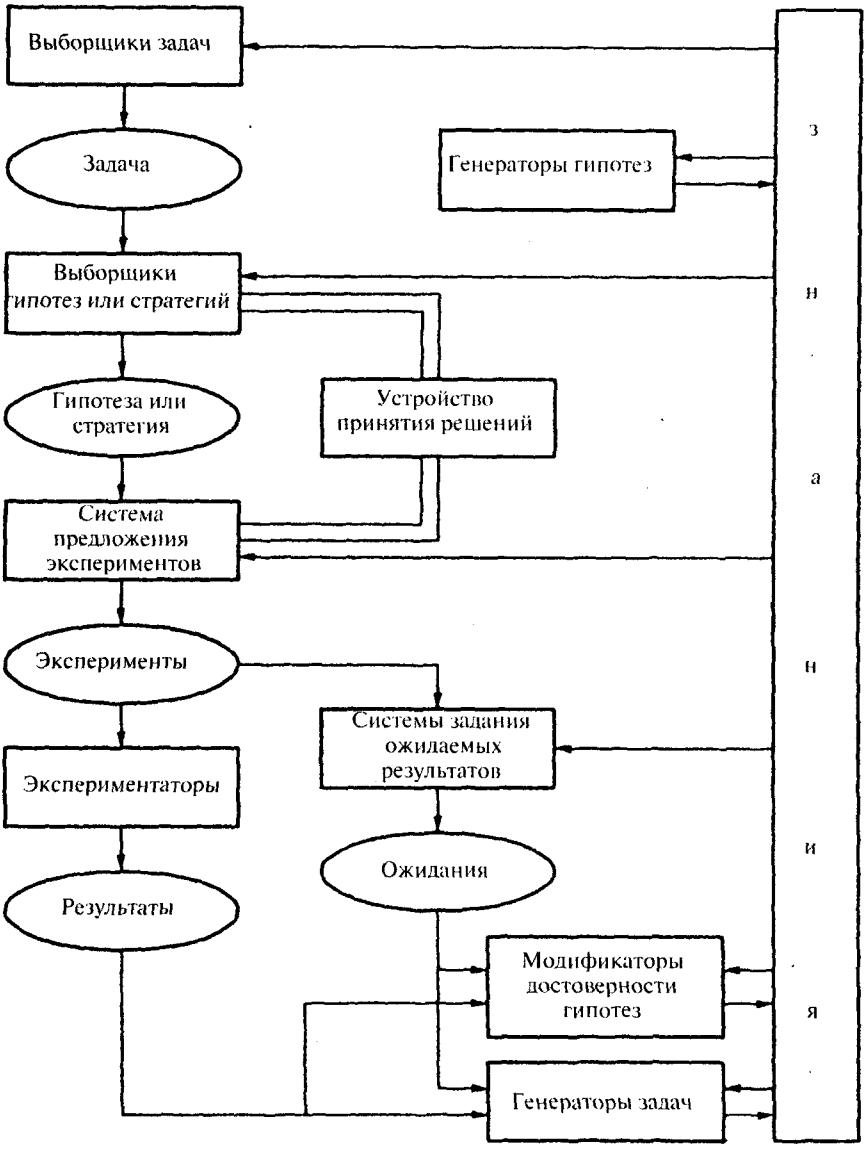


Рис. 5.14. Архитектура программы KEKADA [5.36]

дологические правила исследования и перевели их на программный язык типа LISP.

Если система сама не решила, над какой задачей работать, выборщики задач решат, над какой проблемой должна начать работать система. Сталкиваясь с новой задачей, генераторы гипотез создают гипотезы. Элементы, предлагающие гипотезы или стратегию, выбирают стратегию работы. Затем элементы, определяющие эксперимент, предлагают те эксперименты, которые следует провести. Тем,

кто принимает решения, могут понадобиться оба типа эвристик. Затем срабатывают приборы, задающие ожидаемые результаты, а экспериментаторы проводят эксперименты. Результаты экспериментов интерпретируются модификаторами гипотез и модификаторами достоверности. Если это возможно, генераторы задач могут добавить в программу работы новые задачи. Если результат эксперимента не согласуется с ожидаемым, то изучение этого загадочного явления составляет проблему, которая добавляется в список вопросов, требующих решения.

Каждый компонент системы представляет собой оператор, определяемый списком порождающих правил. Помимо эвристики, специфической для данной области знаний, система содержит общие правила, являющиеся частью общей методологии исследования. Примечательно, что конкретное правило определяет тот случай, когда экспериментальный результат является «загадочным явлением». Таким образом, научное открытие становится последовательным процессом, направляемым эвристикой решения задач, а не единственной «вспышкой озарения» или внезапным скачком. Такие примеры основанных на знаниях систем можно интерпретировать как ассистентов в исследованиях философов науки в том смысле, что, например, программа DENDRAL есть ассистент в лаборатории химика. Эти программы могут исследовать всю совокупность возможных законов, порождаемых некоторыми эвристическими правилами. Но они являются не мастерами, а всего лишь аккуратными помощниками. Их «озарение» или тип «удивления», которые может распознать система, зависят от схемы, задаваемой мастерами.

Что же можно сказать о вопросе Тьюринга, который вдохновил первых исследователей ИИ? Могут ли машины «мыслить»? «Разумны» ли машины? По моему мнению, для компьютерной технологии этот вопрос является метафизическим, так как «мышление» и «разум» не являются хорошо определенными понятиями компьютерной науки или ИИ.

Все, что мы можем сказать сегодня, это следующее. Если программа генерирует структуру, которую можно интерпретировать как новое понятие, тогда используемые правила преобразования неявно содержат это понятие и соответствующую структуру данных. Алгоритм, который управляет применением этих правил, превращает неявно заданные понятия и структуры данных в явные. В философских дискуссиях по ИИ много путаницы вносит терминология ИИ, которая введена в техническом смысле, но ассоциируется с иногда устаревшими и изощренными понятиями в философии и психологии. Как и в других науках, мы должны смириться с традиционными терминами и понятиями, которые могут сбивать с толку, если они абстрагируются от своего технического контекста. Примером может служить понятие «интеллект» в «искусственном интеллекте» (ИИ).

Иногда философов смущает использование термина «знание» в ИИ. Хочу еще раз подчеркнуть, что слово «знание» в термине «основанная на знании система» имеет техническое значение, и не претендует на объяснение всех философских, психологических или социологических сторон понятия знания. В технологию ИИ как часть практической компьютерной науки не включен философский редукционизм.

«Оперирование знаниями» в так называемых «основанных на знаниях системах» означает новый тип сложной обработки информации, которую следует отличать от более старой, в основном численной, работы с данными. Такой тип обработки включает сложные правила перевода и интерпретации, характеризующиеся высоким уровнем в иерархии языков программирования (в наши дни LISP или ПРОЛОГ). Этот уровень близок к естественным языкам, но, конечно, не тождествен им, ухватывая лишь частные аспекты широкого понятия человеческого знания (рис. 5.15). Тем не менее оперирование знаниями остается программно контролируемым и соответствует лейбницевской традиции механизации мыслей [5.37].

Если понимать разум человека как компьютер тьюринговского типа, тогда управляющие человеческими телами и мозгами законы природы будут иметь к нему мало отношения. Алгоритмические программы в компьютерном программном обеспечении зависят не от «железа» физической механики, а от математически идеализированного понятия машины Тьюринга. Но если человеческий разум понимается как продукт естественной эволюции, тогда необходимо выяснить, какое отношение к его возникновению имеют физические, химические и биологические законы. Основной теорией вещества в современной физике является квантовая механика. Если в классической физике взаимодействия физических систем рассматривались как полностью независимые от человека-наблюдателя, то теперь считается, что человеческое сознание играет в процессе измерения ключевую роль[19]. Сначала я подвергну эти интерпретации критике как возможные, но сомнительные подходы. Тем не менее показано, что квантовая механика может служить физической основой обобщенных квантовых компьютеров большой производительности и квантовой теории сложности, отличающихся от классических машин Тьюринга и классической теории сложности.



Рис. 5.15. Уровни «железа» и программного обеспечения

Очевидно, что машину Тьюринга можно интерпретировать в рамках классической физики (рис. 5.16). Такая вычислительная машина является физической системой, динамическая эволюция которой переводит ее из одного состояния, принадлежащего множеству входящих состояний, в другое состояние из множества выходящих состояний. Состояния помечены каким-то последовательным образом. Машина устанавливается в состоянии с заданным входным уров-

[19] В классической интерпретации квантовой механики ни сознание, ни человек-наблюдатель не фигурируют. Речь идет о принципиальной наблюдаемости микроявлений с помощью макроскопических приборов. — *Прим. ред.*

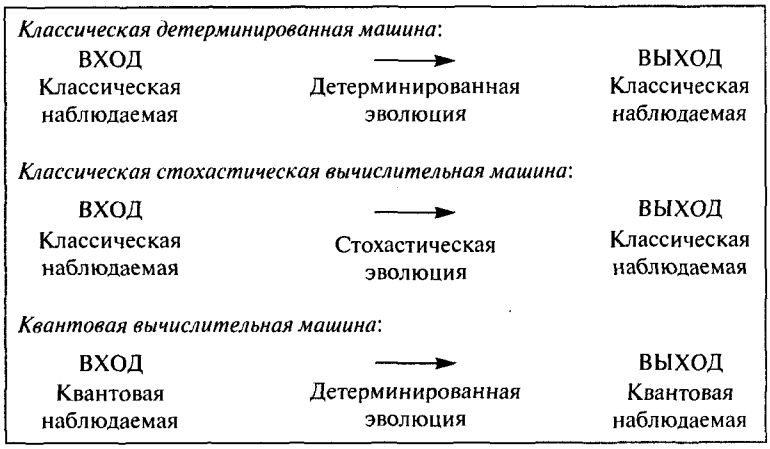


Рис. 5.16. Классическая и неклассическая вычислительные машины

нем, затем, следуя некоторому детерминированному правилу, производится измерение выходного состояния. Для классической детерминированной системы измеренная выходная метка является определенной функцией f установленной входной метки. В принципе, значение этой метки может быть измерено внешним наблюдателем, и тогда говорят, что машина вычислила функцию f. Но классические стохастические вычислительные машины и квантовые вычислительные машины не вычисляют функции в указанном выше смысле. Выходное состояние стохастической машины является случайным, и можно задать лишь функцию распределения вероятностей возможных выходных состояний в зависимости от входного состояния. Выходное состояние квантовой машины, хотя и полностью определяется входным состоянием, не является наблюдаемой, так что наблюдатель не может в общем случае определить его метку. В чем причина этого? Мы должны напомнить некоторые основные понятия квантовой механики, которые уже были введены в разд. 2.3.

В квантовой механике векторы, соответствующие, например, импульсу или координате, должны быть заменены на некоммутирующие операторы, удовлетворяющие соотношению коммутации, зависящему от постоянной Планка (рис. 2.18). Классические системы, описываемые функцией Гамильтона, заменяются на квантовые системы, например, электроны или фотоны, описываемые оператором Гамильтона. Состояния квантовой системы описываются векторами гильбертова пространства, натянутого на собственные векторы его оператора Гамильтона. Причинная динамика квантовых состояний определяется дифференциальным уравнением в частных производных, называемым уравнением Шрёдингера. В то время как классические наблюдаемые коммутируют и всегда имеют определенные значения, неклассические наблюдаемые квантовых систем не коммутируют и, в общем случае, не имеют общих собственных векторов, а следовательно, и определенных собственных значений. Для наблюдаемых в квантовом состоянии могут быть рас-

считаны только статистические ожидаемые значения.

Главное отличие от классической механики задается принципом суперпозиции, демонстрирующим линейность квантовой механики. В перепутанном чистом квантовом состоянии суперпозиции наблюдаемая может иметь только неопределенные собственные значения. Линейность квантовой механики допускает коррелированные («перепутанные») состояния комбинированных систем, что полностью подтверждается ЭПР-экспериментами[20] (Алан Аспект, 1981). С философской точки зрения, (квантовое) целое больше, чем сумма его частей.

Из принципа суперпозиции вытекают жесткие следствия для измерения квантовых систем. В квантовом формализме квантовая система и измерительный прибор представляются двумя гильбертовыми пространствами[21], объединенными в тензорное произведение $H = H_1 \otimes H_2$[22]. В начальном состоянии $\phi(0)$ измерения в момент времени 0 системы H_1 и H_2 приготовлены в двух отдельных состояниях ψ и φ, соответственно, причем $\phi(0) = \psi \otimes \varphi$. Динамика обеих систем определяется уравнением Шрёдингера, т. е. $\phi(t) = U(t)\phi(0)$, где $U(t)$ – унитарный оператор[23]. В силу линейности $U(t)$ состояние $\phi(t)$ является перепутанным с неопределенными собственными значениями, в то время как измерительный прибор в момент времени t показывает определенные измеренные значения. Таким образом, линейная квантовая динамика не может объяснить процесс измерения.

В более популярном изложении процесс измерения иллюстрируется мысленным экспериментом Шрёдингера с котом, находящимся в линейной суперпозиции состояний «мертвый» и «живой» (рис. 5.17 *а*). Представьте кота, запертого в закрытом ящике, внутри которого имеется радиоактивный источник. Пусть источник подобран так, что в течение одного часа с вероятностью 1/2 происходит один распад. Если распад происходит, замыкается электрическая цепь, приводящая в действие механизм с молоточком, разбивающим бутылку с синильной кислотой, которая убивает кота. Ящик остается закрытым в течение одного часа [5.38].

Согласно квантовой механике, два возможных состояния кота, живой и мертвый, остаются неопределенными, до тех пор пока наблюдатель не решит этого вопроса, открыв ящик. Для состояния кота в закрытом ящике квантовая механика в интерпретации Эрвина Шрёдингера предсказывает коррелированное («перепутанное») состояние суперпозиции, т. е. кот одновременно в равной степени мертв и жив. Согласно процессу измерения, состояния «мертвый» и «живой» интерпретируются как инди-

[20] ЭПР-эксперименты – опыты, связанные с парадоксом Эйнштейна, Подольского, Розена. Суть парадокса состоит в том, что определенные свойства микрообъектов «появляются» в зависимости от того, что и как мы измеряем. – *Прим. ред.*

[21] Гильбертово пространство – обобщение понятия конечномерного пространства, обладающего скалярным произведением (связанным с углом между векторами), на случай векторов бесконечной размерности. – *Прим. ред.*

[22] Тензорное произведение – способ порождения пространства H на основе H_1 и H_2 с помощью определенного задания аналога скалярного произведения в этом пространстве. – *Прим. ред.*

[23] Унитарный оператор U из гильбертова пространства H_1 в гильбертово пространство H_2 сохраняет норму $(Ux, Uy)_{H_2} = (x, y)_{H_1}$. Пространство H_1 – пространство состояний системы в начальный момент ($t = 0$), H_2 – в момент t. – *Прим. ред.*

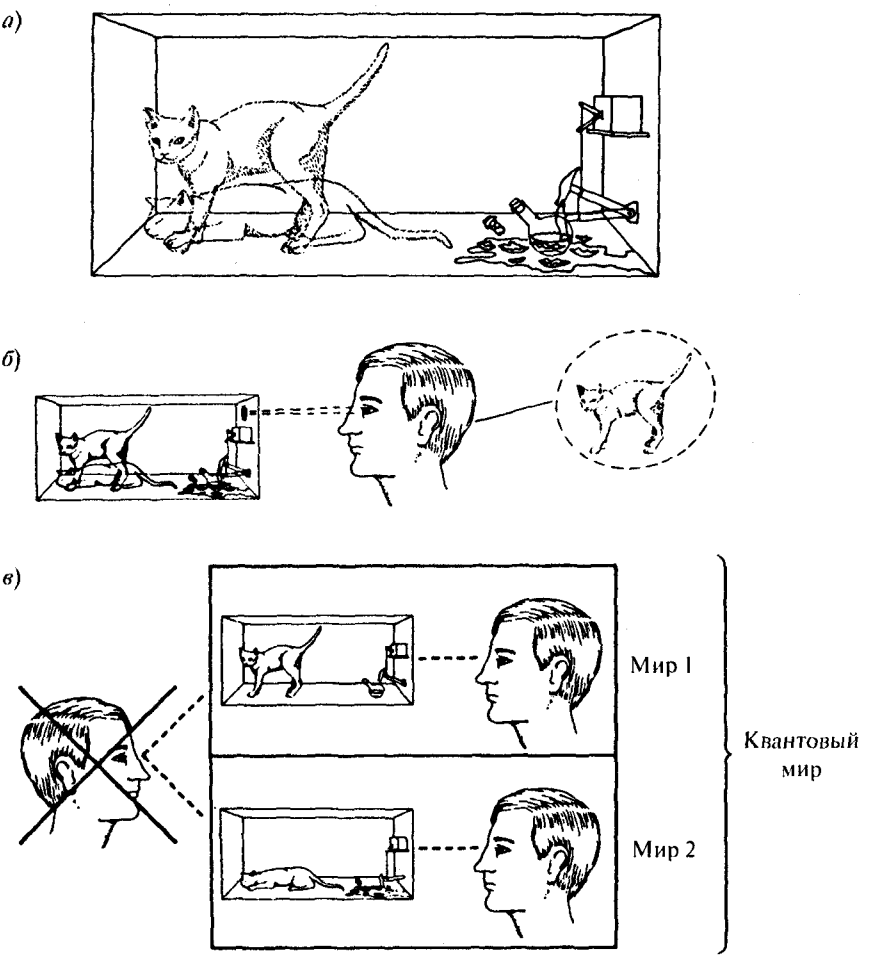


Рис. 5.17. Шрёдингеровский кот (*а*); вигнеровская интерпретация парадокса шрёдингеровского кота (*б*); эвереттовская интерпретация парадокса шрёдингеровского кота (*в*)

каторы измерения, представляющие состояния «распавшегося» или «не распавшегося» радиоактивного вещества.

В рамках копенгагенской интерпретации Бора, Гейзенберга и других процесс измерения объясняется так называемой «редукцией волнового пакета», т. е. расщеплением состояния суперпозиции на два отдельных состояния измерительного прибора и измеряемой квантовой системы с определенными собственными значениями. Очевидно, мы должны отличать линейную динамику квантовой системы от нелинейного акта измерения. Причина нелинейности в мире иногда объясняется возникновением человеческого сознания.

Евгений Вигнер (1961) предположил, что для обладающих сознанием наблюдателей линейность уравнения Шрёдингера должна разрушиться и замениться на некоторую нелинейную процедуру, согласно которой

должна быть разрешена либо та, либо другая альтернатива (рис. 5.17 *б*). Однако интерпретация Вигнера вынуждает нас верить, что сложные квантовые линейные суперпозиции могут быть разложены на отдельные части только в тех уголках Вселенной, где возникает сознание, подобное человеческому. ЭПР-корреляции не измеряются в макроскопическом мире бильярдных шаров, планет или галактик, а возникают только в микроскопическом мире элементарных частиц, таких как фотоны. Кажется довольно странным, что отдельные состояния систем в макроскопическом мире, которые можно описать в классической физике с помощью определенных измеренных величин, вызваны человекоподобным сознанием.

«Многомировая» интерпретация квантовой механики Эверетта, похоже, обходит проблемы нелинейной редукции путем расщепления человеческого сознания на ветвящиеся пути, населенные различными, взаимно несовместимыми мирами (рис. 5.17 *в*).

> В процессе измерения динамика измерительного прибора и квантовой системы описывается уравнением
>
> $$\phi(t) = \sum_i c_i(t)\psi_i \otimes \varphi_i,$$
>
> где состояния (φ_i) относятся к показаниям измерительного прибора. Эверетт утверждает, что вектор $\varphi(t)$ никогда не расщепляется на отдельные состояния, а реализуются все ветви $\psi_i \otimes \varphi_i$. Состояние $\varphi(t)$ описывает многообразие одновременно существующих реальных миров, причем $\psi_i \otimes \varphi_i$ соответствует состоянию i-го параллельного мира. Таким образом, измеренная частичная система *никогда не находится в чистом состоянии*. В духе Эверетта, ψ_i можно интерпретировать как относительное состояние, зависящее от состояния наблюдателя или измерительного прибора, причем $\psi_i = c_n^{-1}(\varphi_n, \phi)_{H_2}$. Если принимается, что φ_n являются состояниями памяти, то наблюдатель с определенной памятью может быть лишь уверен в своей ветви мира $\psi_i \otimes \varphi_i$. Но он никогда не сможет наблюдать другие частные миры.

Преимущество интерпретации Эверетта состоит в том, что нелинейная редукция суперпозиции не требует объяснения. Недостатком является онтологическая вера в мириады миров, которые в принципе ненаблюдаемы. Таким образом, интерпретация Эверетта (если она математически непротиворечива), требует бритвы Оккама.

В истории науки антропные или телеологические аргументы часто свидетельствовали о пробелах или ошибках в научных объяснениях. Так, ряд ученых, например Роджер Пенроуз, предполагает, что линейная динамика квантовой механики мешает (Эйнштейн сказал, что она «неполна») объяснению космической эволюции с возникновением сознания. Пенроуз утверждает, что единая теория линейной квантовой механики и нелинейной общей теории относительности может, по крайней мере, объяснить разделенные состояния макроскопических систем в мире без ссылок на антропные или телеологические принципы. В предложенной Пенроузом единой теории линейная суперпозиция физической системы расщепляется на отдельные состояния, если система достаточно велика, чтобы ощущать действие релятивистской гравитации. Для такого явления Пенроуз произвел расчеты на уровне одного гравитона как мельчайшей единицы кривизны [5.39]. Идея заключается в том, что этот уровень удобно помещается между квантовым уровнем атомов, молекул и пр., на котором действуют линейные законы квантовой меха-

ники, и классическим уровнем повседневного опыта. Преимущество аргумента Пенроуза состоит в том, что линейность квантового мира и нелинейность макроскопического мира можно было бы объяснить единой физической теорией без ссылок на любое вмешательство человека. Но, конечно, нам все еще недостает проверяемой единой теории (см. разд. 2.4)[24].

Тем не менее возникает вопрос, обеспечивает ли квантовая механика рамки для эволюции человеческого мозга, или, по крайней мере, для новой компьютерной технологии, приходящей на смену классическим вычислительным системам. Основной идеей квантовой механики является суперпозиция квантовых состояний как результат линейной квантовой динамики и редукция суперпозиций в результате определенного типа измерений [5.40]. Таким образом, квантовый компьютер потребует квантовой версии *логического вентиля*[25], в котором выходной сигнал будет результатом действия некоторого унитарного оператора, примененного ко входному сигналу, и заключительного акта измерения. Суперпозиция квантовых систем (например, фотонов) напоминает о параллелизме вычислений. Квантовый компьютер будет полезным, если нас интересует какая-то удобная комбинация большого числа рассчитанных результатов, а не их отдельные детали. В этом случае квантовый компьютер мог бы за сравнительно короткое время выдавать суперпозицию, возможно, несметного числа параллельных вычислений, превосходя по эффективности классические вычислительные системы. Но квантовые компьютеры все равно будут работать алгоритмически, так как их линейная динамика будет детерминированной. Недетерминированность возникает благодаря нелинейному акту измерения. Таким образом, нельзя ожидать, что квантовые компьютеры смогут осуществить неалгоритмические операции, выходящие за рамки возможностей машины Тьюринга. Поэтому квантовые компьютеры (если их когда-нибудь построят) будут более интересны для теории сложности и для преодоления практических ограничений на вычисления.

Что касается человеческого мозга, мы утверждаем, что для его эволюции был необходим квантовый уровень элементарных частиц, атомов и молекул, но не согласны с тем, что, наоборот, ментальные состояния мозга необходимы для редукции коррелированных состояний в физике. На самом деле, имеется значительное число нейронов, чувствительных к отдельным квантам, с их суперпозициями и редукциями перепутанных состояний. Но, конечно, эти квантовые состояния не могут быть отождествлены с ментальными состояниями мозга. Мы не получаем сознания ни в результате суперпозиции состояний, ни в результате их разделения на *отдельные состояния*, вызванного нелинейными случайными событиями. И все же квантовые эффекты участвуют в возникновении и взаимодействии ментальных состояний мозга,

[24] Чтобы рассуждать подобным образом, Р. Пенроузу приходится ввести наряду с «субъективной редукцией» волнового пакета, связанной с актом наблюдения, гипотетическую «объективную редукцию». В соответствии с этой идеей «голосования», «выбор» в квантовом ансамбле возможен при определенных условиях и без акта наблюдения. Подробно эта идея обсуждается в книге: *Пенроуз Р.* Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики. 3-е изд. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2008. 400 с. — *Прим. ред.*

[25] Логические вентили состоят из аналоговых физических элементов, таких как транзисторы, и выполняют простые функции над входными цифровыми сигналами. — *Прим. пер.*

хотя то, как это происходит, все еще пока неясно.

5.4. Клеточные автоматы, хаос и случайность

Динамика жизни и мозга стала вызовом традиционной компьютерной науке и искусственному интеллекту. Очевидно, что алгоритмическая механизация с машинами тьюринговского типа сталкивается с серьезными препятствиями, которые нельзя преодолеть путем роста вычислительной мощности классических или квантовых компьютеров. Например, невозможно справиться с распознаванием образов и другими сложными задачами человеческого восприятия с помощью программно управляемых компьютеров. По-видимому, структура человеческого мозга совершенно иная.

В истории науки работа мозга иллюстрировалась техническими моделями, сделанными по самой передовой технологии [5.41]. Так, в эпоху механицизма функции мозга рассматривались как гидравлические давления, распространявшиеся по нервам и приводящие в действие мускулы. С началом развития электротехники мозг сравнивали с телеграфными или телефонными коммутаторами. С начала развития компьютеров мозг отождествлялся с наиболее продвинутыми поколениями «железа». В предыдущем разделе мы видели, что даже квантовые компьютеры (если их когда-нибудь сконструируют) не могут увеличить свою мощность, выйдя за рамки сложности алгоритмов тьюринговского типа.

В противоположность программно управляемым серийным компьютерам, человеческие мозг и разум характеризуются противоречиями, неполнотой, устойчивостью и сопротивляемостью по отношению к шуму, но в то же время наличием хаотических состояний, чувствительностью по отношению к начальным условиям и, последнее, но не менее важное, наличием процессов обучения. В подходе, основанном на теории сложности, эти свойства хорошо известны. Что касается архитектуры систем тьюринговского типа и сложных систем, то из последовательного и централизованного управления в классических системах вытекает существенное ограничение на эту архитектуру, а сложным динамическим системам внутренне присущи параллелизм и самоорганизация.

Тем не менее исторически на первые модели нейрокомпьютеров все еще оказывала влияние концепция машины Тьюринга. В знаменитой статье «Логическое исчисление идей, внутренне присущих нервной активности» (1943) Мак-Каллок и Питтс предложили сложную модель нейронов как пороговых логических элементов с возбуждающими и тормозящими синапсами, которая использовала понятия математической логики Рассела, Гильберта, Карнапа и др., а также представление о машине Тьюринга. Нейрон Мак-Каллока–Питтса возбуждает импульс y вдоль своего аксона в момент времени $n+1$, если взвешенная сумма его входных сигналов $x_1 \ldots x_m$ и весов $w_1 \ldots w_m$ в момент времени n превышает порог возбуждения θ нейрона (рис. 5.18 *а*) [5.42].

В качестве конкретных приложений таких нейронов Мак-Каллока–Питтса выступают следующие модели логических связей:

Вентиль ИЛИ (рис. 5.18 *б*) моделирует логическое сложение x_1 ИЛИ x_2 высказываний x_1 и x_2 (формально $x_1 \vee x_2$), которое ложно только в том

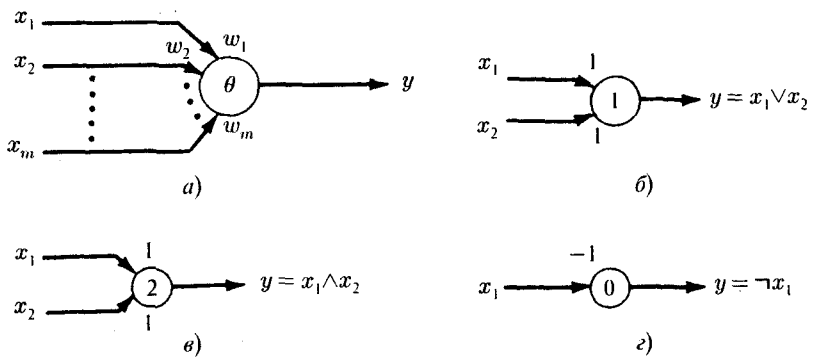


Рис. 5.18. Нейрон Мак-Каллока—Питтса (*а*); вентиль ИЛИ (*б*); вентиль И (*в*); вентиль НЕ (*г*) [5.34]

случае, когда ложны оба высказывания x_1 и x_2, и верно во всех остальных случаях. Значения истинности в двоичном коде представляются как 0 для «ложь» и 1 для «истина». В случае, когда порог $\theta = 1$ и веса $w_1 = 1$ и $w_2 = 1$, вентиль ИЛИ срабатывает при $w_1x_1 + w_2x_2 \geqslant \theta$, до тех пор пока x_1, или x_2, или они оба равны 1.

Вентиль И (рис. 5.18 *в*) моделирует логическое умножение x_1 И x_2 (формально $x_1 \wedge x_2$), которое верно только в случае, когда оба высказывания x_1 и x_2 верны, и ложно во всех остальных случаях. В случае, когда порог $\theta = 2$ и веса $w_1 = 1$ и $w_2 = 1$, вентиль И срабатывает при $w_1x_1 + w_2x_2 \geqslant \theta$, только если оба x_1 и x_2 равны 1.

Вентиль НЕ (рис. 5.18 *г*) моделирует логическое отрицание НЕ x_1 (формально $\neg x_1$), которое верно только тогда, когда x_1 ложно, и ложно в обратном случае. В случае, когда порог $\theta = 0$ и вес $w_1 = -1$ вентиль НЕ срабатывает при $w_1x_1 \geqslant \theta$ только если x_1 равно 0. Следовательно, если x_1 равно 1, то вентиль НЕ не срабатывает, и это означает, что выход $y = \neg x_1 = 0$.

Нейронная сеть типа Мак-Каллока—Питтса представляет собой систему описанных нейронов Мак-Каллока—Питтса, связанных с помощью разделения выхода каждого нейрона на линии и соединения некоторых из них с входами других нейронов (рис. 5.19). Хотя такое представление о системе может быть слишком упрощенным, всякий «классический компьютер» фон Неймана может быть

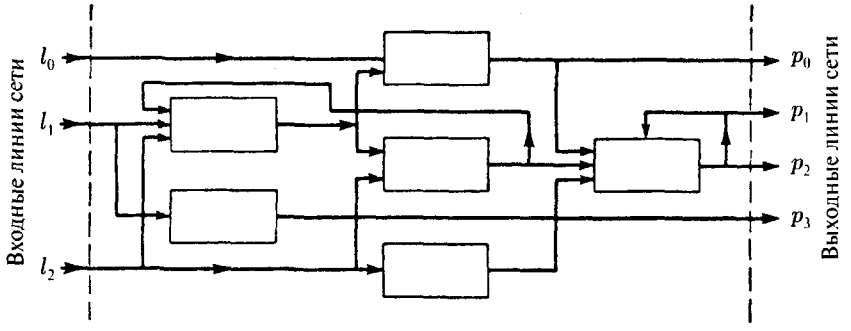


Рис. 5.19. Сеть Мак-Каллока—Питтса

смоделирован сетью таких нейронов. В 1945 г. Джон фон Нейман написал черновой доклад, который стал знаменитым как первая публикация, в которой была ясно высказана идея сохраняемой программы, помещаемой в память компьютера вместе с данными, которые она будет обрабатывать. Этот исторический документ показывает, что фон Нейман был полностью уверен в возможности вычислений с помощью сети Мак-Каллока—Питтса.

Математически компьютер фон Неймана можно рассматривать как *конечный автомат*, состоящий из конечного множества сигналов ввода X, конечного множества сигналов вывода Y и конечного множества состояний Q. Динамика конечного автомата определяется функцией изменения состояния δ, преобразующей состояние q и ввод x в момент времени t в состояние $\delta(q, x)$ в последующий момент времени $t + 1$, и функцией вывода β, связывающей состояние q с выводом $\beta(q)$.

Можно легко показать, что компоненты компьютера фон Неймана, такие как блок ввода-вывода, память, блок логического контроля и арифметический блок, являются конечными автоматами. Даже современный цифровой компьютер, представляющий собой сеть из тысяч элементов и собранный на чипах, можно рассматривать как нейронную сеть типа Мак-Каллока—Питтса. В общем случае каждая регистровая машина, машина Тьюринга или рекурсивная функция может быть сымитирована соответствующей сетью конечных автоматов. Однако эти приложения сетей Мак-Каллока—Питтса работают только в рамках программно управляемых последовательных компьютеров.

И вновь Джон фон Нейман оказался первым, кто попробовал расширить концепцию универсального компьютера Тьюринга и ввел идею *самовоспроизводящегося автомата* [5.43]. Он заметил, что машина, строящая другие машины, уменьшает свою сложность, так как невозможно использовать больше материала, чем задано строящей машиной. В противоположность этому традиционному механистическому взгляду, живые организмы в процессе биологической эволюции представляются, по меньшей мере, столь же сложными, как их родители, причем в долгом процессе эволюции сложность возрастает (Герберт Спенсер).

Первые указания на математические модели живых организмов, рассматриваемых как самовоспроизводящиеся сети клеток, дает концепция *клеточных автоматов* фон Неймана. Пространство клеток является однородной решеткой, разделенные на равные клетки, как на шахматной доске. Элементарным клеточным автоматом является клетка, которая может находиться в разных состояниях, например, «быть занятой» (отмечено точкой), «свободной» или «цветной». Множество элементарных автоматов называется *составным автоматом или конфигурацией*. Каждый автомат характеризуется своим окружением, т. е. своим состоянием и состоянием соседей. Динамика автоматов определяется синхронными правилами преобразования[26]. Фон Нейман доказал, что типичное свойство живых систем — их способность к самовоспроизведению — может быть имитирована автоматом с 200 000 клеток (на плоскости), где каждая клетка может иметь 29 возможных состояний и четыре соседние клетки, име-

[26] То есть состояние всех клеток меняется одновременно в дискретные моменты времени $t = 1, 2, \ldots$. — *Прим. ред.*

ющие с данной общие ребра, в качестве окружения [5.44].

Эта идея была развита Джоном Конвеем, клеточный автомат которого ЖИЗНЬ может моделировать рост, изменение и смерть популяций живых систем. Простой пример определяется следующими синхронными правилами для клеток с двумя состояниями «живая» (помечено точкой) или «мертвая». Здесь соседями данной клетки считаются 6 клеток, имеющих общие ребра или вершины.

1. *Правило выживания: занятая клетка с 2 или 3 живыми соседними клетками остается неизменной.*
2. *Правило смерти: живая клетка становится мертвой, если вокруг нее имеется более, чем три живых соседа («перенаселенность») или менее двух живых соседних клеток («изоляция»).*
3. *Правило рождения: если мертвая клетка имеет вокруг ровно три живых соседних клетки, то на на следующем шаге по времени она становится живой.*

На рис. 5.20 *а* показана «смерть» конфигурации в третьем поколении, а на рис. 5.20 *б* показано «выживание» после второго поколения. Теория Конвея приводит и к более удивительным результатам, которые были обнаружены с помощью компьютерных экспериментов.

Клеточные автоматы – это не только приятные компьютерные игры. Оказалось, что они представляют собой дискретные и квантованные модели сложных систем, динамика которых описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Представьте еще раз плоскость, похожую на шахматную доску с клетками. Состояние одномерного клеточного автомата состоит из конечной цепочки клеток, каждая из которых может находиться в одном из двух состояний («черная» (0) или «белая» (1)) и связана только с двумя ближайшими соседями, с которыми она обменивается информацией о своем состоянии. Последующие (более поздние) состояния одномерного автомата представляют последующие цепочки на пространственно-временной плоскости, каждая из которых состоит из клеток, принимающих одно из двух состоя-

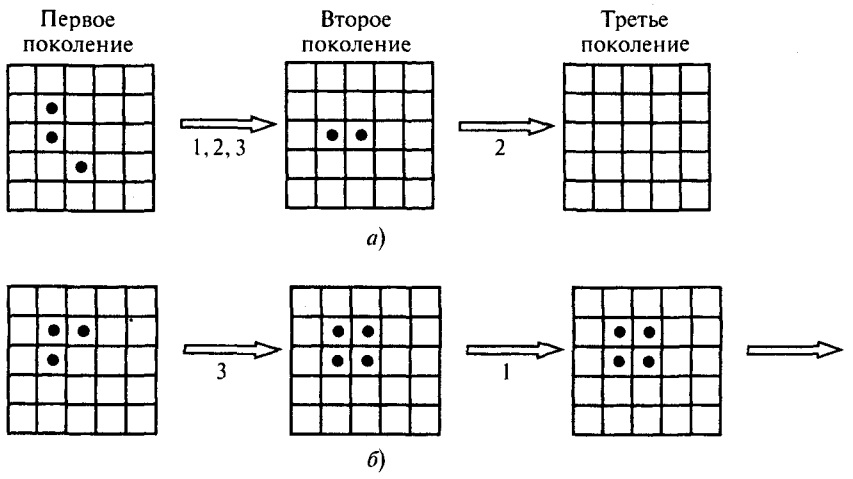


Рис. 5.20. Клеточный автомат ЖИЗНЬ, моделирующий: *а* — «смерть»; *б* — «выживание»

ний, зависящих от предыдущих (более ранних) состояний и состояний их двух ближайших соседей. На рис. 5.21 *б–д* представлена временна́я эволюция четырех автоматов за 60 временны́х шагов. Таким образом, динамика одномерного клеточного автомата определяется булевой функцией трех переменных, каждая из которых может принимать значения либо 0, либо 1 [5.45].

Для трех переменных, принимающих по два значения каждая, имеется всего $2^3 = 8$ возможностей для трех ближайших соседних мест. На рис. 5.21 *а* они упорядочены согласно соответствующему двоичному числу из трех цифр. Для каждого из трех ближайших соседних мест должно быть задано правило, определяющее следующее состояние клетки посередине. В случае восьми последовательностей и двух возможных состояний каждой клетки имеется всего $2^8 = 256$ возможных комбинаций. Одна из таких

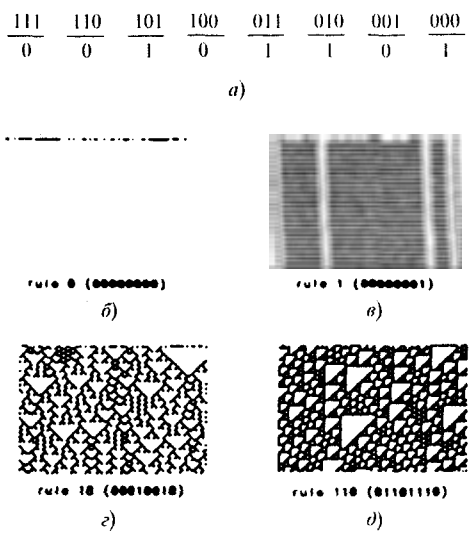


Рис. 5.21. Пример правила, определяющего динамику одномерного клеточного автомата: одномерные клеточные автоматы (*а*); аттракторы одномерных клеточных автоматов (*б–д*)

нормативных комбинаций, определяющих динамику одномерного клеточного автомата, показана на рис. 5.21 *а*.

Каждое правило характеризуется составленным из восьми цифр двоичным числом состояний, которое может принимать каждая клетка следующей цепочки. Эти двоичные числа можно упорядочить, сопоставив им соответствующие десятичные числа, переведя из двоичной в десятичную систему счисления.

Временна́я эволюция клеточных автоматов, задаваемых этими простыми правилами, даже в случае случайных начальных условий может быть весьма разнообразна. Согласно Стивену Уолфрему, компьютерные эксперименты порождают следующие классы аттракторов, к которым в процессе эволюции стремятся клеточные структуры.

Системы класса 1 через несколько шагов достигают однородного состояния равновесия вне зависимости от начальных условий. Это конечное состояние равновесия показано в виде сплошной белой плоскости и соответствует аттрактору типа неподвижной точки (рис. 5.21 *б*).

Системы класса 2 через несколько шагов по времени демонстрируют постоянную или периодическую картину эволюции, сравнительно независимую от начальных условий. От начальных условий могут зависеть конкретные детали структуры, но не вся глобальная картина (рис. 5.21 *в*).

В случае систем класса 3 клеточные автоматы производят такие конфигурации, которые кажутся случайно и нерегулярно рассеянными по сетке (рис. 5.21 *г*), в то время как для систем класса 4 можно наблюдать эволюционирующие конфигурации со случайными квазиорганическими и локально сложными структурами (рис. 5.21 *д*).

В противоположность автоматам классов 1 и 2, структуры у автоматов классов 3 и 4 существенно зависят от начальных условий. Очевидно, что эти четыре класса клеточных автоматов моделируют поведение аттракторов сложных нелинейных систем, что представляет собой хорошо известный факт теории самоорганизующихся процессов. Они напоминают нам знакомое деление веществ на твердые, жидкие и газообразные, или живых организмов на растения и животные. В общем, подход, основанный на клеточных автоматах, подтверждает интуитивную идею о том, что сложные системы находятся где-то посередине между регулярным порядком (как кристаллы льда или фуллерены[27]) и полной нерегулярностью или шумом (как молекулы в нагретом газе). Организмы и мозг очень сложны, но их нельзя назвать ни полностью упорядоченными, ни полностью случайными и хаотичными [5.46].

Очевидно, что четыре класса клеточных автоматов моделируют поведение аттракторов нелинейных динамических систем, рассматривавшихся в предыдущих главах. Ранее мы видели много примеров эволюции материи, жизни и разума-мозга. В гл. 7 будут рассмотрены многие аналогии с эволюцией человеческих сообществ. В общем, самоорганизация понимается как фазовый переход в сложной системе. Макроскопические структуры возникают в результате сложных нелинейных взаимодействий микроскопических элементов. Существуют различные структуры таких фазовых переходов, соответствующие разным аттракторам динамических систем.

На рис. 2.26 *а–д* был приведен обзор разных аттракторов для потока жидкости с постепенно увеличивающейся скоростью течения. Эти картины потока имеют много аналогий с картинами эволюции клеточных автоматов. На первом уровне поток стремится к однородному состоянию равновесия («неподвижная точка»). При увеличении скорости можно наблюдать бифуркацию двух или более вихрей, соответствующих периодическим или квазипериодическим аттракторам. Наконец, порядок распадается в детерминированный хаос, представляющий собой фрактальный аттрактор сложной системы.

С точки зрения моделирования, чрезвычайно интересны клеточные автоматы классов 3 и 4. Класс 3 приводит к картинам эволюции, кажущимся нерегулярными, случайными и зашумленными. Класс 4 показывает картины эволюции диссипативных систем, содержащие иногда квазиорганические формы, которые можно наблюдать при эволюции организмов и популяций.

С точки зрения информации, существуют принципиальные различия в обработке информации в каждом классе автоматов. Так как образование структур в автоматах класса 1 полностью независимо от начальных условий, информация о начальных условиях быстро забывается. Конечная однородная картина равновесия не содержит никаких следов этих условий. В колебательных картинах финальных состояний автоматов класса 2 сохраняется некоторая информация о начальных условиях, но только в пространственно локализованных структурах. Глобальное колебательное поведение не зависит от начальных данных.

Автоматы класса 3 весьма чувствительны к малым изменениям на-

[27] Простейший пример такой структуры C_{60}, в котором атомы углерода расположены в вершинах многогранника, аналогичного футбольному мячу. — *Прим. ред.*

чальных условий. Так, они демонстрируют долговременный процесс передачи информации. Любое локальное изменение передается глобально в самые удаленные области в соответствии с эффектом бабочки.

В автоматах класса 4 возможна передача информации на большие расстояния, но иногда она ограничена локализованными в пространстве и во времени структурами.

Другим аспектом обработки информации является потеря информации или степень неопределенности предсказания в каждом классе клеточных автоматов, измеряемая энтропией Колмогорова–Синая.

Предсказания будущего развития не составляют труда для клеточных автоматов двух первых классов. В случае класса 1 клеточные автоматы всегда после нескольких конечных шагов эволюционируют к однородному состоянию покоя, которая повторяется на всех последующих шагах, образуя аттрактор типа неподвижной точки. Так как информация о расположении клеток на предыдущих шагах не сохраняется, эволюция необратима; у нас нет возможности вернуться назад и восстановить начальные условия, с которых автоматы реально стартовали. В случае класса 2 развитие повторяющихся картин, очевидно, обратимо для всех последующих шагов[28]. Оно сохраняет достаточное количество информации, позволяющее вернуться назад или продвинуться вперед, начиная с любого конкретного шага. В случайных конфигурациях класса 3 все корреляции убывают и поэтому эволюция необратима. Для локализованных сложных структур класса 4 мы, в противоположность полной потере структуры в предыдущем случае, возможно, сохраняем шанс увидеть странные или хаотические аттракторы, представляющие собой очень сложные и взаимосвязанные объекты.

Из 256 простейших одномерных клеточных автоматов с ближайшими соседями и двоичными клеточными состояниями (или двумя цветами) только шесть имеют обратимое поведение. Они генерируют только простые повторяющиеся изменения в начальных условиях. В этих случаях всегда можно воспроизвести конфигурации всех предыдущих шагов, начиная с любой заданной конфигурации. Иными словами, возможно поменять местами прошлое и будущее. Если мы увеличим число клеточных состояний (цветов) с двух до трех, то получим $3^3 = 27$ возможностей для трех ближайших соседей и гигантское число $3^{27} = 7\,625\,597\,484\,987$ одномерных клеточных автоматов. Среди них имеются 1800 обратимых автоматов, так что, начав с любой конфигурации клеток, можно генерировать конфигурации на всех предыдущих шагах. Однако некоторые их этих 1800 обратимых одномерных автоматов уже не только выводят простые повторяющиеся преобразования начальных условий, но демонстрируют сложные перепутанные структуры. Таким образом, обратимые микроправила могут порождать сложное макроповедение.

Например, мы можем построить обратимые правила, которые остаются прежними даже при повороте «задом наперед». Поэтому на правила одномерного клеточного автомата вли-

[28] Вообще говоря, вопрос об обратимости клеточного автомата с данным правилом в каждом случае должен рассматриваться отдельно. Обзор и обсуждение этих проблем представлены в книге: *Ахромеева Т. С., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г., Самарский А. А.* Структуры и хаос в нелинейных средах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 484 с.

1	1	1	1	1	1	1	1
111	110	101	100	011	010	001	000
1	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0
111	110	101	100	011	010	001	000
0	1	1	1	1	0	1	0

Рис. 5.22. Правило обратимого клеточного автомата 122R

яет зависимость от цветов, которые были двумя шагами назад. На рис. 5.21 мы взяли элементарное правило 122 для 256 простейших одномерных автоматов с ближайшими соседями и двоичными клеточными состояниями (или двумя цветами). Мы добавляем ограничение, что новое состояние (цвет) клетки должно быть Инвертировано, если клетка занята (1) двумя шагами ранее. Если известны не один, а два последовательных шага, всегда возможно определить клеточную конфигурацию после будущих или прошлых шагов (рис. 5.22).

Обратимость и необратимость развития во времени — важный вопрос в естественных науках. Все фундаментальные законы классической, релятивистской и квантовой физики обратимы, т. е. они инвариантны относительно двух возможных направлений времени $t \to -t$. По-видимому, наш повседневный опыт свидетельствует о необратимом развитии в одном направлении по времени. Согласно второму началу термодинамики, растущий беспорядок и случайность («энтропия») порождаются простыми и упорядоченными начальными условиями для замкнутых динамических систем (см. разд. 3.2). Несмотря на микрообратимость молекулярных законов необратимость весьма вероятна. Некоторые клеточные автоматы с обратимыми правилами порождают структуры с возрастающей хаотичностью, начиная эволюцию с простых и упорядоченных начальных условий. На рис. 5.23 обратимый клеточный автомат с правилом 122R может стартовать с начального условия, в котором все занятые клетки или частицы принадлежат полностью упорядоченной структуре в центре ящика. При движении сверху вниз распределение становится все более и более случайным и эволюция в этом случае оказывается необратимой по аналогии со вторым началом.

В принципе, обратимость возможна, так же как в известной теореме Пуанкаре о возврате в статистической механике, но крайне маловероятна. Начав с простого состояния и следя за фактической эволюцией, можно найти начальные условия, которые приводят к возрастающей случайности (рис. 5.23). Но для клеточных автоматов количество вычислений, нужных для того, чтобы вернуться назад и найти эти условия, не может быть сведено к фактической эволюции от простой структуры к случайной. Вычислительная необратимость соответствует необратимости во времени и невозможности восстановить начальную конфигурацию. Таким образом, в компьютерных экспериментах с клеточными автоматами мы получаем вычислительный эквивалент второго начала термодинамики.

Одни и те же простые правила клеточных автоматов с разными начальными условиями могут порождать различные, все более сложные и случайные структуры. Во многих случаях не существует конечной программы, предсказывающей развитие сложных и случайных структур. Алгоритмическая сложность (см. разд. 5.2) приводит к тому, что картина пространственно-временной эволюции несжимаема благодаря ее вычислительной необрати-

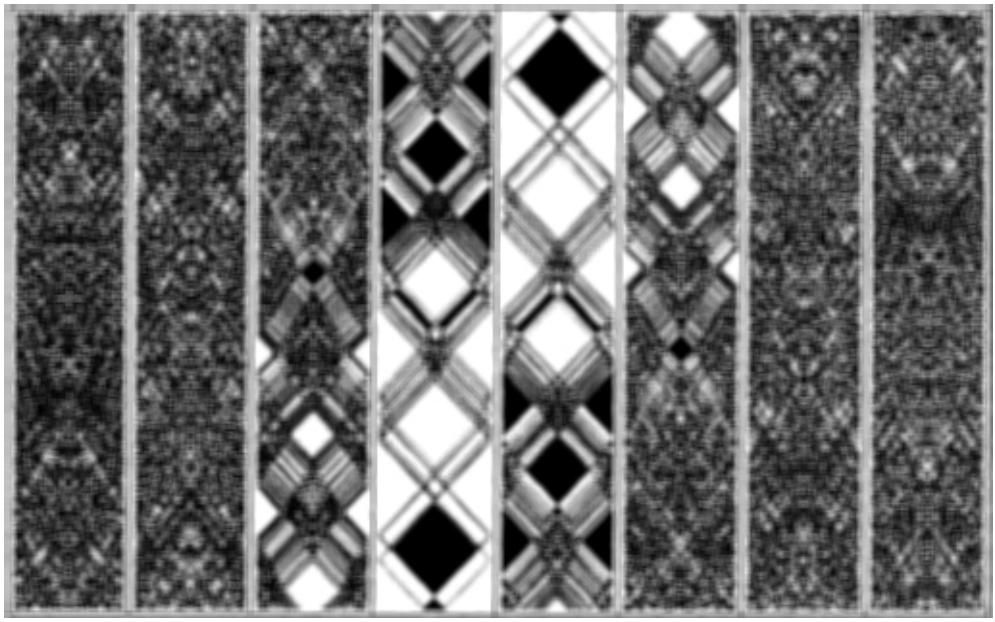


Рис. 5.23. Обратимый клеточный автомат со случайным образованием структур, иллюстрирующий второе начало термодинамики [5.47]

мости [29]. В этом случае вопрос о том, как будет себя вести система в далеком будущем, неразрешим, так как не может существовать конечного вычисления, которое может дать на него ответ. Очевидно, что вычислительная необратимость связана с фундаментальной проблемой Тьюринга о неразрешимости. Вопрос о том, всегда ли вымирает данная конфигурация с заданными начальными условиями для клеточного автомата, можно рассматривать так же, как проблему остановки машин Тьюринга.

Вычислительная необратимость означает, что не существует конечного метода предсказания того, как будет вести себя система, не считая того, чтобы совершить почти все шаги фактического развития. В истории науки предполагалось, что точное знание законов позволяет точно предсказывать будущее. Даже в случае теории хаоса существуют методы анализа временны́х рядов (см. разд. 2.6), которые определяют, по крайней мере, будущие направления и аттракторы поведения. Но когда есть случайность, не существует никакого сокращенного пути, кроме фактической эволюции. Стивен Уолфрем предполагает, что науки о сложности в основе своей характеризуются *вычислительной неприводимостью*. Другими словами, нет более короткого пути выяснить состояние изучаемой системы, кроме как имитируя ее эволюцию шаг за ша-

[29] Вообще говоря, вычислительная необратимость и сложность существенно разные понятия. Джоном Конвеем было показано, что рассмотренная выше игра «ЖИЗНЬ» эквивалентна универсальной машине Тьюринга, т. е. может генерировать динамику любой сложности. Этот автомат необратим. Позже аналогичные свойства были установлены и для обратимых автоматов. — *Прим. ред.*

гом. И многие клеточные автоматы это прекрасно иллюстрируют [5.48][30]. Даже если мы знаем все законы поведения на микроуровне, мы не можем предсказать развитие случайной системы на макроуровне.

Мозг, как сложная система, определяется на микроуровне нейронов более или менее известными простыми правилами для синапсов (например, правилом Хебба). Тем не менее нет никаких шансов рассчитать во всех деталях образование структур в нейронных клеточных ансамблях. С философской точки зрения, можно думать, что вычислительная необратимость (и вычислительная неприводимость) поддерживают личную индивидуальность: наша личная жизнь находится под влиянием многих неожиданных и случайных событий. Структура нашего образа жизни в высшей степени нелинейна, сложна и случайна. Таким образом, не существует краткого пути для предсказания жизни: если мы хотим выяснить смысл и результат нашей жизни, мы должны ее прожить.

С методологической точки зрения, одномерный клеточный автомат предлагает дискретную и квантованную модель фазовой картины, описывающей динамическое поведение сложной системы с нелинейным дифференциальным уравнением эволюции, зависящим от одной пространственной переменной. Существует много причин для ограничения дискретными моделями. Сложность нелинейных систем часто слишком велика для того, чтобы получить результаты для непрерывных систем за разумное время счета. В этом случае компьютерные эксперименты с дискретными моделями дают, по крайней мере, грубую идею и ощущение происходящего, что напоминает лабораторные эксперименты.

Двумерные клеточные автоматы, которые использовались в игре Конвея «ЖИЗНЬ», можно интерпретировать как дискретные модели сложных систем с нелинейной эволюцией, зависящей от двух пространственных переменных. Очевидно, что клеточные автоматы — весьма чувствительный и эффективный инструмент для моделирования, когда возрастает сложность нелинейных систем, и возможность определения их поведения путем решения дифференциальных уравнений или даже расчета их дискретных аппроксимаций становится все более и более безнадежной.

[30] Гипотеза С. Уолфрема состоит в том, что в тех науках, где удалось добиться успеха, соответствующие модели вычислительно приводимы. Однако в науках о мозге, психике, обществе, в теории турбулентности, по его мысли, возникают вычислительно неприводимые системы. — *Прим. ред.*

Глава 6

Сложность и эволюция искусственных жизни и интеллекта

Алгоритмическая механизация мышления с помощью программно управляемых компьютеров сталкивается с серьезными трудностями, которые невозможно преодолеть только за счет растущих вычислительных мощностей. Например, компьютерные программы тьюринговского типа в ряде случаев не могут справиться с распознаванием образов, координацией движений и другими сложными задачами человеческого обучения. Идеи теории сложных динамических систем реализуются искусственными нейронными сетями. Их развитие связано с успешными техническими приложениями нелинейной динамики к физике твердого тела, физике спиновых стекол, к параллельным химическим и оптическими компьютерам, лазерным системам и человеческому мозгу (разд. 6.1).

Понятие *клеточных нейронных сетей* (КНС) в последнее время стало основой многообещающей парадигмы исследований сложности и реализовано в технологии микросхем и информационной технологии. КНС обеспечили технологический прорыв в создании аналоговых нейрокомпьютеров, предназначенных для вычислений с использованием графики и формирования рисунка. КНС представляет собой очень сложную вычислительную систему, поскольку она состоит из плотного параллельного массива компьютеров с общей вычислительной мощностью суперкомпьютера (разд. 6.2).

Как и в случае универсальной машины Тьюринга для цифровых компьютеров, существует универсальная КНС-машина, имитирующая все типы аналоговых нейрокомпьютеров. Степени динамической сложности не только подтверждаются эмпирическими наблюдениями в компьютерных экспериментах, но и строго определяются математическими методами (разд. 6.3). Уже известны поистине поразительные приложения искусственных нейронных сетей в нейробионике, медицине и робототехнике (разд. 6.4). Эволюцию сложных вычислительных систем продолжает искусственная жизнь с генетическими и обучающими алгоритмами (разд. 6.5).

6.1. Нейронные сети и синергетические компьютеры

Исторически современное развитие клеточных автоматов восходит к ранним идеям фон Неймана о самовоспроизводящихся автоматах. Помимо самовоспроизводства, есть и другое свойство, представляющееся существенным для сложных природных систем в противоположность традиционным компьютерам. Человеческий

мозг обладает способностью обучаться, например, через ощущения. В первой логической модели мозга, предложенной в виде сети Мак-Каллока—Питтса, функция искусственного нейрона была постоянно зафиксирована. Мак-Каллок и Питтс сумели показать, что сеть формальных нейронов их типа может вычислить любое конечное логическое выражение.

Однако для того чтобы нейрокомпьютер стал способным решать сложные задачи, необходимо найти механизмы самоорганизации, которые позволяют сети обучаться. В 1949 г. Дональд Хебб предложил первое нейрофизиологическое правило обучения, ставшее важным шагом в развитии нейрокомпьютеров. Синапсы нейронов не всегда обладают одной и той же чувствительностью, а сами себя модифицируют так, чтобы благоприятствовать повторению часто возникавших в прошлом картин возбуждения.

В 1958 г. Розенблатт создал первый обучающийся нейрокомпьютер, ставший знаменитым под названием *перцептрон* [6.1]. По профессии Розенблатт был психологом и проявлял типичный для психологов интерес к процессам обучения людей. Однако создание обучающейся машины, способной к сложному адаптивному поведению, представляло большой интерес для инженеров и физиков. Поэтому нет ничего удивительного в том, что исходная идея психолога была подхвачена инженерами, которые больше интересовались роботами и компьютерными технологиями, чем имитированием процессов, происходящих в человеческом мозге. С технической точки зрения, несущественно, что обучающие процедуры в нейрокомпьютерах похожи на обучающие процессы в системе разум—мозг. Они должны быть эффективными при управлении сложными задачами адаптивного поведения, но могут использовать методы, которые совершенно отличаются от известных в биологической эволюции.

Нейрокомпьютер Розенблатта — это сеть с механизмом прогнозирования событий с двоичными пороговыми элементами и тремя слоями. Первый слой является чувствительной поверхностью, называемой «сетчаткой», состоящей из *клеток-раздражителей* (*S*-модулей [1]). *S*-модули связаны с промежуточным слоем фиксированными весами, не меняющимися в процессе обучения. Элементы промежуточного слоя называются *ассоциаторными клетками* (*A*-модулями). Каждый *A*-модуль получает входной сигнал с постоянным весом от нескольких *S*-модулей. Иными словами, некоторые *S*-модули проектируют свои выходные сигналы на *A*-модуль. Может быть и так, что *S*-модуль проектирует свой выходной сигнал на несколько *A*-модулей. Промежуточный слой полностью связан с выходным слоем, элементы которого называются *клетками отклика* (*R*-модулями). Веса между промежуточным и выходным слоями переменны и, таким образом, способны к обучению.

Перцептрон рассматривается как нейрокомпьютер, способный классифицировать воспринимаемый образ в одной из нескольких возможных групп. В случае двух групп каждый *R*-модуль обучается различать входные образы по тому, активированы они или дезактивированы. Процедура обучения перцептрона контролируется. Таким образом, должно быть хорошо известно желаемое состояние (активное или нет) каждого *R*-модуля, соответствующее образу, который нужно выучить.

[1] Модуль — отдельный элемент из набора однотипных элементов. — *Прим. пер.*

Образы, которые надлежит выучить, предлагаются сети, а веса между промежуточным и выходным слоями подстраиваются в соответствии с правилом обучения. Процедура повторяется до тех пор, пока все образы не дадут правильный выходной сигнал.

> Процедура обучения представляет собой простой алгоритм: для каждого элемента i выходного слоя реальный выходной сигнал o_i, порожденный некоторым образом, сравнивается с желаемым выходным сигналом d_i. Если $o_i = d_i$, то образ уже правильно классифицирован. Если желаемый выходной сигнал d_i равен единице, а реальный выходной сигнал o_i — нулю, тогда все веса $w_{ij}(t)$ в момент времени t с активным модулем ($o_i > 0$) увеличиваются на следующем шаге $t + 1$, т. е. формально $w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) + \sigma o_j$. Постоянная σ — это *коэффициент обучения*, который способен в зависимости от своей величины увеличивать или уменьшать скорость обучения. Если желаемый выходной сигнал равен нулю, а реальный — единице, то все веса с активным элементом уменьшаются, т. е. формально
>
> $$w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) - \sigma o_j.$$

Казалось, что перцептрон с нейронными сетями, способными на все, открыл новую эру в компьютерных технологиях. В первых работах группы, занимавшейся перцептроном, звучали искренние восторги. Но в 1969 г. энтузиазм сменился резкой критикой. В том году Марвин Минский и Сеймур Пейперт опубликовали знаменитую книгу «Перцептроны», где с математической строгостью обсуждались ограничения, которым подчиняются перцептроны. Реакцией на этот анализ была потеря интереса большинства исследовательских групп к сетям и сложным системам и переход к классическому ИИ и компьютерной технологии, казавшимся более полезными, чем «спекуляции» фанатов перцептрона.

Но такая позиция научного сообщества после 1969 г. была, конечно, преувеличенной. Некритичный энтузиазм, равно как и некритичное осуждение являются неадекватными стратегиями развития науки. Эволюции по Дарвину потребовались миллионы лет, чтобы создать в нашем мозге способность к распознаванию образов. Было бы удивительно, если бы наши инженеры всего за несколько лет преуспели в конструировании аналогичных нейрокомпьютеров.

Решающими являются следующие вопросы. Что может делать перцептрон? Что он не может делать? Почему перцептрон не может это делать? Важным шагом в поиске ответов на эти вопросы было доказательство Минским и Пейпертом так называемой теоремы сходимости перцептрона. Она гарантирует, что решение, которому можно *научиться* с помощью сети, в принципе может быть *найдено* за конечное число шагов обучения. В этом смысле доказана сходимость системы к решению.

Но возникает вопрос, можно ли в принципе *научиться* находить с помощью перцептрона конкретное решение. В общем случае, мы должны определить классы задач, которые доступны для перцептронов. Рассмотрение ряда простых задач показывает, что перцептроны не столь универсальны, как это казалось в полные восторгов времена первых исследований. Например, перцептрон не способен различить четные и нечетные числа. Частный случай этой так называемой проблемы четности демонстрирует следующее приложение к элементарной логике.

Перцептрон не может выучить исключающее ИЛИ[2] (сокращенно XOR). Эта неразрешимая когнитивная задача жестко ограничивает применение перцептронов к изучению ИИ. Причины можно легко понять. Напомним, что выражение x XOR y с булевой функцией XOR истинно, только если истинны либо x, либо y, но не обе переменные x и y одновременно. Выражение x OR y с булевой функцией OR ложно только в случае, если оба x и y ложны, в остальных случаях оно истинно. Значения булевых функций OR и XOR содержатся в следующей таблице.

x	y	x XOR y	x OR y
1	1	0	1
1	0	1	1
0	1	1	1
0	0	0	0

Представьте сеть с двумя входящими сигналами x и y и выходящим сигналом z, который может принимать состояния 1 (активное) и 0 (неактивное). Чтобы имитировать операцию XOR, выходной сигнал должен быть равен нулю для четного входа (оба входных элемента либо активны, либо нет), и единице для нечетного входа (один входной элемент активен, другой неактивен). На рис. 6.1 *а*, *б* показаны возможные входные конфигурации для OR и XOR в системе координат, в которой координатами являются входные сигналы x и y.

Каждая пара (x, y) координат x и y имеет соответствующее значение z, помеченное белым кружочком (0) или черным кружочком (1). Линейный пороговый элемент θ вычисляет сумму взвешенных входных сигналов x и y с весами w_1 и w_2, или формально $\theta = w_1 x + w_2 x$. Простой вывод приводит к формуле для прямой линии, показанной на рис. 6.1 *а*, *б*. Положение прямой линии определяется весами w_1 и w_2. Эта линия отделяет активное состояние порогового элемента от его неактивного состояния.

Чтобы решить («научиться») OR-или XOR-задачу, веса w_1 и w_2 должны быть настроены так, чтобы точки (x, y) со значением $z = 1$ были отделены от точек со значением $z = 0$. Такое линейное разделение геометрически возможно для OR-задачи (рис. 6.1 *б*), но невозможно для XOR-задачи. В общем случае *классификация перцептроном входных образов ограничена линейно разделимыми образами.*

Этот результат может быть легко обобщен на случай сетей с более чем двумя входными элементами и действительными значениями. Многие задачи напоминают XOR-задачу в том отношении, что они не являются линейно разделимыми. На самом деле, наиболее интересные вычислительные задачи обладают этим свойством. XOR-задачу можно решить, добавив один скрытый элемент в сеть с двумя входами, которые связаны с выходом. Скрытый элемент связан с обеими входами и выходом (рис. 6.1 *в*).

Когда оба входных сигнала равны нулю, то скрытый промежуточный элемент с положительным порогом отключен. Нулевой сигнал достигает выхода и, так как в этом случае порог положителен, выходной сигнал равен нулю. Если какой-либо из двух входных сигналов равен 1, скрытый элемент остается выключенным, и выходной сигнал включается непосредственно благодаря прямой связи между входом и выходом. Наконец, когда оба входных сигнала равны 1, скрытый элемент возбуждается

[2] Далее мы не будем приводить русские эквиваленты стандартных логических операторов. — *Прим. пер.*

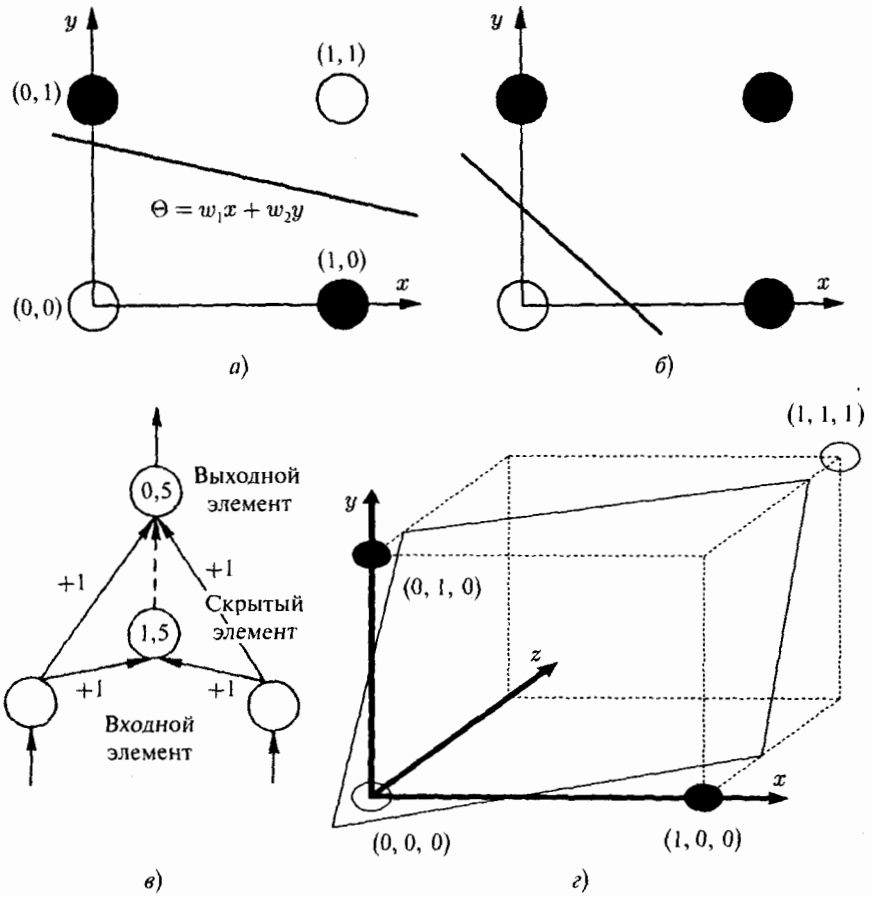


Рис. 6.1. Линейное разделение активных и неактивных состояний: невозможно для XOR-задачи (*а*); возможно для OR-задачи (*б*); XOR-задача может быть решена с помощью сети со скрытым элементом (*в*); XOR-задача линейно разделима двумерной пороговой плоскостью (*г*) [6.5]

до значения 1 и препятствует включению выходного элемента с отрицательным весом −2.

Таким образом, скрытый элемент допускает соответствующее внутреннее представление. XOR-задача становится *линейно* разделимой, если использовать двумерную пороговую плоскость в трехмерной системе координат с тремя входными сигналами, подаваемыми на выход, в качестве координат. Разделение возможно, так как вход (1, 1) перемещается теперь в z-плоскости к точке (1, 1, 1) (рис. 6.1 *г*).

Перцептрон имеет лишь один способный к обучению промежуточный слой с процессорными элементами. Тогда для многослойной сети возникает проблема, заключающаяся в том, что для слоев нейронов, не имеющих связи с внешним миром, невозможно непосредственно зарегистрировать возникающие ошибки. Непосредственно можно определить только ошибку между выходным слоем

и находящимся под ним промежуточным слоем.

Способность к созданию образов и решению задач, которой может обладать многослойная сеть, решающим образом зависит от числа обучающих слоев и числа элементов в них. Следовательно, ключевым вопросом для нейрокомпьютеров должно быть изучение сложности вычислений, так как увеличение сложности сети — это путь к преодолению ограничений перцептронов.

В разд. 4.2 мы уже обсуждали преимущества использования метода обратного распространения ошибки в многослойных сетях (рис. 4.17). Обучающий алгоритм этого метода позволяет определить сигнал ошибки даже для нейронов в скрытых слоях. Ошибка выходного слоя рекурсивно распространяется назад к нижележащему слою. Алгоритм способен построить сети со многими скрытыми слоями, нейроны которых могут обучаться. Так как многослойные сети могут содержать в скрытых слоях значительно больше информации, чем однослойные, то сети с обратным распространением ошибки являются очень мощными моделями для преодоления слабостей перцептронов.

Однако метод обратного распространения ошибки позволяет лишь построить технически успешные модели, которые в общем случае не имеют аналогий с биологической эволюцией. Настройка весов в этих моделях кажется совершенно отличной от того, что известно о поведении биологических синапсов. Компьютерная технология служит не для моделирования мозга, а для эффективных решений задач за разумное время. С другой стороны, мы должны отбросить детские иллюзии, что природа — это похожий на Бога инженер, всегда находящий наилучшие решения для эволюции. Как мы уже подчеркивали в предыдущих главах, в природе не существует центрального управляющего и программирующего процессора. Часто находятся только локальные решения, которые в общем случае не являются «оптимальными».

В 1988 г. Горман и Сежневский разработали техническое приложение обученной по методу обратного распространения ошибки сети к задаче о распознавании акустического эха от камней и от мин. Эта задача довольно сложна даже для нетренированного человеческого уха, но, конечно, она особенно важна для конструкторов подводных лодок, сталкивающихся с задачей создания акустической системы, которая могла бы различить сигналы от мин и от камней. Архитектура предложенной сети состоит из входного слоя с 60 элементами, скрытого слоя с 1–24 элементами и двух выходных элементов, каждый из которых представляет прототип «мины» и «камня», которые должны быть распознаны (рис. 6.2) [6.3].

Сначала данное акустическое эхо пропускается через частотный анализатор и разделяется на 60 различных частотных интервалов. Значение сигнала внутри каждого интервала меняется от 0 до 1. Эти 60 значений являются компонентами входного вектора, задаваемого соответствующим входным элементам. Входные элементы трансформируются скрытыми элементами, что приводит к возбуждению одного из двух выходных элементов, способных принимать значения от 0 до 1. Таким образом, в обученной сети с хорошо настроенными весами эхо от мины приводит к выходному сигналу $(1, 0)$, а эхо от камня — к выходному сигналу $(0, 1)$.

Чтобы обучить сеть, нужно снабдить ее примерами эха от мины и от камня. В каждом случае, в соответ-

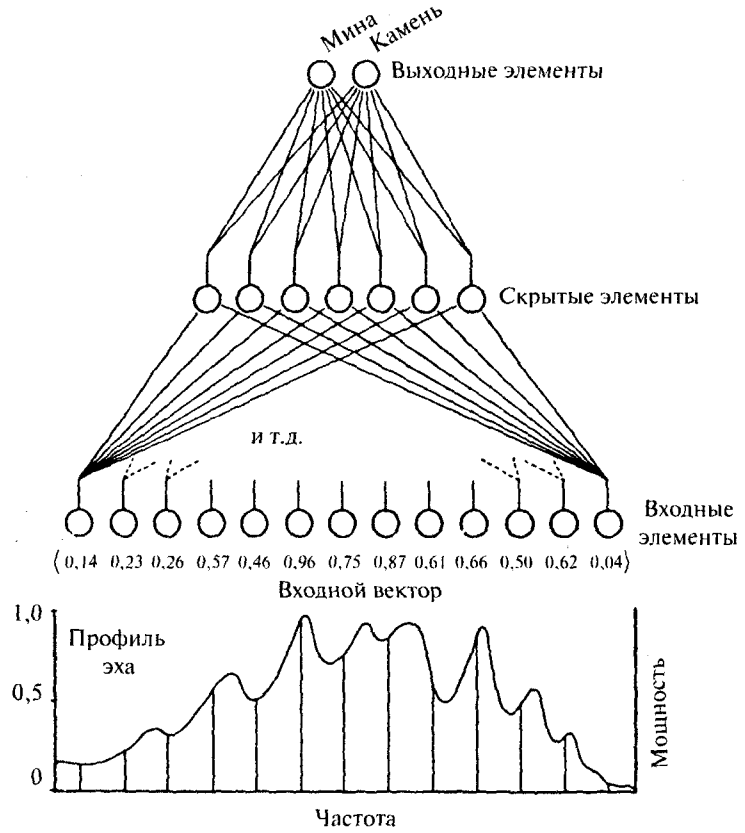


Рис. 6.2. Нейронная сеть, распознающая акустические эхо от камней и мин [6.3]

ствии с заданным входным сигналом, фактические значения выходных элементов измеряются и сравниваются с желаемыми значениями. Различие представляет собой сигнал ошибки, который вызывает малые изменения весов элементов. С помощью такой процедуры градиентного спуска происходит медленная настройка весовых коэффициентов в сети.

Сеть «мина — камень» Гормана и Сежневского является применением сложной системы к ИИ. Конечно, никто не утверждает, что система имитирует человеческий мозг, различающий два понятия типа «мины» и «камня». Но мы можем сказать, что эта техническая система имеет в скрытом слое внутреннее представление двух понятий в виде векторов-прототипов. В таком ограниченном смысле искусственная система «разумна», так как она может решить задачу, которую человеческий мозг рассматривает как разумную. Искусственные сети не ограничиваются бинарными различениями понятий. В 1986 г. Сежневский и Розенберг создали сеть, названную NETalk, которая была обучена чтению. Эта сеть рассматривает строки букв, образующие английские тексты, и превращает их в последовательности фонем, которые могут служить входными сигналами в синте-

заторе речи. Замечательным является непрерывающийся звук похожего на детский голоса, который расхваливали в популярных книгах как успех, производящий глубокое впечатление. Главной возможностью NETalk является обучающая процедура для внутреннего представления ряда принципов произношения. Каждой букве алфавита сопоставляется по крайней мере одна фонема. Для многих букв имеется несколько фонем, которые могут быть им присвоены в зависимости от лексического текста.

Сежневский и Розенберг использовали трехслойную сеть прямой связи с входным слоем, промежуточным скрытым слоем и выходным слоем. Хотя вряд ли можно считать, что обратное распространение ошибки может быть «естественным образом» реализовано в биологических мозгах, этот метод оказался самой быстрой обучающей процедурой, по сравнению с другими решениями. Входной слой воспринимает окно текста из семи букв, например, слово «phone» в фразе «The_phone_is» на рис. 6.3 *а*. Каждая из семи букв последовательно анализируется 29 искусственными нейронами, каждый из которых представляет букву алфавита, включая знаки пробела и пунктуации. Таким образом, в каждой нейронной подсистеме с 29 элементами возбуждается ровно один нейрон.

Выходной слой состоит из 26 нейронов, каждый из которых представляет элемент произношения. Имеется шесть элементов для позиции произношения, восемь — для артикуляции, три — для высоты тона, четыре — для пунктуации и пять — для ударения и деления на слоги. Таким образом, каждый звук имеет четыре характеристики из этих четырех групп элементов. $7 \times 29 = 203$ нейрона входного слоя связаны с 80 внутренними нейронами скрытого слоя, которые взаимосвязаны с 26 нейронами выходного слоя (рис. 6.3 *б*). Нейроны в слоях не связаны друг с другом, так же как непосредственно не связаны нейроны входного и выходного слоев.

Внутренний нейрон скрытого слоя получает сигналы от 203 входных нейронов, но посылает на выходной слой только 26 сигналов. Так как внутренние нейроны являются пороговыми элементами с порогами $T_1, \ldots, T_8$, входные сигналы умножаются на соответствующие веса, и величина суммы этих произведений определяет, возбужден нейрон или нет (рис. 6.3 *в*). В действительности возбуждение происходит не дискретным скачком, а в соответствии с непрерывной «сигмовидной кривой» [6.4].

В начале веса фиксируются случайным образом. Иначе говоря, NETalk начинает работу с бессмысленного бормотания. В фазе обучения NETalk использует конкретный детский текст, произношение которого хорошо известно. Случайные звуки сравниваются с желаемыми и веса корректируются методом обратного распространения ошибки. Примечательно, что эта процедура представляет собой определенный вид самоорганизации, а не основанную на правилах программу произношения. Предъявляется только общее требование изменения весов путем подгонки фактического выхода к желаемому. После десяти прогонов конкретного детского текста сеть уже может произносить его узнаваемым образом. После 50 прогонов оставалось только 5 % ошибок. В этой фазе неизвестный детский текст произносился всего с 22 % ошибок.

Сегодня сети типа NETalk должны имитироваться традиционными компьютерами с фоннеймановской

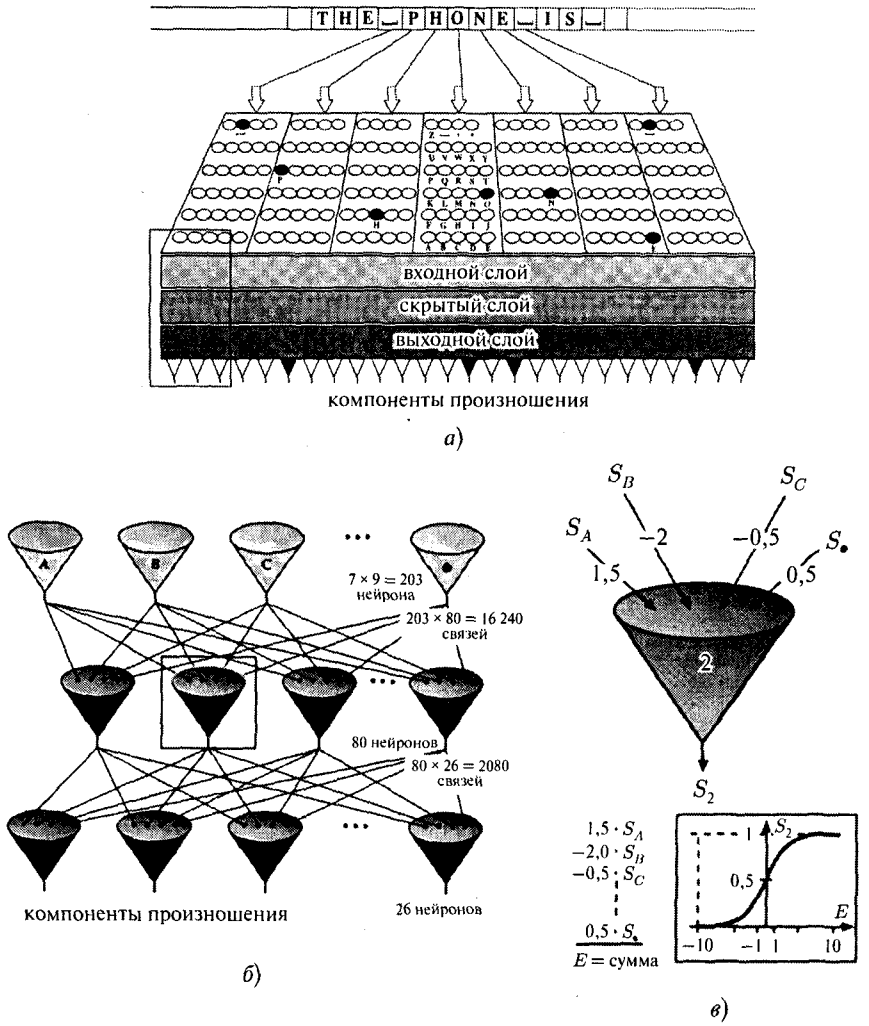


Рис. 6.3. Архитектура NETalk (*а*); взаимодействие нейронов (*б*); возбуждение нейронов (в) [6.4]

архитектурой, так как не существует аппаратного оборудования для непосредственной реализации сложных сетей. Таким образом, каждый нейрон должен последовательно рассчитываться. Даже в наши дни принципы самоорганизующихся сложных сетей все еще реализуются главным образом в программном обеспечении, а не в «железе». Тем не менее мы будем говорить о «нейрокомпьютерах», так как аппаратная реализация является вопросом будущих технических достижений, зависящих от новых технологий, например, твердотельных материалов или оптических методов, а не вопросом принципиальных теоретических ограничений.

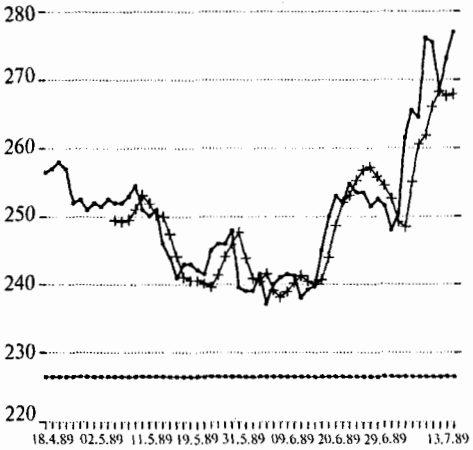
Перспективные оценки с помощью нейронных сетей представляются довольно успешными и выгодными в финансовых, страховых и бир-

жевых прогнозах. Причина состоит в том, что краткосрочные прогнозы котировок акций основаны на хаотичных временны́х рядах, которые становятся все более и более хаотичными при уменьшении времени, на котором делается прогноз.

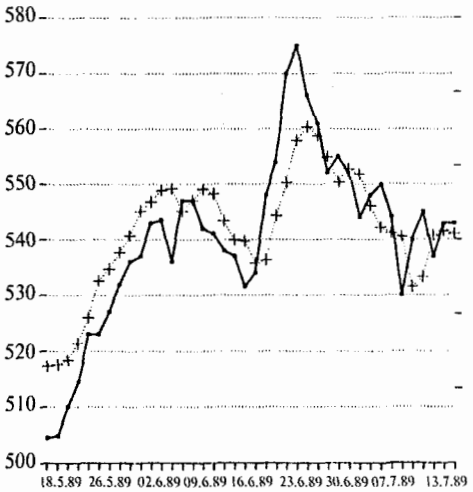
Стандартные статистические программы оказываются успешными только для долгосрочных прогнозов, если рост акций может быть сглажен без потери нужной информации. В этом случае хорошие статистические программы имеют точность от 60 до 75 %. Но краткосрочные прогнозы довольно ограничены. Обычные статистические процедуры сглаживания роста акций должны пренебрегать существенными свойствами краткосрочных прогнозов, представляющих частые, но малые флуктуации курса. В обычной статистической программе соответствующие расчетные факторы должны задаваться явно. Хорошо обученная и должным образом сконструированная нейронная сеть способна распознать соответствующие факторы, не прибегая к явному программированию. Она может взвесить входные данные и минимизировать ошибки прогнозирования в самоорганизующейся процедуре. Кроме того, в противоположность компьютерным программам, которые должны изменяться непосредственно программистом, она может адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей систему среды. Чтобы создать нейронную сеть для прогноза курса акций, должны быть подготовлены входные данные путем кодировки данных биржи в двоичной системе. Входной вектор состоит из нескольких частичных векторов, представляющих меновую стоимость акций, абсолютное изменение стоимости акций по сравнению со вчерашним днем, направление изменения стоимости, а также направление изменения по сравнению с позавчерашним днем и соответствующее изменение, превышающее 1 % по сравнению с предыдущим днем. Если входной вектор имеет фиксированную длину, скажем, в 40 единиц, то длины частичных векторов могут меняться в зависимости от их желаемой значимости. Система может иметь два выходных элемента. Активация левого выхода сигнализирует об уменьшении курса акций, активация правого — о его росте.

В обучающей фазе в систему был заложен реальный ежедневный курс акций за фиксированный период, скажем, от 9 февраля 1989 г. до 18 апреля 1989 г. На основе этих выученных данных сеть предсказала изменение курсов на следующие 19 дней. Чтобы измерить точность системы, прогнозы были сопоставлены с реальными кривыми. Несколько многослойных структур были протестированы методом обратного распространения ошибки. Они создали свою конкретную глобальную эвристику для прогнозов путем самоорганизации. Например, если на завтра прогнозируется практически то же значение, что и сегодня, то ошибка относительно мала. Эвристика этого правила большого пальца состоит в том факте, что изменение тенденции цен менее правдоподобно, чем сохранение неизменной цены. На рис. 6.4 *а*, *б* показаны кривые прогноза (+) и реальные кривые (−) курса акций для банка (*Commerzbank*) и фирмы (*Mersedes*).

Очевидно, сети прямой связи с обратным распространением ошибки технически очень интересны, хотя кажется, что они имеют мало отношения к обработке информации в биологическом мозге. В разд. 4.2 мы уже анализировали системы Хопфилда с



а)



б)

Рис. 6.4. Кривые прогноза нейронной сети (+) и реальные кривые курса акций (−): *а* — для банка *Commerzbank*; *б* — для фирмы *Mersedes*

обратной связью (рис. 4.8 *б*) и обучение хеббовского типа (рис. 4.9 *а*), которые, по-видимому, используются также и в мозге. В случае однородной сети булевых нейронов два состояния нейрона можно сопоставить двум возможным значениям спина электрона во внешнем магнитном поле. Модель Хопфилда является динамической системой, которая, по аналогии с процессами отжига в металлах, допускает существование энергетической функции. Так как она представляет собой невозрастающую монотонную функцию, система приходит к состоянию локального минимума энергии, соответствующего локально устойчивому стационарному состоянию (аттрактор типа неподвижной точки).

Таким образом, динамическая эволюция системы Хопфилда может соответствовать мысленному распознаванию. Например, начальное состояние, представляющее зашумленную картину буквы «А», переходит в конечное состояние, представляющее правильную картину, которой система была обучена на нескольких примерах (рис. 4.9 *б*). Физическое объяснение дается с помощью понятия фазового перехода в равновесной термодинамике. Правильное изображение связано с неподвижной точкой или устойчивым состоянием равновесия. Более гибким обобщением является машина Больцмана со стохастической сетевой архитектурой недетерминированных процессорных элементов и распределенным представлением знаний, математически соответствующим энергетической функции (рис. 4.11 *б*).

Общая идея релаксации состоит в том, что, опираясь на локальные взаимодействия, сеть сходится к какому-то состоянию равновесия. С помощью итеративной модификации локальных связей (например, путем стратегии обучения Хебба в случае системы Хопфилда) сеть как целое в конце концов релаксирует в устойчивое и оптимальное состояние. Можно сказать, что локальные взаимодействия приводят к кооперативному поиску, который не управляется, но самоорганизуется. Существуют сети, использу-

ющие стратегию кооперативного поиска для умственной деятельности, похожую, например, на поиск возможной гипотезы. Представьте, что определенный ряд конкурирующих гипотез представлен нейронными элементами, которые способны сами себя активировать или подавлять. При этом система переходит от менее вероятных гипотез к более вероятным гипотезам.

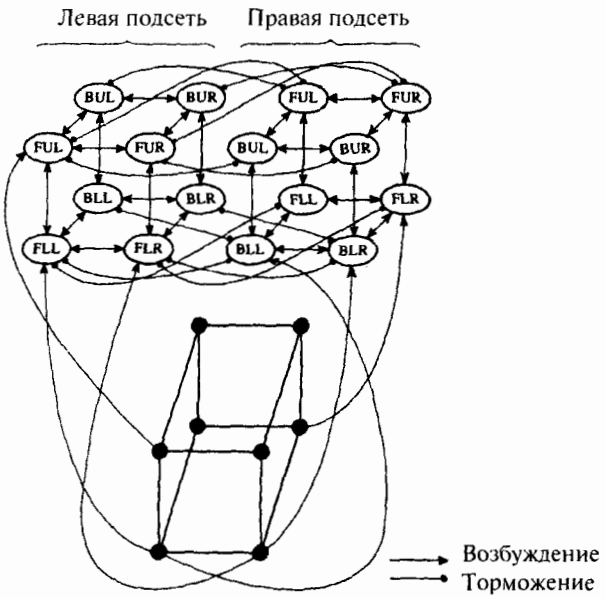
В 1986 г. Мак-Клеллан и Румельхарт использовали эту когнитивную интерпретацию для имитации распознавания амбивалентных рисунков — хорошо известной задачи *гештальтпсихологии*. На рис. 6.5 *а* показана сеть для кооперативного поиска, имитирующая распознавание одной из двух возможных ориентаций куба Некера. Каждый элемент есть гипотеза, касающаяся вершины куба Некера. Сокращенные обозначения таковы: B (задняя грань), F (передняя грань), L (левая грань), R (правая грань), U (верхняя грань), L (нижняя грань). Сеть гипотез состоит из двух взаимосвязанных подсетей, каждая из которых соответствует двум возможным интерпретациям.

Несовместимые и совместимые гипотезы соединены, соответственно, отрицательными и положительными связями. Веса подобраны так, что два отрицательных входных сигнала уравновешивают три положительных. У каждого элемента есть три положительно связанных соседа и два отрицательно связанных конкурента. Каждый элемент получает от раздражителя один положительный входной сигнал. Мы ищем такую подсеть гипотез, которая лучше всего подходит к входному сигналу. Малые начальные флуктуации (соответствующие мелким деталям индивидуального взгляда наблюдателя) могут определить ту ориентацию, которая будет наблюдаться через длительный период.

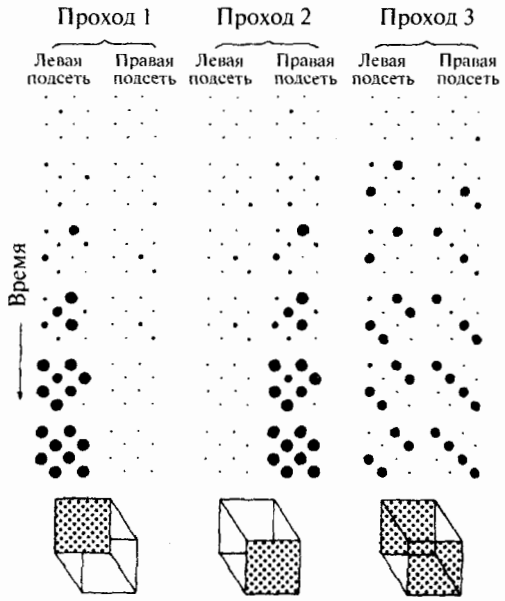
Чтобы наглядно представить динамику сети, предположим, что все элементы выключены. Затем один элемент принимает входной сигнал со случайно выбранным положительным значением. Сеть будет эволюционировать к состоянию, в котором все элементы одной субсети активированы, а все элементы другой субсети выключены. В рамках когнитивной интерпретации можно сказать, что система срелаксировала к одной из двух интерпретаций амбивалентного рисунка куба Некера либо с правой, либо с левой облицовкой.

На рис. 6.5 показаны три разные картины эволюции, существенно зависящие от разных начальных условий. Размер кружочков указывает на степень возбуждения каждого элемента. Во время третьего прохода достигается колеблющееся конечное состояние, находящееся, тем не менее, в равновесии [6.6]. Очевидно, архитектурные принципы такой сети — это совместное вычисление, распределенное представление и процедура релаксации, которые хорошо известны в динамике сложных систем.

В прошлом было предложено много моделей искусственных нейросетей. Они были вдохновлены исследователями в разных областях науки — физике, химии, биологии, психологии, а иногда просто техническими замыслами. Каковы же общие принципы подхода, основанного на теории сложности и синергетике? В предыдущих главах в качестве междисциплинарной методологии обращения со сложными системами была предложена синергетика. Представляется, что синергетика является успешной стратегией развития сверху вниз для построения конкретных моделей слож-



а)



б)

Рис. 6.5. Нейросеть, имитирующая распознавание одной из возможных ориентаций куба Некера (*а*); три картины эволюции (*б*) [6.6]

ных систем из общих принципов, подтвержденных во многих научных дисциплинах. Основная идея состоит в том, что возникновение глобальных состояний в сложных системах можно объяснить эволюцией (макроскопических) взаимодействий элементов системы в обучающих стратегиях вдали от теплового равновесия. Глобальные состояния порядка интерпретируются как аттракторы (неподвижные точки, периодические, квазипериодические или хаотические) в фазовом пространстве. Изменение типа аттрактора при вариации управляющего параметра при этом можно рассматривать как фазовый переход.

Например, распознавание образов интерпретируется как тип фазового перехода по аналогии с уравнениями эволюции, используемыми для возникновения структур в физике, химии и биологии. Возникает междисциплинарная программа исследований, которая должна позволить нам объяснить нейровычислительную самоорганизацию как естественное следствие физической, химической или нейробиологической эволюции на основе общих принципов. Как и в случае образования структур, конкретная структура образа (например, моделируемое лицо) описывается параметрами порядка, обладающими конкретным набором свойств.

Как только заданы некоторые свойства, принадлежащие параметру порядка (например, часть лица), этот параметр будет дополнять их другими свойствами, так что вся система действует как ассоциативная память (например, реконструкция сохраненного моделируемого лица по начально заданной части этого лица). Согласно принципу подчинения Хакена, свойства распознаваемого образа задают подчиненным подсистемам динамику в процессе образования структуры (рис. 6.6) [6.7].

Если заученная как прототип малая часть лица задана синергетическому компьютеру, то он может дополнить все лицо с закодированной фамилией (рис. 6.6 *б*). Последовательность более или менее расплывчатых картинок соответствует фазовому переходу состояний в синергетическом компьютере.

Когда нейронам предлагается неполный образ, начинается соревнование между различными нейронными состояниями, каждое из которых соответствует конкретному образу-прототипу. Это соревнование выигрывается полным состоянием нейронной системы, соответствующим тому образу-прототипу, на который больше всего похожа предложенная тестовая структура. В полной аналогии с динамикой, справедливой для образования структур, когда тестовый образ предлагается синергетическому компьютеру, он переводит его из начального состояния (при $t = 0$) в конкретное конечное состояние, соответствующее одному из образов-прототипов.

Эволюцию тестового образа можно отождествить с движением частицы с заданным вектором координаты в потенциальном ландшафте при наличии большого затухания. На рис. 6.6 *в* показан двумерный пример такого потенциала. Два прототипа соответствуют двум впадинам. Если предлагается образ, свойства которого не могут быть точно отождествлены со свойствами прототипов, то частица занимает положение вне впадин потенциального рельефа. Очевидно, что распознавание — это вид нарушения симметрии, который уже был проиллюстрирован на рис. 4.21 *а* для одномерного случая.

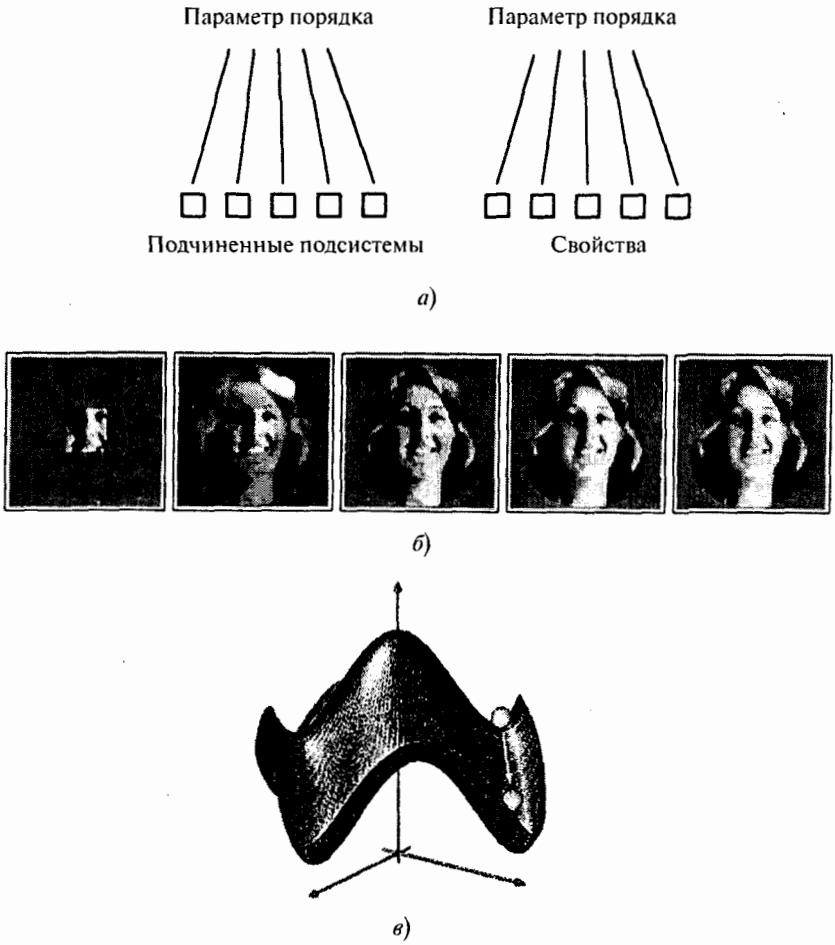


Рис. 6.6. Принцип подчинения Хакена для образования структур и распознавания образов (*а*); распознавание лица синергетическим компьютером с принципом подчинения (*б*) [6.7]; эволюция тестового образа (параметра порядка) в синергетическом компьютере, проиллюстрированная движением частицы в потенциальном ландшафте при наличии большого затухания (*в*) [6.7]

В синергетических системах форма потенциальной поверхности может меняться путем настройки управляющих параметров. Так как синергетические системы открыты, управляющие параметры могут представлять входные потоки энергии, материи, информации или другие стимулирующие воздействия от окружающей систему среды. Если величина управляющего параметра не превышает критического значения, в энергетическом рельефе может быть единственное устойчивое положение, единственная впадина, показанная пунктиром на рис. 4.21 *а*. После каждого возбуждения за счет флуктуаций параметр порядка релаксирует к состоянию покоя. Когда управляющий параметр превышает критическое значение, ранее устойчивое состояние становится неустойчивым и заменя-

ется двумя стабильными состояниями в двух впадинах (рис. 4.21 *а*).

Процедура обучения синергетического компьютера соответствует построению потенциального рельефа. Напряженности поля, наглядно изображаемые формой рельефа, указывают на синаптические силы нейронных связей. Преимуществом синергетического подхода является то, что огромное число микроскопических деталей, характеризующих образ (например, лицо), определяются единственным макроскопическим параметром порядка. Таким образом, синергетические компьютеры используют типичную редукцию сложности, уже применявшуюся в синергетических моделях естественной эволюции (см. разд. 3.3).

Уравнения для параметров порядка допускают новый тип (нехеббовского) обучения, а именно, стратегию минимизации числа синапсов. В противоположность нейрокомпьютерам типа спиновых стекол (например, системы Хопфилда), нейроны не являются пороговыми элементами, а осуществляют простые операции умножения и сложения. Но фундаментальное различие между нейрокомпьютерами типа спиновых стекол и синергетическими компьютерами состоит в следующем: сложные системы типа спиновых стекол являются физически замкнутыми. Поэтому образование структур в них управляется консервативной самоорганизацией без всякого поступления энергии, материи или информации извне. Типичные структуры, образованные в результате консервативной самоорганизации, это «мертвые» ледяные цветы на стеклах, которые замерзли в состоянии равновесия при низкой энергии и температуре. Фазовые переходы при консервативной самоорганизации можно полностью объяснить принципами равновесной термодинамики Больцмана.

В разд. 3.3 мы уже объясняли, что образование структур в живых системах возможно только при поступлении извне энергии, вещества или информации в состоянии вдали от теплового равновесия. Этот тип самоорганизации был назван «диссипативным» (Пригожин) или «синергетическим» (Хакен), но, тем не менее, и он может встречаться в процессах физической или химической эволюции. Следовательно, образование структур в человеческом мозге как в живой системе, чувствительно зависящей от влияния внешнего мира, обеспечит в рамках синергетики «кальки» или модели для новой компьютерной технологии. Нейрокомпьютеры типа спиновых стекол могут оказаться практичными и удобными для ряда технических целей. Однако, поскольку они являются физически закрытыми системами, они в принципе отличаются от того, что происходит в живых системах, в частности в человеческом мозге.

Процесс распознавания образов синергетическими компьютерами был одновременно сделан инвариантным по отношению к переносам, вращениям и изменениям масштаба. Эти свойства распознавания соответствуют реалистичным ситуациям. Например, лица не всегда задаются так же, как в фазе обучения, но их можно передвигать, вращать, увеличивать или уменьшать, приближать или удалять. Удачным приложением синергетических компьютеров является распознавание колебаний (например, амбивалентных картинок) и гистерезис в восприятии. На рис. 6.7 *а* показан хорошо известный пример гистерезиса. Когда начинают смотреть на образы слева направо, переход от лица мужчины к фигуре девушки происходит

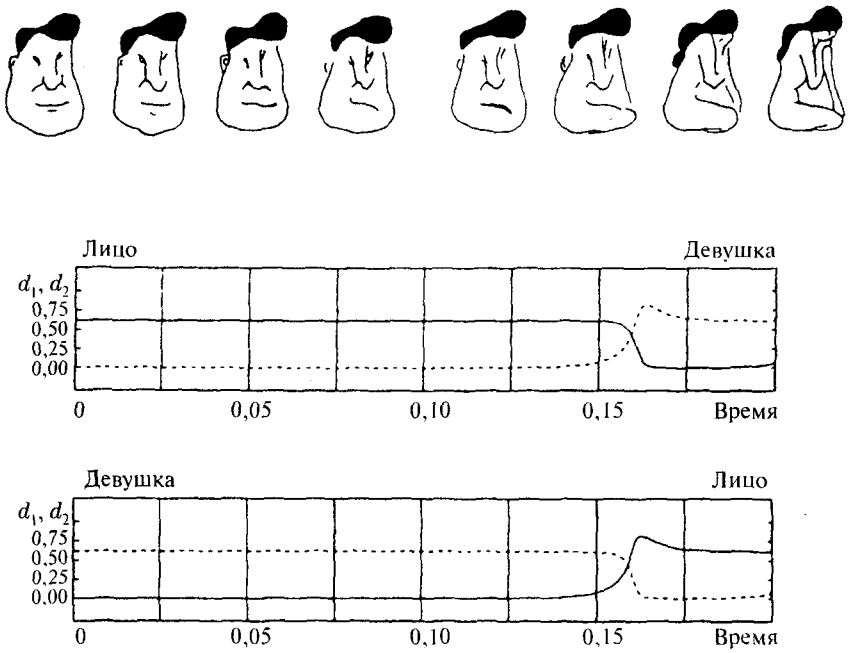


Рис. 6.7. Гистерезис в процессе распознавания синергетическим компьютером (*а*); в процессе эволюции во времени характерных параметров порядка (*б*)

только после примерно шести этапов. Если начать двигаться в противоположном направлении, переход от фигуры девушки к лицу мужчины происходит только вблизи левого края.

На рис. 6.7 *б* показан процесс восприятия синергетического компьютера в результате эволюции во времени характерных параметров порядка. Пунктирная линия соответствует интерпретации «девушка», сплошная линия — интерпретации «лицо». На первой диаграмме показан переход от восприятия мужского лица к восприятию фигуры девушки, на второй диаграмме — обратный переход от восприятия фигуры девушки к восприятию мужского лица [6.8].

Следует подчеркнуть, что до сих пор синергетические компьютеры вынуждены имитироваться традиционными последовательными компьютерами. Принципы синергетических компьютеров были реализованы только в области компьютерных программ, а не на уровне «железа». Однако синергетика с ее междисциплинарными приложениями приводит к материальным и техническим решениям. Так как лазер представляет собой хорошо понятную модель синергетики (см. разд. 2.4), он может играть существенную роль при построении оптического компьютера на основе синергетических принципов. В зависимости от критических значений порога, в лазере возникают различные моды. Их можно охарактеризовать числами фотонов. На микроскопическом уровне скорость изменения числа фотонов описывается нелинейным уравнением эволюции, зависящим от усиления, потерь и насыщения мод. На макроскопическом уровне параметры по-

рядка соответствуют амплитудам поля, характеризующим различные волновые пакеты (рис. 2.27 *а*, *б*).

Это наводит на мысль о трехслойной архитектуре со входным слоем данных, которые могут быть отображены на оптическую лазерную систему с использованием голографических отображений. Лазер с его параметрами порядка представляет промежуточный слой. С учетом своих мод лазер служит устройством, принимающим решение за счет самоорганизации. Та мода, которая выживает в смысле принципа подчинения, запускает новые множества свойств. Этот уровень задуман как выходной слой. Конечно, лазерная архитектура синергетических компьютеров должна быть подтверждена и уточнена экспериментами. Синергетический компьютер должен быть реальной диссипативной системой, находящейся вдали от теплового равновесия.

Очевидно, что сложные динамические системы полезны также для имитации когнитивного поведения и технических устройств. Человеческий мозг можно смоделировать как нелинейную сложную систему, динамика которой может определяться аттракторами различных типов. Например, было экспериментально подтверждено, что хаос может служить в качестве эффективного механизма восстановления мозга. После изучения обонятельной луковицы крыс было смоделировано распознавание разных запахов путем релаксации нейросети к циклическим асимптотическим состояниям. Во время выдоха возникало хаотическое состояние, устранявшее память о предыдущем запахе. Во время вдоха наличие конкретного запаха на входе вынуждало систему достигать соответствующего этому запаху предельного цикла.

Технические применения хаотичных состояний довольно интересны, так как хаотичные системы способны генерировать информацию. Хорошо известно, что хаотичные системы очень чувствительны к начальным условиям. Таким образом, в процессе динамической эволюции две траектории могут в какой-то момент времени существенно разойтись, даже если их начальные состояния очень мало отличались друг от друга. Так как всякое наблюдение возможно лишь с конечной точностью, могут существовать два различных состояния, различие между которыми меньше, чем наша разрешающая способность. В начальном состоянии наблюдатель может посчитать их одинаковыми. Но с течением времени хаотичная система позволяет различить те состояния, которые в начальный момент казались совпадающими.

На самом деле нейрокомпьютеры уже используются для технических приложений в ряде областей промышленности. Примерами могут служить робототехника, авиация и астронавтика (чувствительные и адаптивные системы, аэронавигация и т. д.), медицина (сбор и управление медицинскими данными, терапия, диагностика и т. д.), промышленное производство (контроль качества, оптимизация производства и т. д.), безопасные технологии, защита, технология связи, банки, почта и т. д. Основанный на теории сложности подход в технологии не следует рассматривать как конкурирующий или даже противоположный подход, по сравнению с классическим ИИ. При современном состоянии развития техники нейронные сети и классические системы ИИ, например экспертные системы, представляются полезными и используемыми в разных областях приложе-

ний. По-видимому, нейросети более удобны, чем классические системы ИИ, для анализа и распознавания сигналов, образов и речи, синтеза речи, сенсорномоторной координации у роботов и т. п. Очевидно, эти примеры нейронных сетей являются не отдельными компьютерами или роботами, а достаточно сложными функциями, которые с разными целями интегрированы в сложные системы. С антропоморфной точки зрения, те проблемы, которыми реально управляют нейронные сети, можно классифицировать как проблемы «низкого уровня».

Рассмотренные в разд. 5.3 дедуктивные модели, основанные на экспертных системах, подобных ИИ, оказались неудачными, так как с учетом точного и последовательно запрограммированного поведения этих моделей они оказались менее толерантны и гибки, чем необходимо во многих приложениях. В противоположность экспертным системам и инженерии знаний [3], сложные процессы самоорганизации невозможно контролировать путем явной формулировки экспертных знаний. С другой стороны, основанные на правилах системы с дедуктивными алгоритмами успешно используются во всех логически структурированных задачах. По сравнению, например, с сенсорномоторной координацией, логическое программирование кажется примером знания «высокого уровня». Тем не менее проблемы низкого уровня в системах нелинейной динамики могут обладать невероятно большой сложностью. Как мы видели в предыдущих главах, нелинейные сложные системы, конечно, не ограничены знаниями низкого уровня. Представляется, что принципы теории сложности вполне подходят для моделирования функций высокого уровня человеческого мозга — понятий, мыслей, самосоотносимых состояний и пр. Однако технология нейронных сетей все еще находится в младенческой стадии.

Для специальных задач современной и будущей технологии представляют интерес гетерогенные системы с различными модулями, основанными и на правилах, и на сложных динамических системах. Система понимания речи может состоять из нейронной сети, осуществляющей распознавание речи, и основанной на правилах символическом модуле для синтаксического и семантического анализа. Гибридные системы объединяют дедуктивные и динамические технологии, которые могут быть полезны для различных медицинских целей. Например, представьте систему, способную с помощью нейронных сетей распознавать и контролировать медицинские параметры и скомбинированную с основанной на правилах дедуктивной системой для диагностики конкретного заболевания по распознанным данным. Как сама природа, инженер не должен догматически ограничиваться одной «оптимальной» стратегией, а должен искать содержательные решения, в конце концов несколько решений, которые могут быть объединены, но которые не обязаны быть наилучшими из возможных.

6.2. Клеточные нейронные сети и аналоговые нейрокомпьютеры

Понятие синергетики, включающее «кооперативные явления» и «принцип подчинения» Хакена, ведет начало

[3] Область ИИ, связанная с разработкой экспертных систем и баз знаний. — *Прим. пер.*

от статистической, квантовой и лазерной физики. В электротехнике, информатике и компьютерных науках понятие *клеточной нейронной сети* (КНС) стало недавно очень важным в исследованиях сложности и было реализовано в информационной технологии и производстве микросхем [6.9]. Создание КНС стало возможным благодаря сенсорной революции конца 1990-х гг. Дешевые сенсорные и МЭМС (микроэлектро-механическая система) цепи распространились по всем техническим инфраструктурам и в окружающей человека среде. *Они стали популярны* в качестве искусственных глаз, носов, ушей, языков и соматосенсорных устройств. Было обработано невероятное количество общих аналоговых сигналов. Таким образом, требуется новый тип технологии микросхем, аналогичный обработке сигналов в природных организмах. Техническим ответом на сенсорную революцию стали аналоговые клеточные компьютеры, имитирующие анатомию и физиологию сенсорных и исполнительных органов. Их сердцевиной является КНС-чип, так как он представляет последовательность аналоговых динамических процессоров или клеток.

КНС была изобретена Леоном Чуа и Лином Янгом из Беркли в 1988 г. [6.10]. Основная идея, на которой основана парадигма КНС, — это так называемый *принцип локальной активности*, введенный Чуа, утверждающий, что в любой однородной среде при отсутствии локальной активности не может возникнуть никаких сложных явлений. Очевидно, что локальная активность является фундаментальным свойством в микроэлектронике. Например, вакуумные трубки и, позднее, транзисторы стали локально активными устройствами в электронных цепях радиоприемников, телевизоров и компьютеров. Требование локальной активности в нейронных сетях было мотивировано практическими нуждами технологии. В 1985 г. Хопфилд предложил теоретическую *нейронную сеть, которая, в принципе*, могла преодолеть недостатки распознавания образов в перцептроне Розенблатта. Но ее глобально связанная архитектура была крайне непрактична для технических приложений в микроэлектронике СБИС (сверхбольших интегральных схем): число связей в полностью связанной (каждый нейрон с каждым) сети Хопфилда увеличивается квадратично с ростом числа элементов цепи. КНС требует только электрических соединений в ограниченной сфере влияния [6.11]. Невероятный рост скорости счета вместе с существенно меньшей электрической мощностью в первых чипах КНС привели к интенсивной исследовательской деятельности в области КНС, не прекращающейся со времени предложения Чуа и Янга в 1988 г.

В общем случае КНС есть нелинейная аналоговая цепь, обрабатывающая сигналы в реальном времени. Это многокомпонентная система упорядоченных в пространстве тождественных («клонированных») элементов, называемых клетками, которые сообщаются непосредственно друг с другом только через ближайших соседей. Однако локальность прямых соединений позволяет осуществлять глобальную обработку информации. Связь между удаленно связанными элементами достигается через другие элементы. Мысль о том, что сложные и глобальные явления могут возникать в результате локальной активности в сети, восходит к ранней парадигме *клеточных автоматов* (КА) Джона фон Неймана. В этом смысле па-

радигма КНС есть развитие парадигмы КА в новых условиях обработки информации и технологии микросхем. В противоположность обычным клеточным автоматам, главный процессор КНС принимает и генерирует аналоговые сигналы непрерывно во времени, используя действительные числа в качестве взаимодействующих значений. Но на самом деле дискретность КА не представляет принципиальной разницы для КНС. Можно ввести непрерывные клеточные автоматы (НКА) как обобщение КА, в котором каждая клетка не просто, например, белая или черная, а может обладать любым оттенком из непрерывного интервала серого. Возможное правило для НКС может состоять в том, чтобы новый серый оттенок каждой клетки был бы средним ее собственного серого оттенка и оттенка непосредственных соседей. Оказывается, что в непрерывных клеточных автоматах простые правила взаимодействия могут порождать образы возрастающей сложности, хаос и случайность, которые по существу не слишком отличаются от поведения дискретных КА. Таким образом, они полезны для аппроксимации динамики систем, определяемых дифференциальными уравнениями в частных производных (ДУЧП).

В рамках парадигмы КНС язык генной технологии и нейробиологии позволяет метафорически иллюстрировать понятия, которые, тем не менее, математически определены и технически реализованы. Согласно господствующим сейчас парадигмам наук о жизни, биологический язык позволяет быть посредником в передаче представлений о будущих связях между био- и компьютерными технологиями. Математически КНС определяется, во-первых, как пространственно дискретное множество непрерывных нелинейных динамических систем («клеток» или «нейронов»), причем информация в каждой клетке обрабатывается с помощью задания трех независимых переменных («входной сигнал», «порог» и «начальное состояние»); во-вторых, задан закон взаимодействия, связывающий соответствующие переменные в каждой клетке со всеми соседними клетками внутри заранее допустимой сферы влияния. Стандартная архитектура КНС включает прямоугольный массив $M \times N$ клеток $C(i, j)$ с декартовыми координатами (i, j), где $i = 1, 2, \ldots, M$ и $j = 1, 2, \ldots, N$ (рис. 6.8 *а*). На рис. 6.8 *б*, *в*

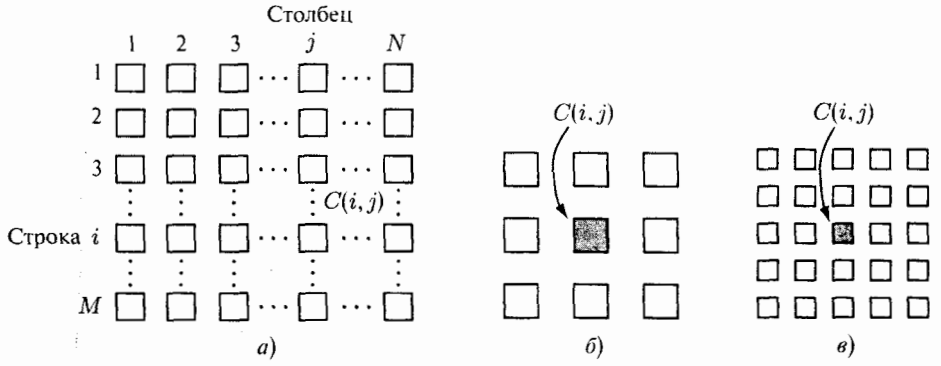


Рис. 6.8. Стандартная КНС, представляющая массив клеток (*а*); окрестности с 3×3 и 5×5 соседями (*б*, *в*) [6.12]

приведены примеры клеточных областей влияния в виде 3×3 и 5×5 ближайших соседей. Динамика клеточного состояния определяется нелинейным дифференциальным уравнением (уравнением состояния КНС) со скалярами x_{ij} для «состояния», y_{ij} для «выхода», u_{ij} для «входа», z_{ij} для «порога» и коэффициентами, называемыми «синаптическими весами», которые моделируют интенсивность синаптических связей клетки $C(i, j)$ с входными сигналами прямой связи и выходными сигналами обратной связи соседних клеток $C(k, l)$. Выходное уравнение КНС связывает состояния клетки с выходными сигналами.

Большинство приложений КНС используют пространственно инвариантные стандартные КНС с клеточным окружением из 3×3 клеток и с неизменными синаптическими весами и клеточными порогами в клеточном пространстве. Сфера влияния 3×3 в каждом узле решетки содержит девять клеток с одной клеткой в центре узла и восемью соседними клетками. В этом случае вклады весов выходных сигналов обратной связи и входных сигналов прямой связи можно свести к двум фиксированным матрицам 3×3, носящим название *клонирующего эталона обратной связи* $\mathbf{A}$ (или выходного клонирующего эталона) и *клонирующего эталона прямой связи* $\mathbf{B}$ (или входного клонирующего эталона). Таким образом, каждая КНС однозначно определяется двумя клонирующими эталонами $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ и порогом z, что соответствует $3 \times 3 + 3 \times 3 + 1 = 19$ действительным числам. Они могут быть упорядочены как строка из 19 скаляров с постоянным порогом, девятью синаптическими весами прямой связи и девятью синаптическими весами обратной связи. Такая строка называется *геном КНС*, так как она полностью определяет динамику КНС.

Если говорить о вычислениях с использованием графики, тройка ($\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, z) с ее 19 действительными числами может рассматриваться как макроинструкция КНС по преобразованию входного образа в выходной образ. Простыми примерами являются подклассы КНС, имеющие практическое значение, например, класс $C(\mathbf{A}, \mathbf{B}, z)$ пространственно инвариантных КНС с возбуждающими и ингибиторными синаптическими весами; класс $C(0, \mathbf{B}, z)$ КНС с нулевой обратной связью (прямой связью), в котором отсутствует клеточная обратная связь; класс $C(\mathbf{A}, 0, z)$ КНС с нулевым входом (автономный класс), в котором нет клеточного входа; наконец, невзаимодействующий класс $C(\mathbf{A}^0, \mathbf{B}, z)$ КНС, в котором нет взаимодействия между клетками. В клонирующем эталоне $\mathbf{A}^0$ все веса равны нулю за исключением веса клетки в центре матрицы. Их поток сигнала и системную структуру можно иллюстрировать диаграммами, которые легко использовать как для электронных цепей, так и для типичных живых нейронов.

Эталоны КНС необычайно полезны для установления стандартов вычислений с использованием графики. Простыми примерами могут служить КНС, определяющие границы как двоичных (черно-белых), так и серых входных образов. Сам образ состоит из пикселей, соответствующих ячейкам КНС с двоичной или серой шкалой. КНС *EDGE* является примером класса с нулевой обратной связью $C(0, \mathbf{B}, z)$ с двоичными эталонами определения границ:

$$\mathbf{A} = \begin{array}{|c|c|c|}\hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array}, \quad \mathbf{B} = \begin{array}{|c|c|c|}\hline -1 & -1 & -1 \\ \hline -1 & 8 & -1 \\ \hline -1 & -1 & -1 \\ \hline \end{array},$$

$$z = \boxed{-1}.$$

Входным сигналом является статичный двоичный образ из черных пикселей. Начальное состояние произвольно (например, нуль). Граничные условия (например, нулевые) определяют входные и выходные сигналы так называемых виртуальных клеток, принадлежащих матрице 3×3 ближайших соседей, но находящихся вне решетки КНС. Выходной сигнал должен представлять двоичный образ, показывающий черным цветом все границы. Эталон КНС *EDGE* создан для корректной работы только с двоичными входными образами. Если входной образ содержит оттенки серого цвета, то выходной образ в общем случае будет серого цвета с черными пикселями, соответствующими резким границам, почти черными пикселями, соответствующими размытым краям и почти белыми пикселями, соответствующими шуму. Локальные правила, генерирующие изображение границ образа по заданному входному образу, таковы:

(1) белый пиксель → белый, независимо от ближайших соседей;

(2) черный пиксель → белый, если все ближайшие соседи черные;

(3) черный пиксель → черный, если по крайней мере один ближайший сосед белый;

(4) черный, серый или белый пиксель → серый, если ближайшие соседи серые.

Чтобы скомбинировать эталоны КНС для вычислений с использованием графики, можно с помощью простых эталонов реализовать логические операторы. Операция логического NOT в КНС инвертирует интенсивности всех двоичных пикселей изображения, так что пиксели переднего плана превращаются в пиксели заднего плана и наоборот. Операция логического AND (соответственно, логического OR) осуществляет пиксельную логическую операцию AND (соответственно, логическую операцию OR) над соответствующими элементами двух двоичных образов. Эти операции можно использовать как элементы некоторого алгоритма булевой логики, действующего параллельно на упорядоченные в форме образов данные.

Анализ КНС для вычислений с использованием графики осуществляется с помощью стандартной последовательности шагов. На первом шаге (I) дается неформальное полностью на уровне образов описание преобразования входного образа в выходной. На следующем шаге (II) с помощью локальных правил формулируется точный рецепт того, как входные пиксели преобразуются в выходные. Эти локальные правила должны быть полны в том смысле, что каждый выходной пиксель может быть однозначно определен путем применения этих правил к состоянию и входному значению всех пикселей внутри локальной сферы влияния. Затем (III) приводится несколько примеров, включающих:

а) входную картину и начальное состояние;

б) несколько последовательных мгновенных снимков, пока за короткое время установления не достигается статичный выходной образ или

в) в специальных представляющих интерес точках на выходном образе возникает временна́я волна состояния и выходного сигнала.

Наконец, осуществляется математический анализ, во время которого дается строго математическое доказательство каждого локального правила. Если доказательство невозможно, предлагается интуитивный набросок

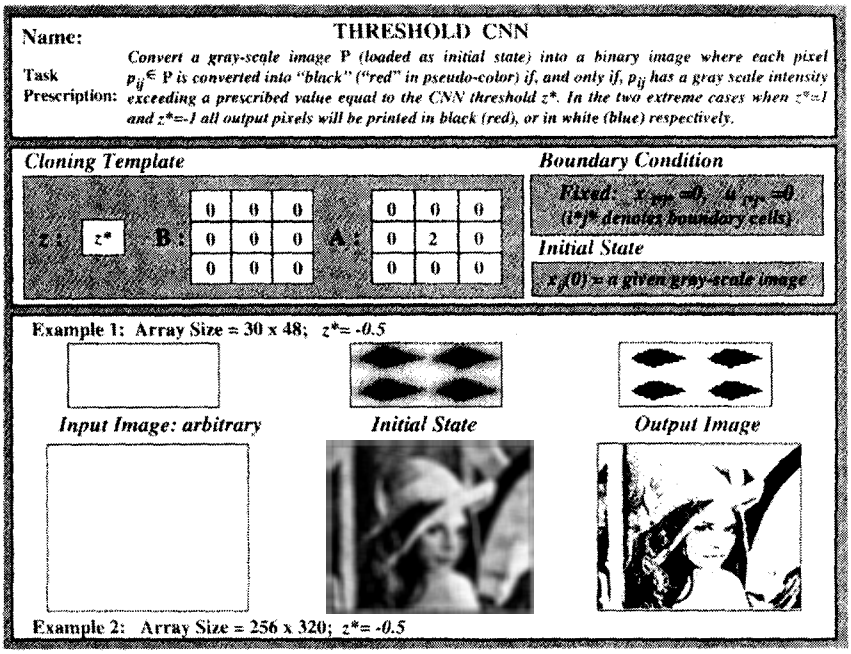


Рис. 6.9. Галерея образов КНС *THRESHOLD* [6.14]

доказательства с различными численными примерами. В результате стандартным образом вводится галерея эталонов КНС с целью проиллюстрировать новую парадигму принятия решений в вычислениях с использованием графики. Примером может служить КНС *THRESHOLD*, конвертирующая серое изображение молодой девушки в двоичное изображение, зависящее от заданного порога интенсивности серого цвета (рис. 6.9).

Простейшую форму КНС можно охарактеризовать булевыми функциями. Рассмотрим пространственно инвариантную двоичную КНС, принадлежащую неспаренному классу $C(\mathbf{A}^0, \mathbf{B}, z)$ с 3×3 соседями, отображающую любой статический 3×3 входной образ в статический двоичный 3×3 выходной образ. Она может быть однозначно определена булевой функцией девяти двоичных входных переменных, где каждая переменная обозначает один из девяти пикселей внутри сферы влияния клетки. Хотя существует бесконечно много различных эталонов класса $C(\mathbf{A}^0, \mathbf{B}, z)$, есть только конечное число различных комбинаций 3×3 структур белых и черных клеток, равное $2^9 = 512$. Так как каждая двоичная девятка входного образа может отобразиться либо в 0 (белый), либо в 1 (черный), существует 2^{512} различных булевых отображений девятки двоичных переменных. Таким образом, каждая двоичная стандартная КНС может быть однозначно охарактеризована таблицей истинности КНС, содержащей: 512 строк, по одной на каждый различный 3×3 черно-белый образ; девять входных столбцов, по одному на каждый двоичный входной образ; один выходной столбец с двоичными значениями выходной переменной.

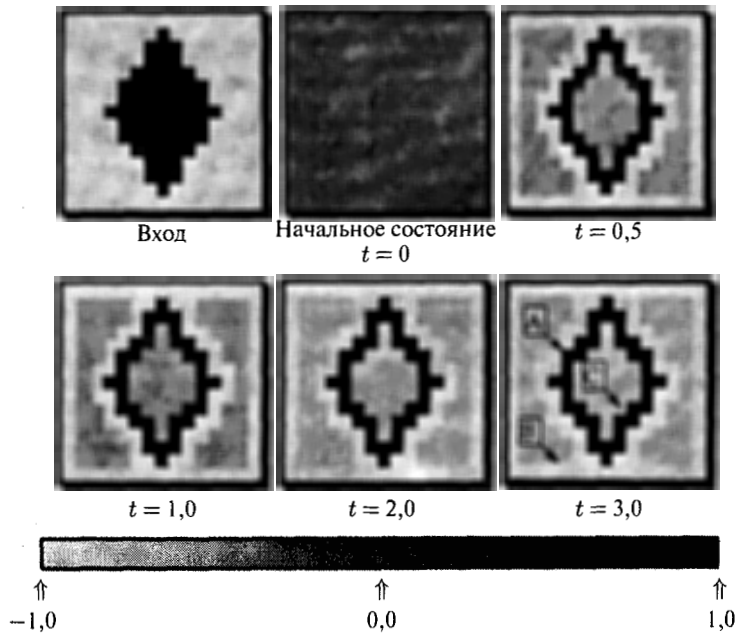


Рис. 6.10. Мгновенные снимки распознавания образа КНС *EDGE* [6.13]

Например, рассмотрим таблицу истинности КНС *EDGE* (рис. 6.10). Так как таблица из 512 строк будет превышать размеры страницы этой книги, мы разделили ее на 16 таблиц истинности с 32 строками (рис. 6.11). По соглашению, столбец 5 каждой таблицы истинности обозначает вход клетки в центре окрестности размером 3 × 3. Согласно вышеприведенным локальным правилам КНС *EDGE*, белая клетка остается белой вне зависимости от своих соседей. Таким образом, так как в 16 таблицах истинности первые 16 клеток в 5 столбце белые, соответствующая выходная клетка в последнем столбце также белая. Согласно локальным правилам, черная клетка остается черной, если хотя бы одна ближайшая соседняя клетка черная, но она становится белой, если все ее ближайшие соседи черные. Так как клетки в пятом столбце таблицы истинности в строках от 17 до 32 черные, соответствующие выходные клетки в последнем столбце остаются черными, за исключением последней строки, где все ближайшие соседи черные.

Так как черно-белые структуры 16 таблиц истинности остаются во многих частях неизменными, достаточно рассмотреть последние 16 столбцов из 32 клеток. В результате мы получаем минимальную 16 × 32 таблицу истинности КНС *EDGE* (рис. 6.12). Таблица истинности для любой двоичной КНС $C(\mathbf{A}^0, \mathbf{B}, z)$ с предписанным начальным состоянием может быть построена простым решением соответствующих дифференциальных уравнений для входного образа каждой из 512 определенных двоичных структур и вычислением соответствующих двоичных выходных образов. Кроме того, легко написать компьютерную

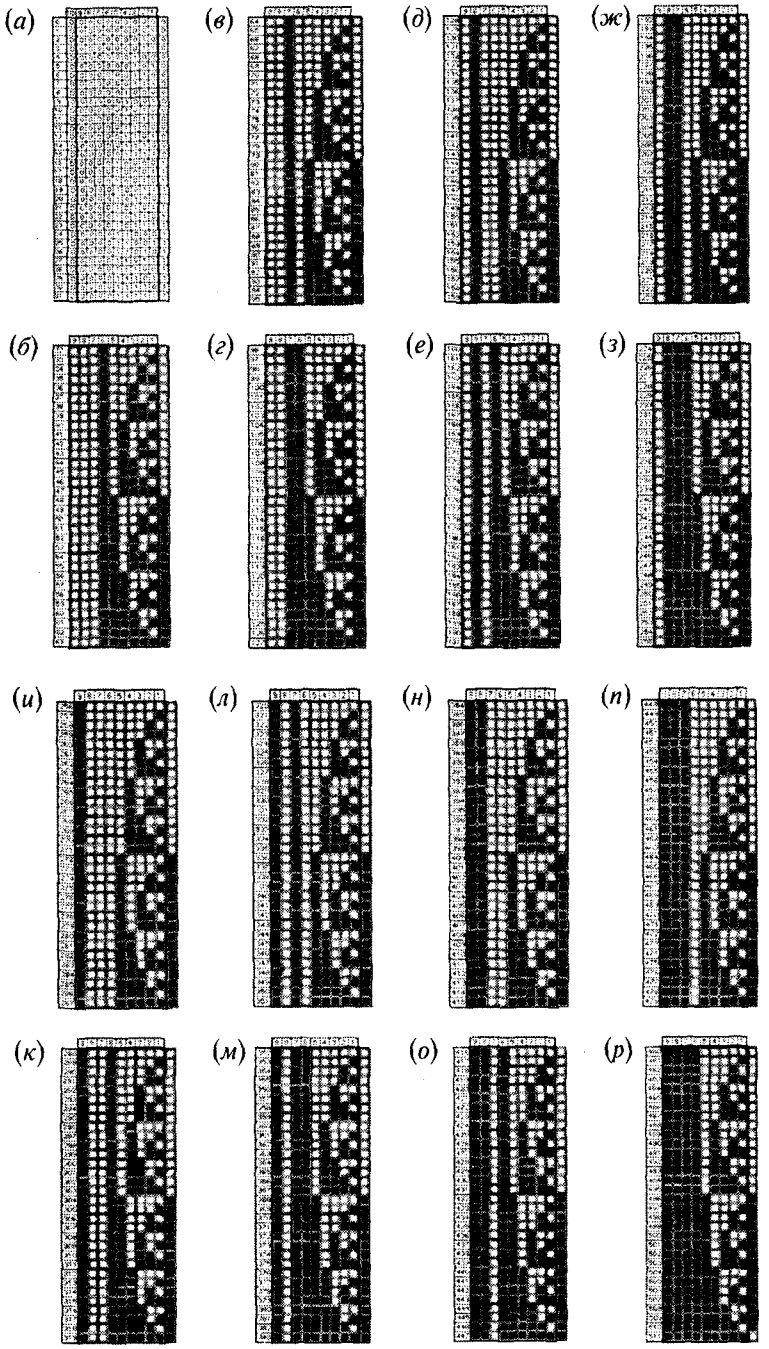


Рис. 6.11. Таблицы истинности для КНС *EDGE* [6.15]

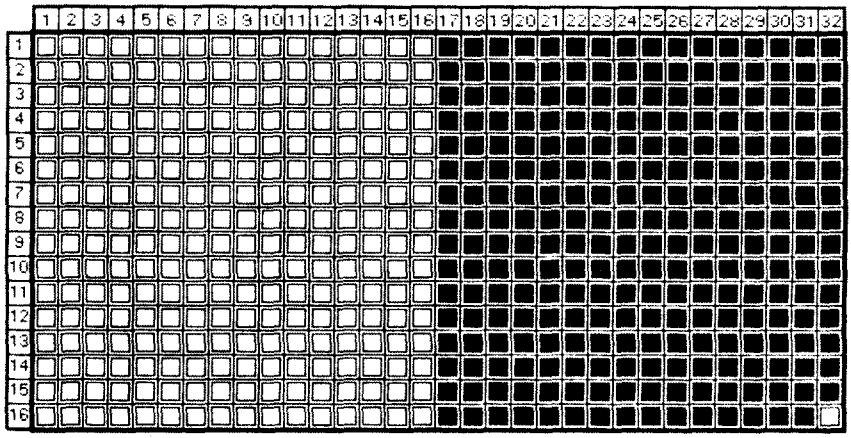


Рис. 6.12. Минимальная таблица истинности КНС [6.16]

программу, автоматически генерирующую отвечающую таким условиям таблицу истинности. Так как в этих таблицах истинности содержится много избыточной информации в оставшихся неизменными структурах, в общем случае достаточно рассмотреть только последний столбец выходных образов. В результате для характеристики неспаренных КНС можно использовать минимальную таблицу истинности КНС с колоссальным сжатием данных (рис. 6.12).

Число 2^{512} различных булевых функций девяти переменных является гигантским, и если учесть, что $2^{512} \approx 1{,}3408 \cdot 10^{154} > 10^{154}$, получается, что это число превышает число атомов во Вселенной. Неспаренные КНС $C(\mathbf{A}^0, \mathbf{B}, z)$ представляют лишь малый подкласс КНС. Поэтому возникает вопрос: какой подкласс булевых функций точно характеризует неспаренные КНС? В разд. 6.1 мы ввели понятие линейно разделимых и неразделимых булевых функций. Примером неразделимой булевой функции является функция XOR (рис. 6.1 *а*). Можно доказать, что класс $C(\mathbf{A}^0, \mathbf{B}, z)$ всех спаренных КНС с двоичными входами и двоичными выходами тождествен линейно разделимому классу булевых функций. Таким образом, линейные неразделимые булевы функции, такие как функция XOR, не могут быть реализованы неспаренной КНС. Однако неспаренные КНС можно использовать как элементарные строительные блоки, связанные КНС логических операций. Можно доказать, что каждая булева функция девяти переменных может быть реализована с помощью неспаренных КНС с девятью входами и либо одной КНС логическое OR, либо одной КНС логическое AND, в дополнение к одной КНС логическое NOT.

Каждая неспаренная КНС $C(\mathbf{A}^0, \mathbf{B}, z)$ со статическими двоичными входами полностью устойчива в том смысле, что любая конфигурация клеток сходится к точке равновесия. Волновая форма состояния КНС монотонно растет или уменьшается в сторону точки равновесия, если состояние в этой точке положительно или отрицательно. Кроме того, за исключением нескольких вырожденных случаев, выходное решение в виде устойчивого состояния может быть явно рас-

считано по алгебраической формуле без решения соответствующих нелинейных дифференциальных уравнений. Очевидно, это важный результат, характеризующий класс КНС нелинейной динамики с устойчивыми к ошибкам КНС эталонами. Полностью устойчивые КНС являются рабочими лошадками для большинства современных приложений КНС. Но существуют даже простые КНС с колебательным или хаотическим поведением. Будущие приложения будут использовать огромный потенциал неисследованных областей колебательных и хаотических рабочих областей. И тогда Клеточные Нейронные Сети превратятся на самом деле в Клеточные Нелинейные Сети со всеми типами фазовых переходов и аттракторов нелинейной динамики.

Колебательная КНС всего с двумя клетками задается шаблонами

$$\mathbf{A} = \begin{array}{|c|c|c|}\hline 0 & 0 & 0 \\ \hline \beta & \alpha & -\beta \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array}, \quad \mathbf{B} = \begin{array}{|c|c|c|}\hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array},$$

$$z = \boxed{0}$$

и нулевыми граничными условиями. На рис. 6.13 *а* показана архитектура КНС 1 × 2 с виртуальными граничными клетками (серый цвет) нулевого потенциала, а на рис. 6.13 *б* — соответствующий граф потока сигнала.

Уравнения состояния для двух клеток этой КНС задаются двумя дифференциальными уравнениями

$$\dot{x}_1 = -x_1 + \alpha y_1 - \beta y_2,$$
$$\dot{x}_2 = -x_2 + \alpha y_2 - \beta y_1.$$

Соответствующие выходные сигналы y_i $(i = 1, 2)$ связаны с состояниями x_i стандартной нелинейной функцией

$$y_i = f(x_i) = 0{,}5|x_i + 1| - 0{,}5|x_i - 1|$$

с кусочно-линейной характеристикой.

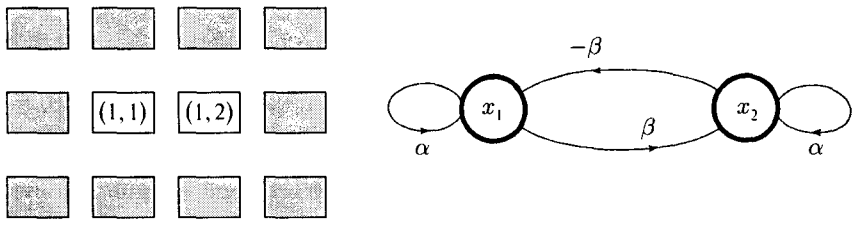
На рис. 6.14 *а, б* показаны соответствующие временны́е ряды $x_1(t)$ и $x_2(t)$ для случая $\alpha = 2$, $\beta = 2$ и начального условия $x_1(0) = 0{,}1$, $x_2(0) = 0{,}1$. В соответствующем фазовом пространстве (рис. 6.14 *в*) все траектории, начинающиеся из любого начального состояния за исключением начала координат, будут сходиться к предельному циклу.

Хаотическая КНС лишь с двумя клетками задается шаблонами

$$\mathbf{A} = \begin{array}{|c|c|c|}\hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 1{,}2 & 2 & -1{,}2 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array}, \quad \mathbf{B} = \begin{array}{|c|c|c|}\hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array},$$

$$z = \boxed{0}$$

и нулевыми граничными условиями. В противоположность рассмотренному выше примеру, КНС должна быть



а) *б)*

Рис. 6.13. КНС 1 × 2 с (серыми) виртуальными граничными клетками (*а*); граф потока сигнала (*б*) [6.17]

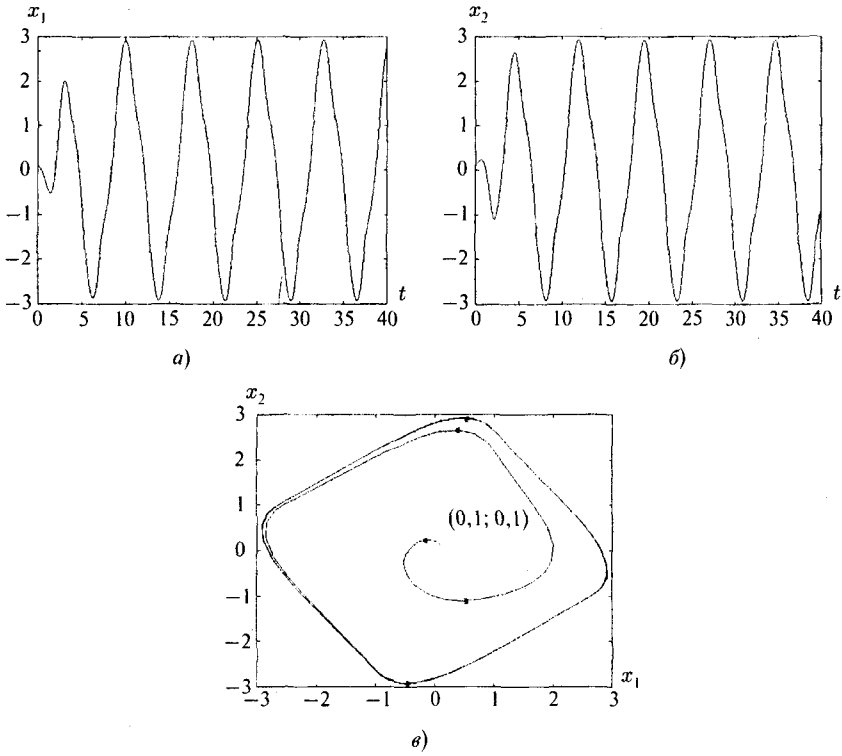


Рис. 6.14. Периодические временны́е ряды (*а*, *б*) и предельный цикл КНС 1 × 2 (*в*) [6.18]

неавтономна с синусоидальным входным сигналом

$$u_{11}(t) = 4{,}04 \sin\left(\frac{\pi t}{2}\right)$$

в клетку $C(1, 1)$ и нулевым входным сигналом $u_{12} = 0$ в клетку $C(1, 2)$ (рис. 6.8 *а*). С технической точки зрения, цепь двухклеточной КНС запускается синусоидальным сигналом. Уравнения состояния представляют собой два нелинейных дифференциальных уравнения

$$\dot{x}_1 = -x_1 + 2y_1 - 1{,}2y_2 + 4{,}04 \sin\left(\frac{\pi t}{2}\right),$$

$$\dot{x}_2 = -x_2 + 1{,}2y_2 - 2y_2$$

с выходной функцией $y_i = f(x_i)$ предыдущей КНС. Соответствующие непериодические временны́е ряды $x_1(t)$ и $x_2(t)$ показаны на рис. 6.15 *а*, *б* с теми же начальными условиями, как и в предыдущем примере. В соответствующем фазовом пространстве (рис. 6.15 *в*) траектории притягиваются странным аттрактором, носящим название «Дамская туфелька», так как его сечение Пуанкаре (рис. 6.15 *г*) напоминает форму дамской туфельки на высоком каблуке.

С точки зрения нелинейной динамики, удобно рассматривать уравнения состояния стандартной КНС как множество обыкновенных дифференциальных уравнений, а компоненты КНС-гена – как параметры бифуркации. Затем можно детально изучить динамическое поведение стандартных КНС. Численные примеры демонстрируют КНС с предельными

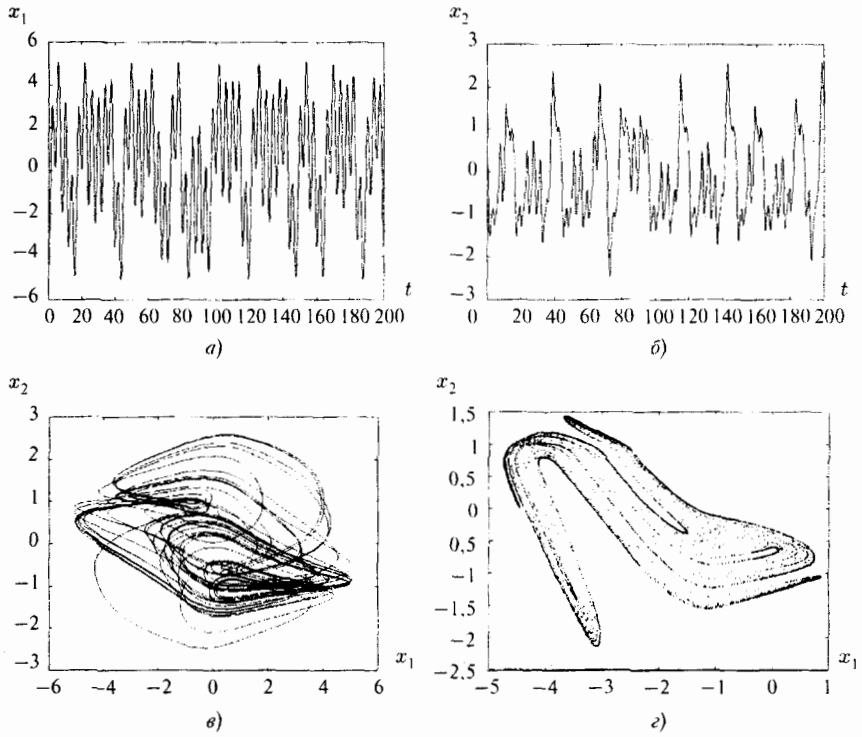


Рис. 6.15. *Непериодические* временны́е ряды (*а*, *б*), проекция хаотического аттрактора (*в*) и его сечение Пуанкаре (*г*) КНС 1 × 2

циклами и хаотическими аттракторами. В технических приложениях стандартных КНС типа кремниевых чипов, чтобы избежать колебательных, хаотических и шумовых явлений, должны быть полностью выполнены критерии устойчивости. Эти результаты также имеют практическое значение в приложениях, связанных с обработкой изображений с помощью КНС. Так как мозг и компьютеры работают с элементами, находящимися в двух определенных состояниях, при исследовании как мозга, так и технологии производства чипов изучаются условия бистабильности[4)].

[4)] Бистабильность – наличие двух устойчивых состояний в исследуемой системе. – *Прим. ред.*

Возникновение сложных структур в природе можно объяснить нелинейной динамикой и аттракторами сложных систем. Они возникают в результате коллективного поведения взаимодействующих элементов. Различные парадигмы исследований сложности обещают с помощью своих специфических закономерностей объяснить формирование рисунка и распознавание образов в природе. С точки зрения КНС удобно изучать подкласс автономных КНС, клетки которых не имеют входов. Эти системы могут объяснить, как структуры возникают, эволюционируют и иногда сходятся к равновесию за счет процессов диффузии. Формирование структуры начинается с начальной однородной струк-

туры в состоянии неустойчивого равновесия, которая возмущается малыми случайными смещениями. Следовательно, в начальном состоянии симметрия неустойчивого равновесия нарушается, приводя к довольно сложным структурам. Очевидно, что в этих приложениях клеточные сети относятся не только к активности нейронов в нервных системах, но и к формированию рисунка в целом. Таким образом, аббревиатура КНС понимается в наши дни как «Клеточная Нелинейная Сеть».

КНС определяется уравнениями состояния изолированных клеток и законами взаимодействия клеток. Для моделирования процессов диффузии закон взаимодействия описывает дискретный вариант диффузии (с дискретным оператором Лапласа). Для определения динамики автономных КНС уравнения состояния КНС можно объединить с законами взаимодействия КНС в диффузионное уравнение КНС. Если заменить дискретные функции и операторы на их непрерывные пределы, то получатся хорошо известные непрерывные дифференциальные уравнения в частных производных для процессов диффузии, изучавшиеся в парадигмах сложности, например, в неравновесной термодинамике Пригожина и синергетике Хакена. Вариант КНС уравнения диффузии Чуа предоставляет компьютерные модели формирования рисунков в химии и биологии (например, концентрические и спиральные волны). С другой стороны, многие подходящие уравнения КНС можно связывать с любым нелинейным уравнением в частных производных. Во многих случаях для понимания нелинейной динамики сложных систем достаточно изучить компьютерные модели соответствующих уравнений КНС. Иногда автономные КНС (типа цифровых клеточных автоматов) являются единственными рассматриваемыми приближениями нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных для практических целей компьютерного моделирования. Однако, как утверждает Чуа, нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных являются предельными формами автономных КНС. Таким образом, только подкласс КНС имеет предельное представление в виде дифференциальных уравнений в частных производных. Короче говоря, парадигма сложности КНС есть нечто большее, чем общепринятый подход на языке дифференциальных уравнений.

Распознавание образов понимается в связи с формированием рисунков. Парные КНС с линейными синаптическими весами открывают простор для значительно более богатых визуальных компьютерных приложений, чем неспаренные КНС. В парных КНС имеются связи между выходными сигналами окружающих клеток и клеткой в центре. Таким образом, по крайней мере один элемент обратного (выходного) эталона **A** (отличающегося от коэффициента у клетки в центре) не равен нулю. Парные КНС способны, например, определять дырки (т. е. множество соседних пикселей) на окружающем фоне. В частности, оказывается, что знаменитая проблема связности может быть решена простой парной КНС такого рода. Эта проблема не только важна по практическим причинам, но имеет долгую традицию в истории когнитивной науки. Как мы можем распознать связанные структуры («образы»), подобные формам, фигурам или лицам, состоящим из множества пикселей? В знаменитом до-

казательстве Марвин Минский показал, что связность отдельных структур не может быть распознана нейронными сетями типа перцептрона Розенблатта.

В рамках парадигмы КНС клеточные нейронные сети (КНС) работают при специальном предположении о локальной активности. Каким образом локально связанная нейронная сеть может реализовать глобальные функции и распознавать «образ»? Стратегия КНС заключается в том, чтобы уничтожать все пиксели, являющиеся частью связного объекта, определенного черными пикселями на белом фоне. Интуитивная идея состоит в том, что в сложном изображении связные части пикселей выгорают, как при распространении огня по кустарнику. В случае связной структуры (например, лабиринта) последнее изображение получившейся структуры ничего не содержит, как выгоревшая земля. В других случаях несвязанные пиксели остаются как избежавшие огня отдельные кусты (рис. 6.16). С точки зрения принципа локальной активности, волновой фронт огня распространяется от пикселей к соседним пикселям и «детектирует» кластеры связанных пикселей.

КНС такого типа также используются для изучения нелинейных волн распространения явлений (например, смоделированное компьютером распространение инфекционных заболеваний). Что касается проблемы Минского в отношении перцептрона Розенблатта, можно доказать, что глобальное свойство связанности может быть реализовано соответствующей КНС для любой двоичной входящей структуры. Соответствующие спаренные КНС способны моделировать зрительные иллюзии, когда некоторые изображения могут восприниматься неоднозначно в зависимости от начальной мысли или намерения (рис. 4.22). Одним из примеров такого явления является иллюзия лицо—ваза, когда изображение можно интерпретировать либо как два симметричных лица, либо как вазу. Начальное внимание привлекается путем установления с помощью второй двоичной структу-

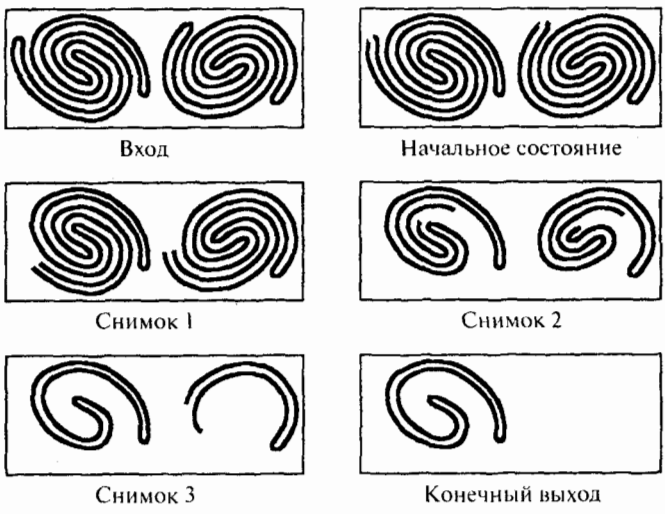


Рис. 6.16. Моментальные снимки распространения КНС *CONNECTIVITY* [6.20]

ры одной из двух неоднозначно интерпретируемых областей.

В случае линейных синаптических весов характеристики синапса или элемента эталона линейны. Однако в технических приложениях (например, в контролируемых напряжением источниках тока) или в живых клетках с синаптической связью через нейротрансмиттер они никогда не бывают полностью линейными. Если для моделирования синаптической динамики мы используем нелинейные эталоны, анализ усложняется. Таким образом, компромиссом в моделировании является применение неспаренных КНС с нелинейными пространственно-инвариантными весами.

6.3. Универсальные клеточные нейронные сети и динамическая сложность

Приложения, включающие обработку изображений и распознавание образов, являются иногда линейно неразделимыми проблемами, требующими программ нескольких клеточных нейронных сетей. Программа КНС, определяемая строкой генов КНС, называется «хромосомой КНС». Любой клеточный автомат (КА) с двоичными или булевыми состояниями может рассматриваться как хромосома КНС. В частности, КА игры Конвея «ЖИЗНЬ» (см. рис. 5.20 в разд. 5.4) может быть реализована хромосомой КНС из двух генов КНС, связанных КНС, представляющей логическую операцию AND. Так как КА игры «ЖИЗНЬ» является универсальной машиной Тьюринга, соответствующая КНС этой игры также является универсальной машиной Тьюринга, способной к самовоспроизведению. Эти результаты приводят к технической реализации универсальной машины КНС с аналоговыми входом и выходом — универсального КНС-чипа, решающего вычислительные задачи со скоростью триллион операций в секунду. Из-за широкомасштабной нелинейной динамики этот чип отличается от обычного цифрового компьютера.

Архитектура *Универсальной Машины* КНС (УМ КНС) требует аналоговой и логической памяти, локального логического элемента и, как любая программируемая система, глобальных часов для управления инструкциями в течение заданного такта. Как упоминалось выше, эталоны КНС можно рассматривать как инструкции с хорошо определенными входом и выходом. Не все задачи могут быть выполнены с помощью одного эталона КНС. Таким образом, используя несколько эталонов, мы определяем КНС подпрограмму или функцию, подобную языку программирования типа C или C++. Существуют три эквивалентных способа создания КНС:

1) аппаратная схема с дискретными, соединенными кабелем клетками и дополнительными локальными и глобальными устройствами;
2) структурная схема алгоритма КНС;
3) программа КНС на аналоговом (α) языке программирования КНС с аналоговыми и логическими операциями.

Введение УМ КНС диктуется рядом практических и теоретических причин. С инженерной точки зрения, совершенно непрактично применять различные компоненты КНС или эталоны, соединенные различными кабелями КНС. Исторически универсальный компьютер Джона фон Неймана был создан на основе универсальной машины Тьюринга с целью преодоления и практического воплощения всех различных формализмов

1930–1940-х гг., использовавшихся для разных приложений. С теоретической точки зрения, УМ КНС открывает новые перспективы для аналоговых нейрокомпьютеров. В УМ КНС аналоговые (непрерывные) и логические операции смешаны и погружены в матричный компьютер. Это сложная нелинейная система, объединяющая два разных типа операций, а именно, непрерывную нелинейную матричную динамику и непрерывное время с локальной и глобальной логикой. Очевидно, что смесь аналоговых и цифровых компонент во многом аналогична обработке информации нейронами в живых организмах. Сохраняемая программа, представляющая последовательность эталонов, может рассматриваться как вид генетического кода для УМ КНС. Элементарными генами являются эталоны. Например, 3×3 эталоны имеют код из 19 действительных чисел. В нервной системе последовательные эталоны размещены в пространстве как последовательные слои нейронов.

Архитектура УМ КНС состоит из так называемых расширенных стандартных универсальных клеток КНС (рис. 6.17). Главные компоненты универсальной клетки — это локальная логическая память (ЛЛП) и локальная аналоговая память (ЛАП), локальный логический модуль (ЛЛМ) и локальный аналоговый выходной модуль (ЛАВМ) для цифровых и непрерывных (аналоговых) сигналов, соответственно. Локальный модуль связи и управления (ЛМСУ) получает программные инструкции в каждую клетку от глобального программного модуля (ГАПМ). Инструкции содержат аналоговые эталонные значения $\{\mathbf{A}, \mathbf{B}, z\}$, коды логических функций для ЛЛМ и конфигурацию переключателей клетки, задающую пути сигналов и ряд установок для функциональных модулей. Таким образом, ГАПМ требует запоминающих элементов (регистров) для трех типов информации, а именно, аналоговый программный регистр (АПР) для эталонов КНС, логический программный регистр (ЛПР) для функций ЛЛМ и регистр конфигурации переключателей (РКП). Помимо глобальных часов (ГЧ) имеется глобальная шина (ГШ), принимающая решения о том, сохраняются ли любые черные пиксели на обрабатываемых образах.

После введения архитектуры со стандартными универсальными клетками КНС и глобального аналогового программного модуля (ГАПМ), на УМ КНС может быть выполнена полная последовательность аналоговых программ КНС. Описание такой программы содержит глобальную задачу, блок-схему алгоритма, описание алгоритма на программном языке высокого уровня (α) и последовательность макроинструкций от α-компилятора в форме аналогового машинного кода (АМК). На нижнем уровне чипы встроены в их физическую окружающую среду из цепей. Код АМК транслируется в аппаратные цепи и электрические сигналы. На высшем уровне α-компилятор генерирует макроуровневый код, называемый аналоговым макрокодом (АМК). Вход α-компилятора — это описание блок-схемы алгоритма на α-языке. На рис. 6.18 показаны уровни программного обеспечения и центрального процессора. АМК используется для моделирования программного обеспечения, выполняемого на интегральной микросхеме персонального компьютера «Пентиум», и для приложений, выполняемых на интегральной микросхеме УМ КНС с пробной системой интегральной схемы КНС (ПСИС).

Универсальная машина КНС технически реализуется объединением аналоговых и цифровых сверхболь-

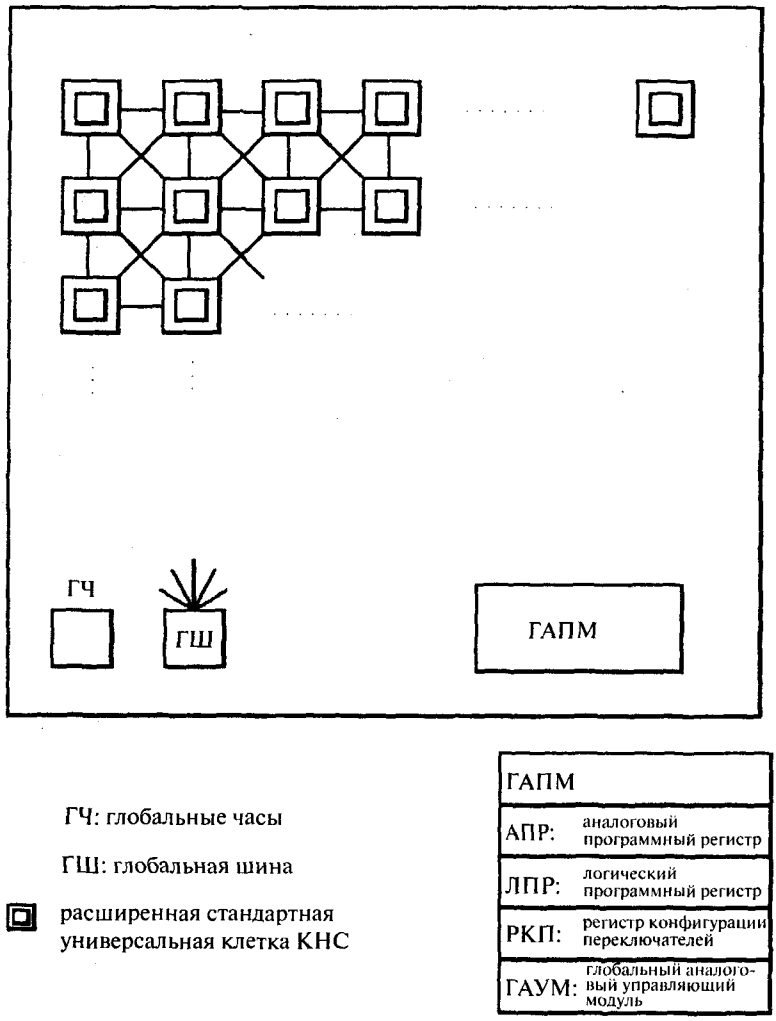


Рис. 6.17. Структура универсальной машины КНС (УМ КНС) [6.21]

ших интегральных микросхем (СБИС). Хорошо известно, что *любая* сложная система цифровой технологии может быть построена из нескольких объединенных блоков путем соединения проводами и программирования. Похожим образом может быть построена и УМ КНС, также содержащая аналоговые блоки. Схема модели стандартной клетки КНС была предложена Чуа и Янгом. Ядро клетки должно содержать всего три блока: конденсатор, резистор и УНИТ (управляемый напряжением источник тока). Если к этим трем блокам добавить переключатель, логический регистр и логический вентиль, то можно собрать расширенную клетку КНС для УМ КНС. В принципе, для постройки УМ КНС достаточно соединенных проводами шести блоков: резистор, конденсатор, переключатель,

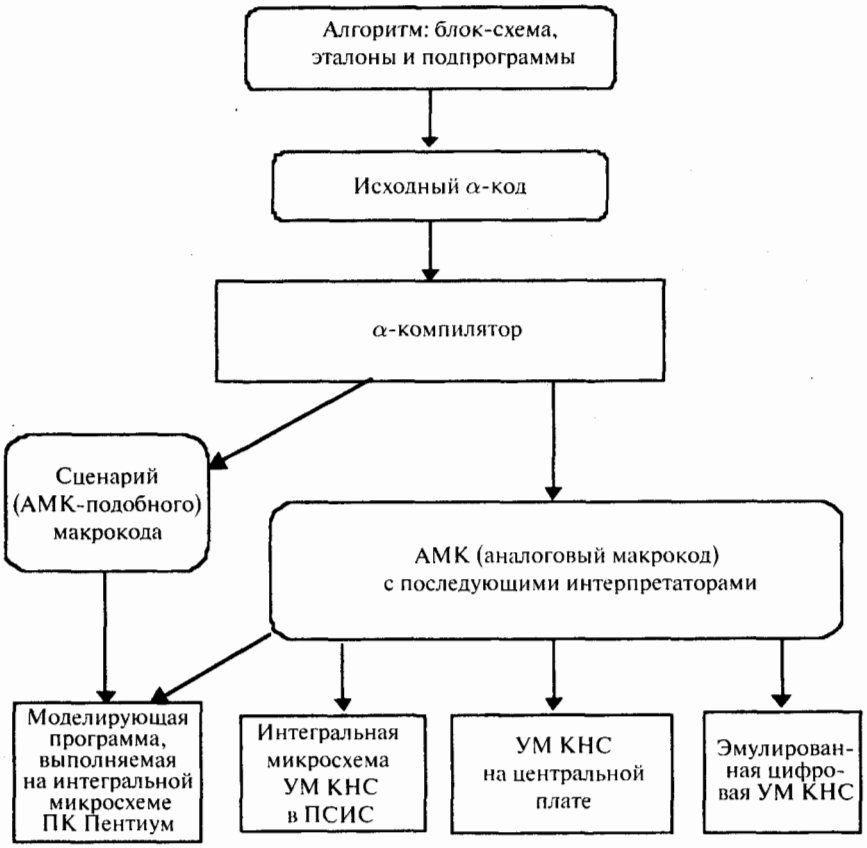


Рис. 6.18. Уровни программного обеспечения и центрального процессора в УМ КНС [6.22]

УНИТ, логический регистр и логический вентиль. Как и в цифровом компьютере, в аналоговых нейронных компьютерах можно ввести запоминаемую возможность программирования, позволяющую изготовлять визуальные микропроцессоры. Как и для классических микропроцессоров, для того чтобы запоминаемая возможность программирования стала понятной пользователю-человеку, требуется сложная вычислительная инфраструктура на языке высокого уровня, компилятор, макрокод, интерпретатор, операционная система и физический код. Используя эту вычислительную инфраструктуру, можно запрограммировать визуальный микропроцессор, загрузив программы на микросхемы, как и в случае классических цифровых микропроцессоров. Написание программы для аналогового алгоритма КНС столь же просто, как написание программы на языке BASIC.

Если говорить о вычислительной мощности компьютеров КНС, то их скорость вычислений в сложных задачах на порядки превосходит ту, которая достигается при использовании обычных вычислительных технологий. Имеются также преимущества в размерах, сложности и потребляемой мощности. Полная УМ КНС на мик-

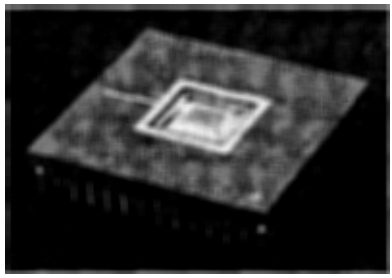


Рис. 6.19. Технологическая реализация универсальной машины клеточной нейронной сети (УМ КНС)

росхеме состоит из 64 × 64 матрицы КМОП [5] клеточных процессоров размером 0,5 мк (рис. 6.19). Каждая клетка снабжена не только сенсором для непосредственного оптического ввода изображений и видео, но и цепями связи и управления, локальным аналогом и логическими запоминающими устройствами. Клетки КНС соприкасаются с ближайшими соседями, а также с внешним миром. Микросхема КНС с 4096 клеточными процессорами обладает вычислительной мощностью трансляции, равной $3{,}0 \times \times 10^{12}$ оп/с (операций в секунду), что примерно в тысячу раз быстрее, чем вычислительная мощность стандартной модели процессора Пентиум. Используя технологию вертикальной упаковки, можно создать на микросхемах с матрицами 200 × 200 архитектуру УМ КНС с вычислительной мощностью порядка 10^{15} оп/с. Таким образом, универсальные микросхемы КНС будут реализовывать скорость вычислений в тера- и даже петафлопсном (10^{15} оп/с) диапазоне, что требуется для распознавания высокоскоростных мишеней и слежения за ними, визуального контроля за производственными процессами в реальном времени и интеллектуального зрения, способного распознавать контекстнозависимые и движущиеся сцены.

Универсальная схема КНС является краеугольным камнем информационной технологии, так как это первый полностью программируемый, имеющий промышленные размеры, похожий на мозг компьютер с хранимой памятью и динамическим массивом. КНС является очень сложной вычислительной системой, так как она состоит из большого параллельного массива с вычислительной мощностью суперкомпьютера. Помимо вычислительной мощности, универсальная микросхема КНС со своей уникальной похожей на мозг архитектурой может использоваться для выполнения интеллектуальных задач обработки информации, которые до сих пор не могут быть осуществлены с помощью обычных цифровых компьютеров. Развитие адаптивных сенсорных компьютеров в будущем бросит вызов робототехнике и высокотехнологичной медицине.

С теоретической точки зрения, УМ КНС позволяет глубоко понять динамическую сложность вычислительных процессов. В то время как классификация сложности клеточных автоматов (КА) в разд. 5.4 была в основном связана с эмпирическими наблюдениями образования структур в компьютерных экспериментах, основанный на КНС подход дает математически точную меру динамической сложности. Основная идея состоит в том, чтобы понять клеточные автоматы как частный случай КНС, который можно охарактеризовать точным кодом для аттракторов нелинейных динамических систем и уникальным индексом сложности.

Каждый одномерный клеточный автомат с двумя ближайшими соседями каждой клетки в строке (рис. 5.21 *а*)

[5] Комплементарный металло-оксидный полупроводник. — *Прим. пер.*

определяется булевой функцией трех переменных для двух соседей и самой клетки. Рассмотрим кольцо связанных клеток C_i $(i = 0, 1, 2, \ldots, M)$. В контексте КНС предполагается, что каждая клетка является динамической системой с состоянием x_i, выходным сигналом y_i и тремя входными сигналами u_{i-1}, u_i и u_{i+1}. Переменная u_{i-1} обозначает входной сигнал от левой соседней клетки C_{i-1} к клетке C_i, переменная u_i — сигнал от клетки C_i к ней самой, и переменная u_{i+1} — входной сигнал от правой соседней клетки C_{i+1} к клетке C_i. Булева функция B переносит выходной сигнал $y_i = B(u_{i-1}, u_i, u_{i+1})$ от клетки C_i. В этом смысле каждый одномерный клеточный автомат с ближайшими соседями можно охарактеризовать таблицей истинности для булевой функции трех двоичных переменных (рис. 6.20). Так как имеется $2^3 = 8$ возможностей для построения трехбитных слов, получаем $2^8 = 256$ булевых функций B.

Для того чтобы охарактеризовать клеточные автоматы динамическими системами с дифференциальными уравнениями, двоичные состояния таблицы истинности обозначаются не обычными символами 0 и 1, а целыми числами -1 и 1. Общая схема таблицы истинности для 256 булевых функций показана на рис. 6.20. Если заменить выходной сигнал

$$y_i = (\gamma_7, \gamma_6, \gamma_5, \gamma_4, \gamma_3, \gamma_2, \gamma_1, \gamma_0)$$

с γ_j, равными или -1 или 1, на эквивалентную двоичную форму

$$y_i = (\beta_7, \beta_6, \beta_5, \beta_4, \beta_3, \beta_2, \beta_1, \beta_0)$$

с β_i, равными или 0 или 1, то каждую булеву функцию можно охарактеризовать единственными кодовым числом. Соответствующее кодовое число есть целое число

$$N = \beta_7 \cdot 2^7 + \beta_6 \cdot 2^6 + \beta_5 \cdot 2^5 + \beta_4 \cdot 2^4 + \\ + \beta_3 \cdot 2^3 + \beta_2 \cdot 2^2 + \beta_1 \cdot 2^1 + \beta_0 \cdot 2^0,$$

где $N = 0, 1, 2, \ldots, 255$, так как имеется 256 определенных комбинаций этого 8-битового слова для 256 булевых функций (ср. рис. 5.21 *а*).

Геометрически каждая булева функция трех двоичных переменных может быть однозначно представлена булевым кубом с восемью вершинами (рис. 6.20). Центр куба помещен в начало координат трехмерного пространства с координатами u_{i-1}, u_i и

	u_{i-1}	u_i	u_{i+1}	y_i
0	−1	−1	−1	γ_0
1	−1	−1	1	γ_1
2	−1	1	−1	γ_2
3	−1	1	1	γ_3
4	1	−1	−1	γ_4
5	1	−1	1	γ_5
6	1	1	−1	γ_6
7	1	1	1	γ_7

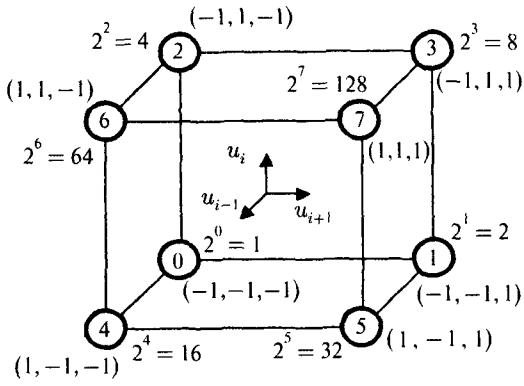


Рис. 6.20. Булев куб, соответствующий булевой функции, представляющий одномерный клеточный автомат [6.24]

u_{i+1}. Координаты (u_{i-1}, u_i, u_{i+1}) каждой вершины k ($k = 0, 1, 2, \ldots, 7$) соответствуют k-й строке таблицы истинности. Если заменить -1 и 1 на 0 и 1, то номера вершин k являются двоичными кодами координат (u_{i-1}, u_i, u_{i+1}). Число 2^k, показанное рядом с вершиной с номером k, является его десятичным эквивалентом. Вершина окрашена в белый цвет, если y_i равно 1, и в черный цвет, если y_i равно -1. Очевидно, что цветные булевы кубы содержат ту же информацию, что и соответствующая таблица истинности. Если сложить десятичные числа 2^k, связанные с белыми вершинами k булева куба, то мы получим кодовое число N булевой функции. В соответствующем правиле для одномерного клеточного автомата (рис. 5.21 *а*) белые вершины представляют выходные сигналы 1, а черные вершины — выходные сигналы 0. Например, правило $N = 110$ (рис. 5.21 *д*) представляется булевым кубом с белыми вершинами 1, 2, 3, 5, 6 и черными вершинами 0, 4, 7. Таким образом,

$$110 = 2^1 + 2^2 + 2^3 + 2^5 + 2^6.$$

Существует 256 различных цветных булевых кубов, представляющих 256 булевых функций одномерного клеточного автомата. Изучение пространственной геометрии цветных кубов открывает новые перспективы для характеристики структурной сложности булевой функции, соответствующей клеточным автоматам. В связи с обсуждавшимися в предыдущей главе булевыми функциями несвязных КНС, мы будем различать *линейно сепарабельные* и *линейно несепарабельные правила*. Если рассматривать цветные кубы клеточного автомата, то сепарабельность относится к числу секущих (параллельных) плоскостей, разделяющих вершины на кластеры одного цвета. Например, для правила 110 можно ввести две разделяющие параллельные плоскости соответствующего цветного куба[6], которые помечены на рис. 6.21 *б* номерами 1 и 2. Белые вершины 2 и 6 лежат над плоскостью 2. Черные вершины 0, 4 и 7 лежат между плоскостями 1 и 2. Белые вершины 3, 1 и 5 лежат ниже плоскости 1. Хорошо известно, что клеточный автомат правила 110 является одним из нескольких типов 256 автоматов, являющихся универсальными машинами Тьюринга. Он относится, по классификации Стивена Уолфрема, к клеточным автоматам третьего класса (рис. 5.21 *д*). Это правило порождает очень сложные структуры.

Правило 232 является примером автомата, который может порождать только очень простые структуры. Существует только одна плоскость, рассекающая соответствующий булев куб на разделенные цветные точки (рис. 6.21 *а*): белые вершины 3, 5, 6 и 7 лежат выше плоскости 1, черные вершины 0, 1, 2 и 4 — ниже этой плоскости. На рис. 6.21 *в* показан цветной булев куб с тремя параллельными разделяющими плоскостями, представляющий клеточный автомат правила 150: черная вершина 6 лежит выше плоскости 3, белые вершины 2, 4 и 7 лежат между плоскостями 2 и 3, черные вершины 0, 3 и 5 лежат между плоскостями 1 и 2, белая вершина 1 лежит ниже плоскости 1. Очевидно, невозможно разделить восемь вершин на три цветных кластера и одновременно разделить их двумя параллельными плоскостями независимо от их ориентации.

Правила, при которых цветные вершины для соответствующего им куба могут быть разделены лишь одной плоскостью, называется *линейно*

[6] Мы пометили вершины черным и белым цветами. В оригинале они синие и красные соответственно. — *Прим. ред.*

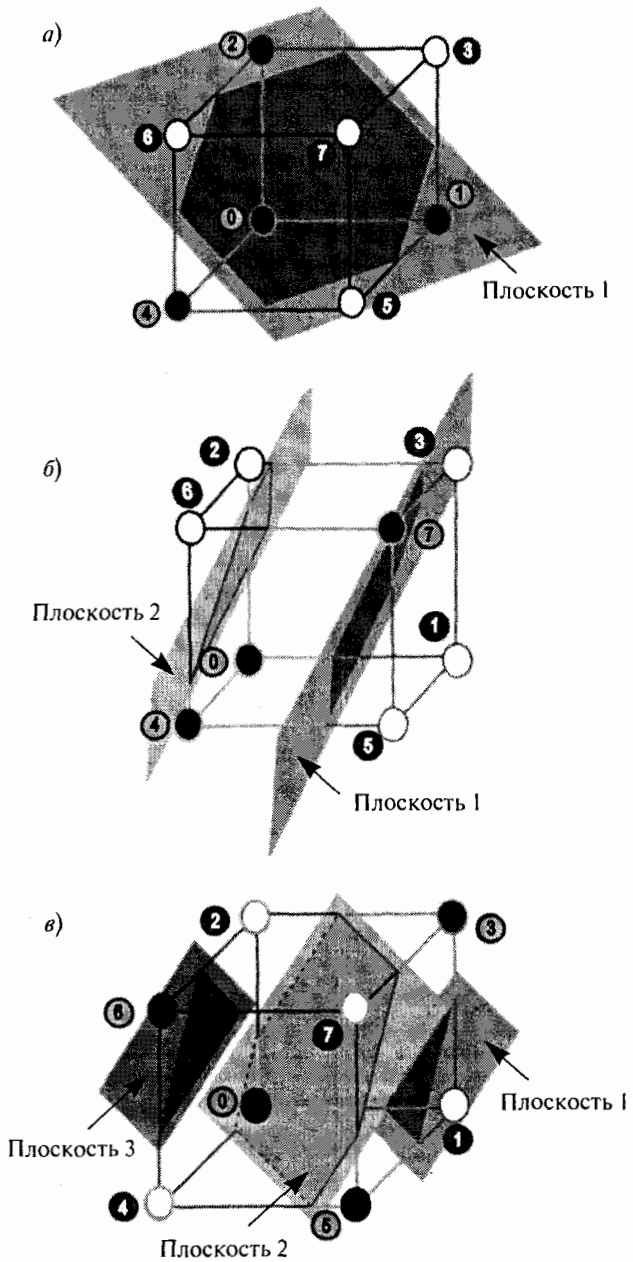


Рис. 6.21. Разделяющие плоскости в цветных булевых кубах: *а* — для правила 232; *б* — для правила 110; *в* — для правила 150 [6.25]

сепарабельным. Исследование 256 булевых кубов показывает, что 104 из них линейно сепарабельны. Остающиеся 152 правила линейно несепарабельны. В общем случае каждое правило может быть разделено различным числом параллельных плоскостей. Чтобы использовать число разделяющих плоскостей в качестве однозначного индекса сложности κ, необходимо выбрать минимальное число. Очевидно, что все линейно сепарабельные правила имеют индекс сложности $\kappa = 1$. Анализ оставшихся 152 линейно несепарабельных правил показывает, что их индекс сложности равен 2 или 3. Например, правило 110 имеет индекс сложности $\kappa = 2$, а правило 150 имеет индекс сложности $\kappa = 3$. Ни одно из правил с индексом сложности $\kappa = 1$ не способно порождать сложные структуры даже при случайных начальных условиях. Возникновение сложных явлений существенно зависит от минимального индекса сложности $\kappa = 2$. В этом смысле индекс сложности 2 может рассматриваться как порог сложности одномерного клеточного автомата.

Все 256 булевых кубов можно расклассифицировать по классам эквивалентности с одинаковыми индексами сложности. Соответствующие булевы правила называются *эквивалентными*, если существует преобразование, отображающее одно правило в другое и наоборот. В случае преобразования дополнительности Белый $\rightarrow$ Черный цвета вершин соответствующих булевых кубов (рис. 6.20) дополняют друг друга, т. е. соответствующие белые вершины становятся черными и наоборот. В случае преобразования лево-правой симметрии, происходит обмен цветами между вершинами 3 и 6, а также вершинами 1 и 4 в данном кубе (рис. 6.20), и получается другой куб. Очевидно, что правило 150 (рис. 6.21 *в*) инвариантно относительно преобразований лево-правой симметрии, так как вершины 1 и 4 имеют одинаковый цвет (белый), а вершины 3 и 6 имеют также одинаковый цвет (черный). Все члены, принадлежащие одним и тем же классам эквивалентности булевых правил, имеют одинаковый индекс сложности и демонстрируют динамическое поведение, которое можно предсказать по поведению друг друга. Таким образом, достаточно изучать поведение только одного представителя каждого класса эквивалентности. В общем случае можно выделить 33 независимых линейно сепарабельных и 47 независимых линейно несепарабельных правил. Следовательно, нелинейная динамика и динамическая сложность 256 булевых функций с тремя двоичными входными сигналами характеризуется всего 80 независимыми представителями.

Каждый одномерный клеточный автомат, или булева функция, с номером правила N ($N = 0, 1, 2, \ldots, 255$) может быть отображен на нелинейную динамическую систему соответствующей клеточной нейронной сети. Используя КНС, можно рассматривать каждый одномерный клеточный автомат с близкими соседями как КНС с 1×3 окрестностью каждой клетки C_i с входными сигналами u_{i-1}, u_i и u_{i+1} (от двух соседних клеток C_{i-1} и C_{i+1} и от самой клетки C_i) и выходным сигналом y_i. Для КНС такого типа зависящая от времени эволюция будущих состояний в клетке C_i зависит от прошлого клеточного состояния x_i, трех входных сигналов u_{i-1}, u_i и u_{i+1} и выходного сигнала $y_i = y(x_i)$. Таким образом, нелинейные динамические системы для генерации всех 256 правил определяются уравнением состояния в форме $\dot{x}_i = f(x_i, u_{i-1}, u_i, u_{i+1})$ и одинаковым начальным условием $x_i(0) = 0$ в мо-

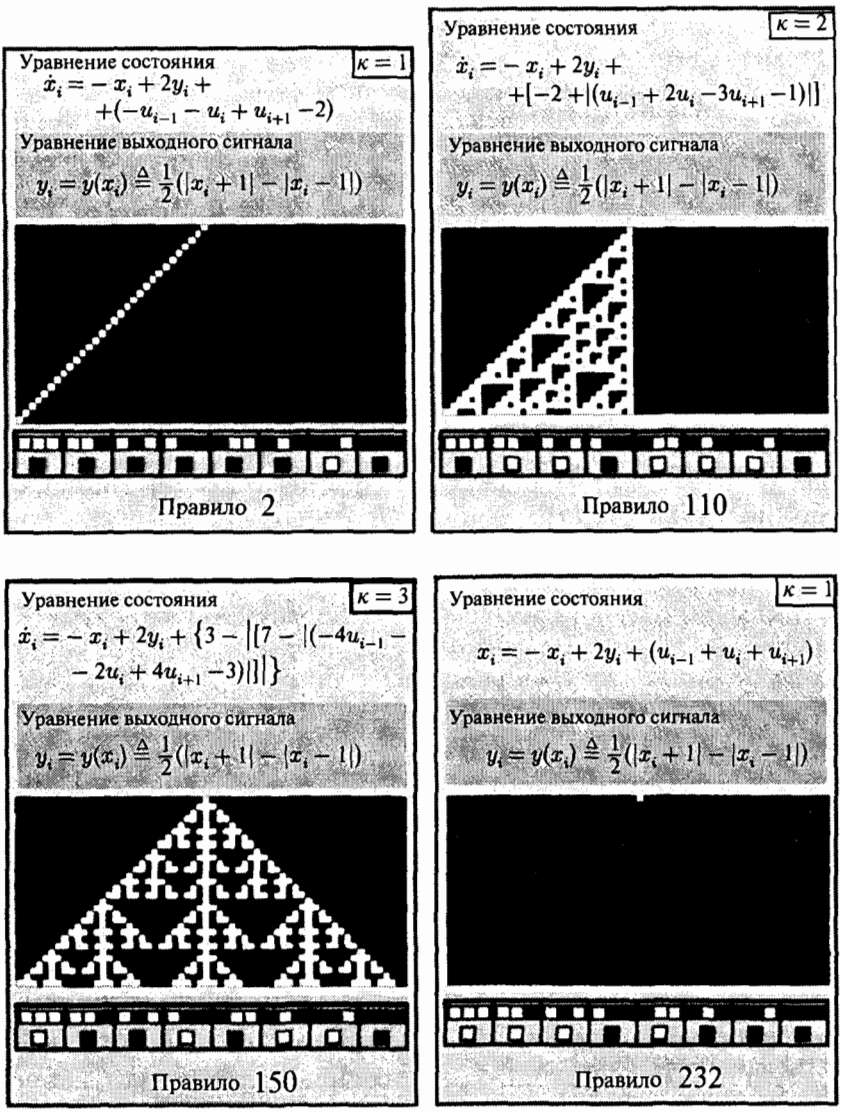


Рис. 6.22. *Нелинейные динамические системы, порождающие правила 2, 110, 150 и 232 [6.26]*

мент времени $t = 0$. Выходной сигнал y_i от клетки C_i генерируется из состояния x_i уравнением для выходного сигнала

$$y_i = y(x_i) := \frac{1}{2}\big(|x_i + 1| - |x_i - 1|\big).$$

На рис. 6.22 показаны нелинейные динамические системы КНС для правил 2, 110, 150 и 232. Таблица истинности для каждого правила приведена к форме генетического кода для КА (см. рис. 5.21 *а*). Каждая структура состоит из 30×61 пикселей, сгенерированных одномерным клеточным автоматом с номером правила N. Верхняя строка соответствует началь-

ной структуре, которая равна «0» (черный) для всех пикселей, кроме центрального, который соответствует «1» (белый). Эволюция за 29 следующих итераций представлена в строках от 2 до 30. Очевидно, эти КНС генерируют структуры, тождественные соответствующим КА. Индекс сложности κ каждого правила указан в верхнем правом углу каждого квадранта.

Аттракторы этих нелинейных динамических систем точно кодируют таблицы истинности N ($N = 0, 1, 2, \ldots, 255$), связанные с их булевыми функциями и булевыми кубами. Поэтому мы заменяем выходные сигналы y_i в уравнениях состояния (см., например, рис. 6.22) их выходным уравнением

$$y_i = y(x_i) := \frac{1}{2}\left(|x_i + 1| - |x_i - 1|\right)$$

и рассматриваем уравнения состояния в форме

$$\dot{x}_i = g(x_i) + w(u_{i-1}, u_i, u_{i+1}),$$

где

$$g(x_i) = -x_i + |x_i + 1| - |x_i - 1|$$

и остающаяся часть равна $w(u_{i-1}, u_i, u_{i+1})$. Так как нелинейная функция $w(u_{i-1}, u_i, u_{i+1})$ сопоставляет каждой вершине n ($n = 0, 1, 2, \ldots, 7$) с координатами (u_{i-1}, u_i, u_{i+1}) соответствующего булева куба или каждой строке соответствующей таблицы истинности (рис. 6.20) постоянное действительное число, мы можем записать $w(n) := w(u_{i-1}, u_i, u_{i+1})$. Тогда уравнение состояния переписывается в виде $\dot{x}_i = g(x_i) + w(n) := h_n(x_i)$ для каждой вершины n булева куба или для каждой строки соответствующей таблицы истинности. Для каждого из этих восьми дифференциальных уравнений можно изучать траектории и аттракторы в соответствующем фазовом пространстве. На рис. 6.23 показаны два типичных случая, когда $w(n)$ положительна или отрицательна. Кривая Γ между двумя траекториями представляет график $g(x_i)$ («входная функция»).

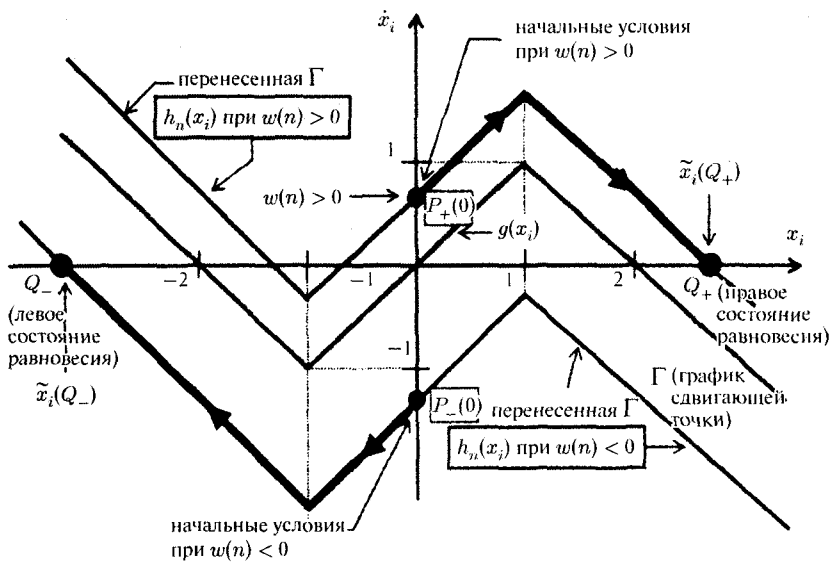


Рис. 6.23. Траектории и аттракторы в фазовом пространстве уравнения состояния КНС [6.27]

Верхняя кривая соответствует вертикальному переносу Γ вверх на величину $w(n) > 0$, нижняя кривая соответствует вертикальному переносу Γ вниз на величину $w(n) < 0$. Так как предполагается, что начальное условие всегда имеет вид $x_i(0) = 0$, траектория должна начинаться в верхней начальной точке $P_+(0)$, если $w(n) > 0$, или в нижней начальной точке $P_-(0)$, если $w(n) < 0$. Поскольку $\dot{x}_i > 0$ во всех точках справа от начальной точки $P_+(0)$ на верхней кривой, траектория должна монотонно двигаться вправо, пока не будет достигнут правый аттрактор (особая точка) Q_+, находящийся при $x_i = x_i(Q_+) > 1$. Наоборот, при $P_-(0)$ траектория должна начинаться в нижней начальной точке Q_- и двигаться влево, пока не будет достигнут левый аттрактор (особая точка) Q_-, находящийся при $x_i = x_i(Q_-) < -1$.

Соответствующий выходной сигнал $y_i(t)$ сходится в первом случае к булеву состоянию $y_i = 1$, а во втором случае — к булеву состоянию $y_i = -1$. Если окрашивать вершину n белым цветом каждый раз, когда ее равновесное значение $x_i(Q_+) > 1$, и черным цветом каждый раз, когда $x_i(Q_-) < -1$, то цвет всех восьми вершин соответствующего булева куба однозначно определится равновесными решениями (аттракторами) восьми соответствующих дифференциальных уравнений. Для каждого правила имеется восемь аттракторов. Микросхема КНС может решить эти уравнения за несколько наносекунд, т. е. практически мгновенно.

Разделительные плоскости булева куба могут быть определены нелинейной функцией $w(u_{i-1}, u_i, u_{i+1})$ соответствующего уравнения состояния. Геометрически эта функция интерпретируется как скалярная функция $w(\sigma)$ лишь одной переменной $\sigma := b_1 u_{i-1} + b_2 u_i + b_3 u_{i+1}$, представляющей ось в координатной системе (u_{i-1}, u_i, u_{i+1}) с ориентацией b_1, b_2 и b_3 (рис. 6.20). Каждая цветная вершина булева куба может быть отображена на σ-ось, если из нее опустить нормаль на эту ось. Если нарисовать кривую $w(\sigma)$ на σ-оси, видно, что пересекающие нулевой уровень точки σ_0, для которых $w(\sigma_0) = 0$, разделяют цветные точки на оси проектирования на кластеры общего цвета. Поэтому $w(u_{i-1}, u_i, u_{i+1})$ иногда называют *дискриминантной функцией*. Каждая точка пересечения нулевого уровня $w(\sigma)$ определяет двумерную плоскость $\sigma_0 := b_1 u_{i-1} + b_2 u_i + b_3 u_{i+1}$ в трехмерной координатной системе (u_{i-1}, u_i, u_{i+1}), которая разделяет цветные вершины булева куба на кластеры одинакового цвета (рис. 6.21). Если цветные вершины можно разделить только одной плоскостью, соответствующее булево правило называется линейно сепарабельным. Теперь причина ясна: в этом случае соответствующая дискриминантная функция $w(\sigma)$ представляет прямую линию. В случае нескольких разделительных плоскостей имеется несколько точек пересечения нулевого уровня для разделительной кривой, связанных с нелинейной дискриминантной функцией $w(\sigma)$. Соответствующее булево правило называется в этом случае линейно несепарабельным. Техника проекции представляет точную процедуру для вычисления индексов сложности булевых правил и ассоциированных с ними одномерных клеточных автоматов.

Линейно сепарабельные локальные правила имеют индекс сложности $k = 1$. Ранее мы анализировали линейно сепарабельные булевы функции двух входных сигналов (разд. 6.1), девяти входных сигналов (разд. 6.2) и трех входных сигналов (разд. 6.3). В общем случае они представляют простейшие строительные блоки для

булевых функций в любом измерении. С инженерной точки зрения, они также являются простейшими для реализации на микросхеме. Все 104 линейно сепарабельных правила реализуются на универсальной микросхеме КНС (УМ КНС) непосредственно в «железе» без программирования. Техническое преимущество состоит в том, что линейно сепарабельные правила быстрее всего исполняются микросхемой. В кремниевой технологии на их исполнение требуется всего несколько наносекунд, в оптоволоконной технологии скорость исполнения определяется скоростью света. Скорость работы соответствующего клеточного автомата не зависит от размера массива. Для исполнения двумерного линейно сепарабельного правила на массиве 10×10 требуется столько же времени, как на массиве $10^6 \times 10^6$ клеточного автомата на микросхеме КНС.

Если рассматривать несвязные КНС (разд. 6.2), то можно заметить, что линейно несепарабельные булевы правила с девятью входными сигналами могут быть реализованы комбинацией конечного числа линейно сепарабельных правил с помощью нескольких стандартных логических операций (AND, OR и NOT). В частном случае этого фундаментального утверждения все 152 линейно несепарабельных правила трех входных сигналов можно разложить с помощью не более чем трех линейно сепарабельных правил и скомбинировать их с помощью пикселей, используя только логические операции AND и OR. На рис. 6.24 показаны примеры разложения для правила 110, содержащего только одну операцию AND (*а*), и для правила 105, содержащего одну AND и одну OR операцию (*б*). Отсюда следует, что правило 105 является одним из самых сложных одномерных

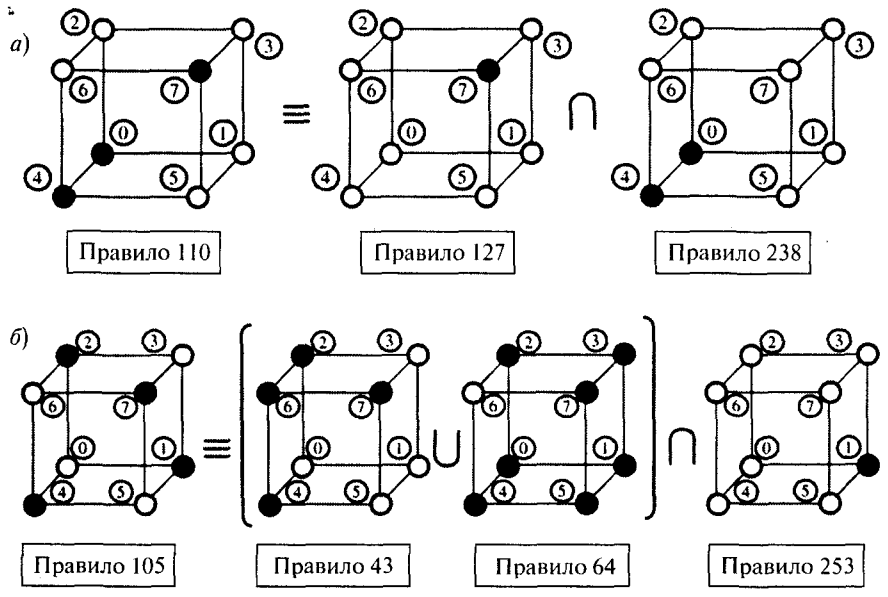


Рис. 6.24. Линейно несепарабельные правила, разложенные по линейно сепарабельным правилам [6.28]

клеточных автоматов для реализации на микросхеме. С точки зрения динамической сложности правило 105 имеет наивысший индекс сложности, равный 3.

6.4. Нейробионика и робототехника

Каковы цели всех технических усилий по созданию клеточных и нейронных сетей? Основанный на теории сложности подход позволит нам создать новую компьютеризованную реальность в науке, технике, промышленном производстве, экономической и даже культурной жизни. Но не следует забывать, что мы должны решить, каковы направление и этические цели технического развития, к которым мы стремимся. В наши дни эти цели находятся в диапазоне от познавательных и научных интересов до технических, экономических, культурных и, не в последнюю очередь, военных приложений. Вне всякого сомнения, медицинские исследования и приложения должны занимать высокое место в иерархии исследовательских целей. Напомню читателю старую мысль, что медицина стремится не только к научному познанию и исследованию, но и к практике.

Это означает не только технические приложения знаний в инженерном смысле, но и лечение, уход и исцеление. Знание и исследование — только инструменты для достижения главной цели медицины, которой со времен Гиппократа была защита жизни [6.29].

Центральным органом человеческой личности является мозг. Поэтому медицинская задача поддержания здоровья мозга накладывает большую ответственность на нейрохирургов. Они должны рассматривать свое лечение как манипуляции с единой системой разум—мозг. Чтобы обеспечить самое тщательное лечение, возможное для системы мозг—разум человека, должны быть предприняты первопроходческие усилия по расширению и улучшению диагностических и терапевтических возможностей нейрохирургии, планированию операций, операционной техники и реабилитации. Насколько мы знаем, человеческая система разум—мозг является самой сложной системой, созданной в процессе эволюции. Поэтому, чтобы иметь дело с этим сложным органом, нужна междисциплинарная исследовательская программа по компьютерной нейробиологии, физике, инженерии, молекулярной биологии, медицине и эпистемологии. В этом — причина того, почему некоторые ученые начинали междисциплинарную исследовательскую программу по изучению мозга и разума с этических и антропологических аспектов, которые мы назвали «нейробиоником».

В общем случае, «бионика» — это имитация естественных функций и процессов живых систем техническими или искусственными процедурами и объектами. Хорошо известным примером является создание самолетов и подводных лодок, аэродинамика которых во многом подобна форме тел птиц и рыб. Исторически бионика является старой мечтой человечества об имитации законов природы техническими средствами, с тем чтобы управлять сложными проблемами жизни. В рамках этой традиции *нейробионика* означает разработку общей технико-биологической реализации подобных мозгу компьютерных систем из кремниевых и/или органических материалов для усиления морфологических и функциональных

свойств естественных нейронов и создания нейронных протезов. Все это — совсем не жуткое видение монстра Франкенштейна. Чтобы увлечься и принять участие в исследовании этих проблем, нужно только взглянуть на жалкое состояние пациентов, страдающих от опухолей или случайных повреждений мозга.

Конкретный раздел медицины, касающийся центральной нервной системы и человеческого мозга, — это нейрохирургия [6.30]. Так как мозг является биологической средой человеческой личности и интеллектуальных способностей, нейрохирург должен применять по отношению к мозгу не только принципы неврологии, но и знания о человеческом разуме и его функциях. Нейрохирургия уже способна достигать прогресса в лечении пациентов. Заметные успехи в этом отношении были достигнуты в результате введения диагностических визуализирующих процедур, в частности компьютерной и ядерной магнитной резонансной томографии, а также использования при операциях микрохирургических процедур.

Однако все еще остаются нерешенными существенные проблемы в лечении пациентов с заболеваниями мозга. Например, в том, что касается функций, центральная нервная система взрослого человека может лишь в ограниченной степени заменить разрушенные области ткани. Это связано с неспособностью нервных клеток, в противоположность другим клеткам тела, продолжать деление после завершения эмбриональной фазы. Только эмбриональные ткани обладают способностью адаптироваться к окружающей «хозяйской» ткани. Поэтому разрушение групп нейронных клеток в результате болезни или несчастного случая часто приводит к стойким функциональным расстройствам. В этой области приложений искусственные сложные сети с их принципами самоорганизации становятся особенно интересными.

В истории медицины предпринимались попытки восстановления поврежденных периферийных первов с помощью аутотрансплантатов. Этот метод основан на том факте, что даже взрослые люди обладают способностью регенерировать продолжения нервных клеток, растущих по центру от спинного мозга к периферии органов-мишеней. Таким образом, части функционально несущественных чувствительных нервов удаляются из соответствующих точек тела и помещаются в область поврежденных нервов, которые должны быть восстановлены. Однако отрастание поврежденных нервных волокон все еще до конца не понято. Поэтому невозможно проконтролировать рост трансплантата, состоящего из нескольких сотен отдельных нервных клеточных продолжений, которые должны достичь органа-мишени. Так как центральная нервная система не способна к регенерации, в случае повреждений очень близких к спинному мозгу центральных областей пересадка неэффективна.

Считается, что исправление периферических нервных трансплантатов относится к области молекулярной биологии. Понимание физиологии и биохимии нервных клеток и связанных с ними клеток типа глиальных или клеток Шванна может привести к новым методам пересадки нервов. Передовым методом замены ткани центральной нервной системы является пересадка собственных клеток тела, которые перед этим генетически видоизменились и адаптировались. Должны быть исследованы влияние нейронных факторов роста, связь между источником трансплантата и целе-

вой областью в мозге реципиента и многие другие проблемы молекулярной биологии. Результирующие методы основаны на знаниях, полученных от генной инженерии.

Другим возможным методом пересадки периферических нервов могло бы стать использование искусственных трансплантатов вместо биологических. Медики и нейробиологи уже пытались восстановить поврежденные части нервной системы путем искусственной замены.

Искусственные трансплантаты снабжены обучающими алгоритмами, выполняющими роль «копий» природы. В противоположность сетям Мак-Каллока–Питтса, они представляют собой работающие в реальном времени сети с биологической обработкой импульсов. На рис. 6.25 показана общая схема такого нейро-технологического трансплантата. Обучающая нейронная сеть кодирует управляющие сигналы ощущения и движения в большое количество параллельных последовательностей импульсов, которые принимаются множеством имплантированных микроконтактов для стимуляции неповрежденных нервов (рис. 6.25 *а*). Сигналы, регистрируемые нервами, расшифровываются нейронной сетью для управления двигательным протезом (рис. 6.25 *б*).

Делались попытки улучшить функции стояния и хождения у пациентов, страдающих повреждением спинного мозга, с помощью электростимуляции системами биологической обработки импульсов. Если считать, что периферический аппарат не поврежден, то электрическая стимуляция периферийных нервов вызывает сокращение мускулов. Это вызвано параллельными импульсами адаптивной обучающей сети, кодирующей подаваемые пациентом звуковые команды чувствительной системы (рис. 6.25 *а*). Система обладает способностью к обучению, так как она может приспосо-

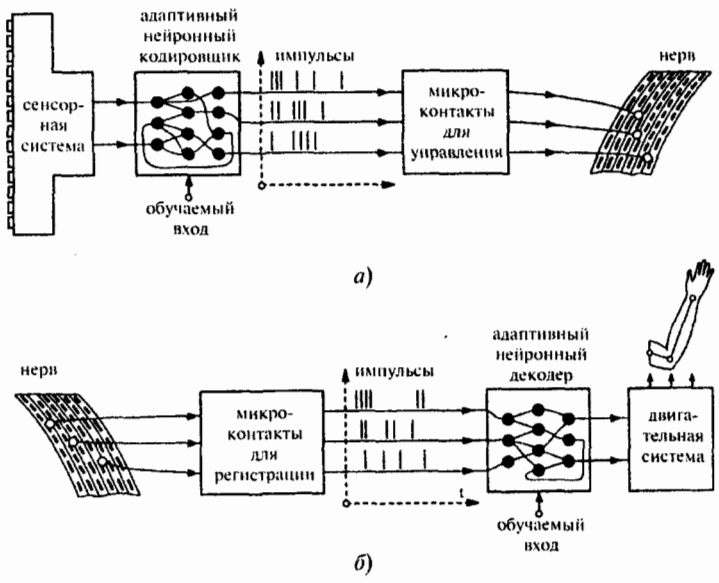


Рис. 6.25. Общая схема нейро-технологического протеза с обучающими нейронными сетями [6.31]

биться к конкретным условиям пациента за счет сенсорной обратной связи к движущимся ногам. Однако система все еще зависит от степени сознания и речи пациента. На следующем шаге исследований бессознательные намерения мозга должны декодироваться из зарегистрированных сигналов спинного мозга. Затем эти сигналы могут быть посланы, например, радиоволнами, к приемнику с адаптивным нейронным шифровщиком, который снова вызывает сокращение мускулов, как на рис. 6.25 *а*.

Амбициозный нейро-технологический проект связан с определенным типом слепоты. Пациенты с пигментной дегенерацией сетчатки страдают от повреждения нескольких слоев своей сетчатки, ответственных за восприятие контуров, поверхностей, цветов и других зрительных функций. Поврежденные слои сетчатки перекрываются нейропротезами. В архитектуре так называемого импланта сетчатки зрительная картина регистрируется фоторецепторами (например, транзисторами) в оправе для очков, оборудованной адаптивной нейронной сетью. Оптические сигналы от внешнего мира обрабатываются нейронной сетью системы биологической обработки импульсов, которая может учиться моделировать рецептивные поля глаза человека. Сигналы кодируются и передаются телеметрически к индукционному приемнику с набором электродов в поврежденной сетчатке, чтобы стимулировать зрительный нерв и центральную нервную систему. На более продвинутой стадии исследований очковое оборудование будет отброшено и рецепторный элемент может быть размещен непосредственно в глазу вместе с адаптивной нейронной сетью. Нельзя всерьез надеяться на то, что в первых же пробах удастся полностью восстановить способность к зрению. Тем не менее восстановленное ощущение контуров и поверхностей облегчит ориентацию пациентов, что и является сегодняшней целью таких попыток.

Решающий прогресс может быть достигнут, если удастся провести стимуляцию различных групп мышц непосредственно на ветвлениях концов периферических нервов, не используя неорганические металлические электроды. Биотехническая способность к подключению должна быть реализована молекулярными устройствами, созданными для производства электронных компонентов из органических молекул. Процессоры, управляющие электродами и обрабатывающие информацию, должны быть основаны на принципах искусственных нейронных сетей, способных достигать скорости обработки данных, достаточной для удовлетворения требований человеческих аппаратов хождения и стояния. Очевидно, что развитие этих сложных сетей требует междисциплинарного взаимодействия молекулярной биологии, вычислительной нейробиологии и высокотехнологичной разработки «железа».

Еще одним примером искусственной замены поврежденных функций нейронов является замена внутреннего уха имплантатом улитки. Если слуховой нерв не поврежден, то с помощью микрохирургии можно имплантировать 25-полюсный электрод в качестве замены кортиева органа. Чтобы имитировать слуховые ощущения, слуховой нерв возбуждается соответствующими импульсами электродов. Эти импульсы управляются последовательными микропроцессорами, запрограммированными на основе языковых знаний. Однако в процессе сложных операций по удалению опухолей слухового нерва возникает опас-

ность, что этот нерв может быть поврежден, что влечет за собой глухоту пациента. В наши дни возможно также связать искусственную сеть непосредственно с областью центрального слухового проводящего пути. Тогда ощущение слышимости может быть восстановлено, несмотря на потерю слухового нерва. Здесь вновь требуется междисциплинарное взаимодействие биотехнологии, вычислительной нейробиологии и инженерии.

В общем случае нейрохирургия должна принимать во внимание следующие клинические точки зрения: нейрохирургическую диагностику, планирование операций, операционную технику и нейрореабилитацию, которые могут быть поддержаны основанным на сложных системах подходом в биотехнологии и вычислительной нейробиологии. Что касается диагностики, то процессы визуализации компьютерной томографии открыли в ней новую эру. Так как нейрохирурги должны иметь дело с одним из самых сложных органов, созданных эволюцией, то планирование операций и имитация стали важным этапом в подготовке успешного лечения. В этом смысле сложность означает также черты личности пациента, его или ее конкретную историю болезни, патологию определенных процессов, индивидуальные анатомические особенности и возможные послеоперационные последствия.

Новый метод уже был внедрен в практику. Нейрохирургическая операция может быть имитирована техникой на базе *системы автоматизированного проектирования* (САПР). Имеются сгенерированные компьютером трехмерные реконструкции патологической анатомии, управляемые определенными программами. Во время реальных операций можно избежать потенциальных трудностей, которые могут обнаружиться во время имитации. Что касается техники операций, то прогресс состоит в уменьшении числа больших открытых операций. Важными методами, позволяющими минимизировать хирургические травмы, являются стереотаксическая и эндоскопическая техники. Дальнейшее развитие лазерных технологий в комбинации с нейрохирургической эндоскопией, процессы интраоперационной визуализации и управляемая компьютером техника регулирования могут стать в будущем плодотворными комплексными оперативными инструментами.

Исследовательская группа в Массачусетской клинической больнице в Бостоне с помощью магнитно-резонансной техники построения изображений получила функциональные карты изображений того, как у человека происходит активация зон в зрительной коре в результате светового возбуждения. Со временем периодически впрыскивалось контрастное вещество. Равномерные изображения первичной зрительной коры были сделаны без инъекции с помощью быстрого магнитно-резонансного сканирования изображений. На рис. 6.26 показаны полученные в реальном времени визуализации познавательной активности в виде сложных сетей [6.32]. Такие современные компьютеризованные визуализации сложных нейронных сетей не только помогают травмированным пациентам, но в конечном итоге позволят нам видеть собственные мысли, чувства и сновидения.

Галлюцинации являются результатом явлений самоорганизации внутри зрительной коры. Этот тип восприятия структур, по-видимому, похож на формирование рельефа жидкостей в химии или аэродинамике. В случае химии локальные нелиней-

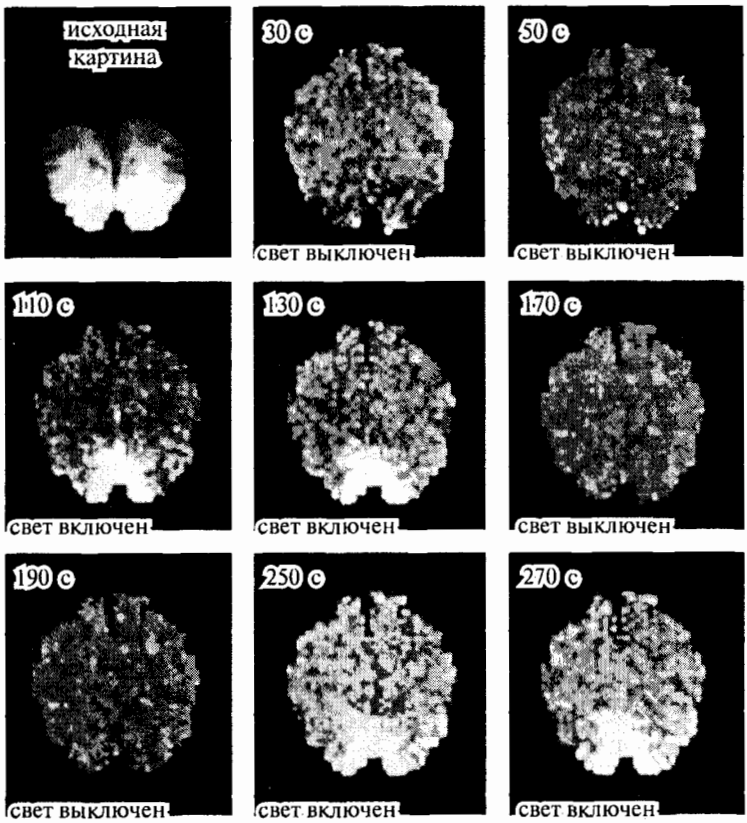


Рис. 6.26. Полученная в реальном времени визуализация мозговой познавательной активности сложных сетей [6.32]: Baseline — исходная картина, ON — свет включен, OFF — выключен

ные взаимодействия химических соединений генерируют макроявления, подобные колебательным химическим процессам (например, реакция Белоусова—Жаботинского). Формирование рисунка в зрительном мозге возникает за счет локального нелинейного взаимодействия между клетками. В живом организме осуществляется пространственное преобразование между восприятием структуры сетчаткой и формированием рисунка в зрительной коре мозга. Первые имитации такого преобразования кора—сетчатка, осуществленного нейронными сетями, вызвали примечательные аналогии с восприятиями структур, хорошо известных из субъективного опыта переживания галлюцинаций. Люди, испытавшие клиническую смерть и вернувшиеся к жизни, сообщали об ощущении движения по дороге в форме спиралевидного тоннеля. Свет в конце тоннеля иногда интерпретировался как религиозное откровение.

Клеточные нейронные сети (КНС) являются оптимальными кандидатами для имитации локальных нейронных взаимодействий клеток, порождающих коллективные макроявления. Простая автономная КНС была создана с помощью эталона с локальной активацией и поперечным торможением. При случайных начальных усло-

виях эта КНС спонтанно генерировала структуру лабиринта. На следующем шаге к результирующей устойчивой структуре применялась карта сетчатка–кора. Геометрически декартова точка на коре отображается на точку на сетчатке в полярных координатах, образуя воспринимаемое изображение картины спирального тоннеля (рис. 6.27). Преимущество модели КНС очевидно. Она может быть легко запрограммирована в виде универсальной КНС микросхемы (УМ КНС) (см. разд. 6.3), которая затем может быть включена в состав живого мозга в будущих нейрохирургических приложениях.

Существенный толчок к развитию искусственных нейронных сетей связан с тем фактом, что производство высокоинтегрированных электронных схем, основанных на кремнии, достигло своего физического предела. Дальнейшая миниатюризация с помощью этой технологии, основанной на принципах программно-управляемых процессоров, практически невозможна. Для того чтобы решать проблемы, связанные со сложностью мозга, необходимы высокий параллелизм и стратегии самоорганизации. Таким образом, представляется, что в качестве основы систем обработки информации требуется использование новой подложки. Предприняты первые шаги для развития молекулярных электронных устройств на базе биологических компонентов. Электрические сигналы между первыми клетками могут проводиться по органическим проводникам.

Что касается компьютеризованной нейробиологии, то компьютерные имитации нейронных сетей могут помочь идентифицировать алгоритмы, которые на самом деле используются центральной нервной системой и мозгом. Существующие модели искусственных нейронных сетей исследуются, главным образом,

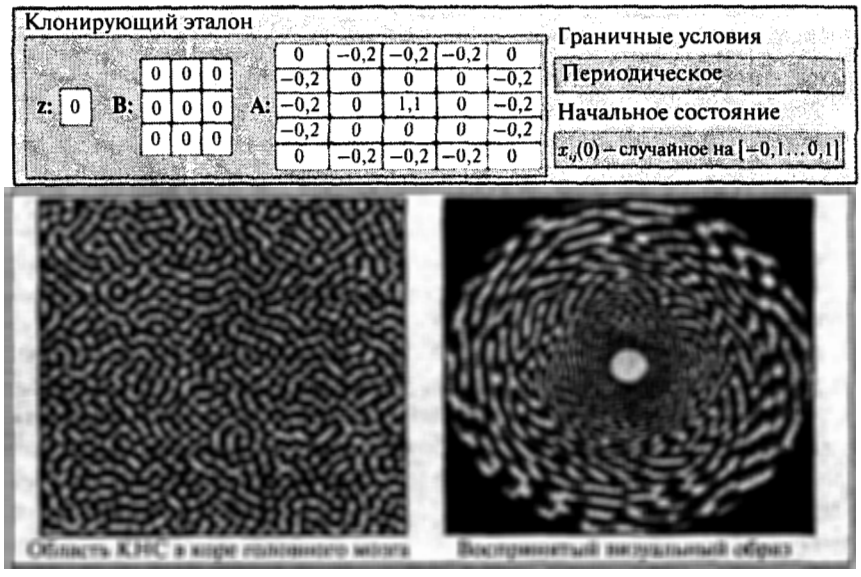


Рис. 6.27. Модель КНС для галлюцинаций [6.33]

путем имитации на векторных компьютерах, рабочих станциях, специальных копроцессорах или транспьютерных[7] массивах. Однако, конечно, при имитации на классических компьютерах преимущества пространственно-временного параллелизма в сложных сетях полностью или частично теряются. Выполнение задач в реальном времени станет возможным после того, как будет создано специально разработанное нейронное «железо».

Клеточные нейронные сети (КНС) с обработкой информации в течение наносекунд (в стандартном оборудовании) и даже со скоростью света (в оптической технологии) представляются оптимальными кандидатами для приложений в нейробионике. Очевидно, что имеется поразительное сходство между архитектурой КНС и, например, зрительной структурой мозга. Соответствующий КНС подход носит название «Бионического глаза», и он включает формальные рамки моделей зрения, собранные и включенные в универсальную машину КНС. Анализ начинается с модели организации принимающего поля в сетчатке и на зрительном пути. На рис. 6.28 *а* показан нейрон с одним аксонным выходом в виде ветки нескольким другим нейронам и дендритным входам. Маленькие щели обозначают синапсы, которые моделируются эталонными элементами. На рис. 6.28 *б* нейрон в центре получает повторяющиеся выходные сигналы от своих соседей. Таким образом, рецептивное поле центрального нейрона моделируется соответствующим 3 × 3 **A**-эталоном как его локальная сфера влияния. На рис. 6.28 *в* показана часть двухслойной нейронной сети, в которой каждый слой является одномерным представлением двумерной решетки. Нейрон в центре слоя 2 получает дендритные входные сигналы от окружения во входном слое 1. Соответствующие веса моделируются **B**-эталоном.

Ряд нейроанатомических и нейрофизиологических моделей можно транслировать в клонирующие КНС эталоны. Настройка длины, например, означает, что определенные нейроны в локальном коленчатом ядре (ЛКЯ) и зрительная кора дают максимальный отклик на оптимально ориентированную планку определенной длины. Отклик уменьшается или исчезает, когда стимулирующее воздействие длины планки растет. Соответствующая КНС модель детектирует горизонтальные, вертикальные и диагональные планки, длины которых не превышают трех пикселей. Другой функцией зрительной коры является селективность ориентации, которую также можно реализовать несвязной КНС. Зрительные иллюзии также можно имитировать несвязной КНС. После введения элементов сетчатки, таких как клетки, синапсы и эталоны, для организации рецептивного поля, можно создать и использовать в нейробионике упрощенную многослойную модель КНС сетчатки. В конце концов, КНС-архитектура позволяет реализовать многие пространственно-временные нейроморфные модели. Одна и та же архитектура универсальной машины может не только использоваться для подражания сетчаткам животных (например, лягушки, тигровой саламандры, кролика или орла), но эти машины можно объединять и оптимизировать для

[7] Транспьютер — процессор специальной архитектуры, разработанный английской фирмой *Inmos*. Оказал большое влияние на развитие архитектур для параллельных вычислений. — *Прим. пер.*

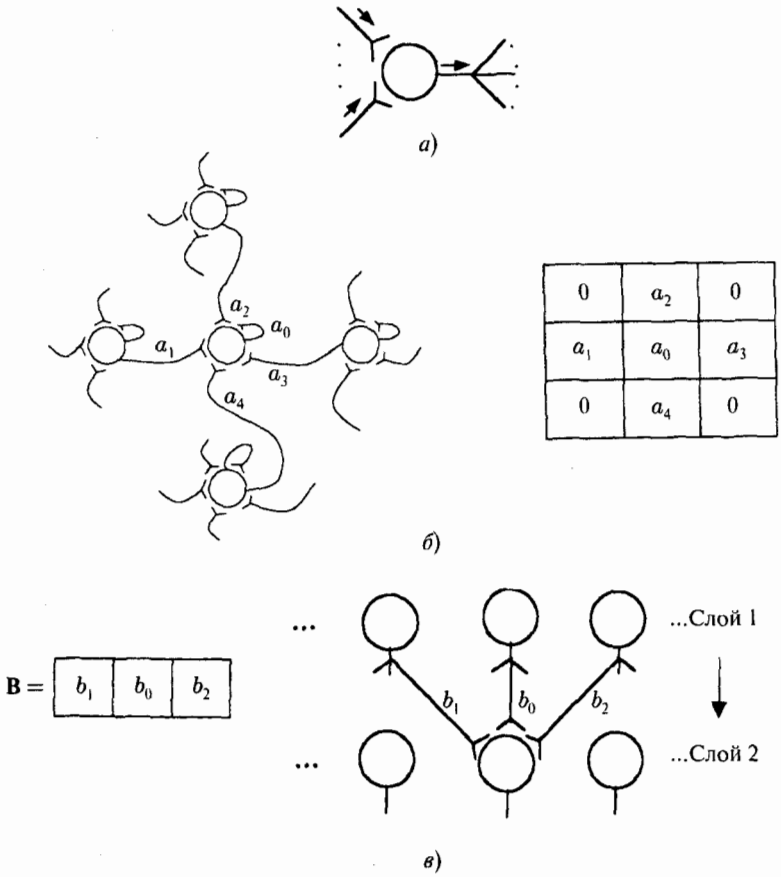


Рис. 6.28. Модель КНС в нейробионике:
а — с нейроном; *б* — с **A**-эталоном; *в* — с **B**-эталоном [6.34]

технических приложений. Комбинация биологических и искусственных микросхем уже не является научно-фантастической мечтой о киборгах, а представляет собой техническую реальность, сулящую воодушевляющие приложения в области робототехники и медицины.

Клинические приложения микросхем КНС к лечению эпилепсии уже рассматривались. Идея состоит в разработке миниатюрной микросхемы для предсказания и предупреждения припадков эпилепсии. Для описания типичной структуры электроэнцефалограммы (ЭЭГ) эпилептического припадка и распознавания фазовых переходов, приводящих к эпилептическим состояниям нейронов, была разработана техника нелинейного анализа временны́х рядов. Эта техника содержит главным образом оценки установленных критериев, таких как кореляционная размерность, энтропия Колмогорова–Синая, показатели Ляпунова, меры детерминированности, фрактальное подобие и т. д. (см. разд. 2.6). Вживляемые устройства для предупреждения и предотвращения припадков уже используются пациен-

тами с болезнью Паркинсона. В случае эпилептических процессов такие устройства будут непрерывно отслеживать данные, полученные из ЭЭГ, вычислять вероятность надвигающегося припадка и обеспечивать соответствующую методику его предупреждения. Устройство должно также обладать высокой гибкостью для подстройки к индивидуальным особенностям пациента и высокой эффективностью, чтобы иметь возможность оценивать эти особенности в реальном времени. Наконец, оно должно потреблять мало энергии и быть достаточно малым, чтобы умещаться в миниатюрной пересаживаемой системе. Эти требования оптимально реализуются КНС, обладающими огромной параллельной компьютерной мощностью, аналоговой обработкой информации и способностью к универсальным вычислениям. На рис. 6.29 показано миниатюрное устройство на микросхеме для предсказания и предупреждения припадков. Данные ЭЭГ записываются электродами, имплантированными вблизи или внутри эпилептической области, и передаются в систему анализа временны́х рядов. Эта система извлекает свойства надвигающегося припадка с помощью предупреждающей системы (I) и обеспечивает работающее по требованию вливание быстродействующих лекарств, предотвращающих припадок (II).

В будущих приложениях нейробионики обучение нейронных микросхем, которые могут служить связующим звеном между нервными волокнами человека, породит нелинейную динамику большой сложности. Создатели микросхем сталкиваются с проблемами соединений: если к нейрону нужно физически подсоединить десятки тысяч обладающих весом проводов и внедрить несколько тысяч таких нейронов, то область соединений возрастает до таких размеров, что задержка сигнала в проводах приводит к росту времени запаздывания в представляющем нейрон функциональном блоке. Так как уменьшение размеров технологической структуры экономически и физически ограничено, разработчики бионики в наши дни предпочитают архитектурное решение проблемы соединений. Во-первых, они должны проверить реальное время работы нейронной сети, во-вторых рассмотреть, до какой степени возможно отклониться от ее идеального массового параллелизма.

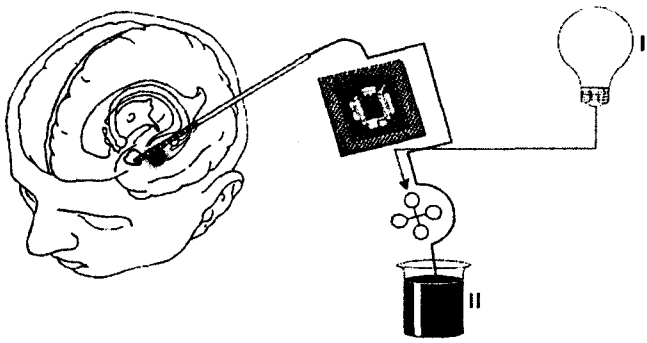


Рис. 6.29. Микросхема на основе КНС для предсказания и предотвращения эпилептических припадков [6.35]

Очевидно, что основное параллельное оборудование существенно увеличивает сложность программного обеспечения и требует новых методов работы. Для того чтобы облегчить интерфейсную связь с системой, должны быть разработаны мощные операционные системы, программные средства и гибкие интерфейсы пользователей. Эта задача станет особенно важной в междисциплинарной команде с различными степенями знакомства ее членов с наукой о компьютерах. Основанные на базе знаний экспертные системы могут помочь членам команды работать с биотехнологическим программным обеспечением и собираться в команду. Программирование оборудования нейронной сети будет решительно отличаться от классического программирования компьютеров фон Неймана. Программист должен установить необходимую топологию и архитектуру сети и точно задать взаимодействие нейронов со схемами соединений. Таким образом, реалистической перспективой в нейробионике является использование гетерогенных и гибридных систем, объединяющих нейронные сети и классические системы, основанные на базах данных (см. разд. 6.1).

В природе сложные формы движений рассчитываются и управляются не центральным процессором, а самоорганизующимися обучающими алгоритмами сетей с обратной связью. Примером может служить кузнечик с шестью ногами и разными двигательными модулями для подъема, размахивания крыльями и координации. Внешняя информация о незнакомой окружающей обстановке выучивается и неявно сохраняется путем распределения синаптических весов в нейронных сетях. В процессе эволюции в соответствии с изменяющимися условиями децентрализованные сетевые модули можно использовать как строительные блоки для различных организмов. Эти биологические подходы к обработке моторной информации уже применялись в робототехнике и технологии микросхем (материализованное познание). Программирование использует нечеткую логику, генетические и обучающие алгоритмы для гибкости и адаптивные и человекоподобные информационные системы. Эмоциональное вычисление стремится к распознаванию и моделированию эмоциональных состояний мозга как к обработке информации. Киборги (кибернетические организмы) представляют мечту о мозге с имплантированными нейрокомпьютерными микросхемами. Нейронные сети могут распознавать формы мозговой активности (например, сигналы ЭЭГ), скоррелированные с состояниями узнавания и сознания. На следующем шаге формы активности нейронов могут быть просканированы и загружены в суперкомпьютер. При этом, конечно, возникает драматичная этическая проблема: может ли быть клонирована и находиться под управлением вычислительных систем человеческая личность (а не только генотип ДНК)?

Кто-то может опасаться, что без высокоспециализированной подготовки не удастся управлять гибридными компьютерными системами растущей сложности. Необходимо развивать новые интерфейсы между компьютерными системами и пользователями. Созданные компьютерами образы должны управляться непосредственно речевыми, зрительными и осязательными контактами в «виртуальной реальности». С помощью технических устройств, связанных с чувствами пользователя, он должен получать впечатление о созданной компьютером реальности.

Зрительные впечатления генерируются монитором с датчиками положения, которые можно носить как маску на глазах. Для передачи приказов человека системе нужен микрофон, связанный с системой распознавания речи. Осязательные контакты генерируются и моделируются с помощью так называемых «перчаток данных», которые преобразуют движения руки и пальцев в электрические сигналы (рис. 6.30) [6.36].

В перчатке данных оптоволоконные провода проложены между двумя слоями одежды. Они связаны со специальным модулем, преобразующим световые сигналы в электрические. Практические применения предполагаются, например, в астронавтике. NASA заинтересовано в развитии роботов, которые могут выполнять

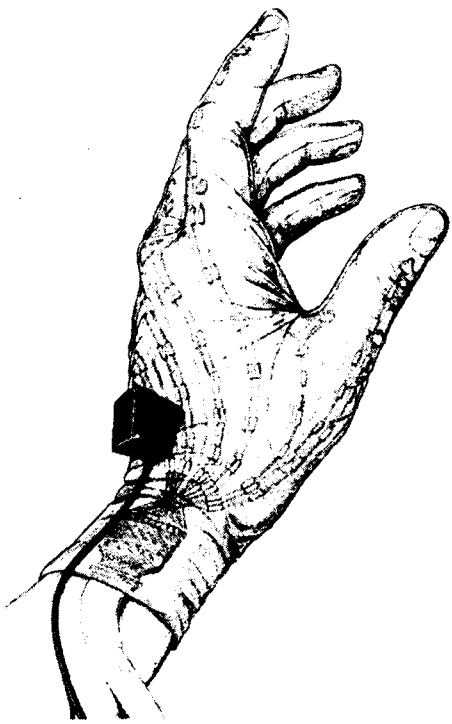


Рис. 6.30. Перчатка данных [6.37]

сложные и опасные действия в космическом пространстве, имитируя движение руки находящегося в космическом корабле астронавта. По-видимому, возможно использовать принципы перчаток данных даже для массива данных, имитирующих движения и реакции всего тела.

Чувства обладают удивительным влиянием на воображение человека. Так, молекулярное моделирование в химии можно осуществить не только с помощью компьютеризованной графики, визуализирующей структуру молекулы, но и путем введения осязательного элемента. С помощью перчаток данных химики могут вообразить, что они ухватили молекулу, чувствуют ее поверхность и манипулируют с ней желаемым образом. Инженеры пытаются генерировать эти эффекты прикосновений и силового воздействия с помощью конкретных технических систем. Человеческая рука, манипулирующая в виртуальной реальности с помощью перчаток данных, должна получать сигналы обратной связи от тех мнимых объектов, к которым она прикасается. Сложность исследуемого мира должна всесторонне имитироваться.

В примерах с астронавтикой и химией виртуальная реальность моделей соответствует действительной реальности в макро- и микрокосмосе. Но вообразите созданный компьютером сценарий фантастических миров, существующих только как электронная реальность. Похоже, что граница между техническими возможностями и научной фантастикой размывается. Люди могут чувствовать себя как мнимые тела в созданной компьютером «телереальности». Существуют предложения о создании так называемых «домашних механизмов реальности», переносящих пользователя в виртуальный мир желаемых и нежеланных

фантазий. Пророки созданных компьютером виртуальных реальностей обещают пользователю на выбор секс с Мерилин Монро или дискуссии с Альбертом Эйнштейном. Авторы научно-фантастических произведений, вроде Уильяма Гибсона, описывают мир созданного компьютером «киберпространства», который будет восприниматься людьми как гигантская галлюцинация:

> Киберпространство. Согласованная галлюцинация, ежедневно испытываемая миллиардами законных операторов в каждой стране, детьми, которые обучаются математическим понятиям... Графическое представление данных, абстрагированное от банков данных каждого компьютера в человеческой системе. Непостижимая сложность. Лучи света, ранжированные в непространстве разума, кластеры и группы данных. Как городские огни, отступающие... [6.37]

Подобные перспективы, конечно, вызывают серьезную критику, это вызов нашему культурному развитию. Люди, запертые в камерах со своей личной или управляемой виртуальной реальностью, которую создают суперкомпьютеры и нейронные сети, представляются ужасным видением вроде Большого Брата Оруэлла.

Помимо этических проблем существуют и некоторые трудные эпистемологические вопросы, возникающие в связи с возможностью существования созданных компьютерами сложных искусственных миров. В традиционной эпистемологии философы, в частности, Беркли и Юм, обсуждали солипсистскую или скептическую точку зрения, согласно которой никакими способами нельзя доказать реальность внешнего мира. Все наши впечатления могут быть иллюзиями, порожденными нашим мозгом и его ментальными состояниями. Подобные вызывающие недоумение проблемы не должны рассматриваться как шутки впавших в детство философов, которые ничего не знают о мире. Они должны вдохновлять нас на проверку и анализ применимости наших доводов. Современные логики и философы разума, например Хиллари Патнем, переформулировали задачу так, что она стала напоминать знаменитый тест *Тьюринга*.

Представим, что человек подвергся операции, которую сделал «дьявольский ученый». Мозг человека был удален из тела и помещен в бочку с питательными веществами, которые поддерживают его живым. Нервные окончания подсоединены к гибридному нейрокомпьютеру, что заставляет человека, мозг которого находится в бочке, испытывать иллюзию, что все совершенно нормально. Все опытные знания человека являются результатом электронных импульсов, передаваемых от компьютера к нервным окончаниям. Если человек намерен поднять руку, обратная связь от компьютера заставит его «видеть» и «чувствовать», что рука поднимается, хотя это будут лишь соответствующие образы в мозгу, а не физические глаз или ухо. Дьявольский ученый может заставить бедного человека испытывать любую ситуацию. Патнем говорит:

> Жертве может казаться, что он сидит и читает эти самые слова о забавном, но совершенно абсурдном предположении, что существует «дьявольский ученый», удаляющий мозги людей из их тел и помещающий их в бочки с питательными веществами, которые поддерживают их в живом состоянии. Предполагается, что нервные окончания связаны с суперкомпьютерами, заставляющими человека, которому

принадлежит данный мозг, испытывать иллюзию, что... [6.38]

Если мы — это «мозг в бочке» в описанном смысле, можем ли мы говорить или думать, что мы — это «мозг в бочке»? Патнем доказывает, что это невозможно. Предположение, что мы на самом деле являемся «мозгами в бочке», вероятно, не может быть правильным, так как оно является самоотрицающим. Такое предположение относится к числу тех, истинность которых требует их ложности. Логическим примером является общий тезис, что все общие утверждения ложны. Если это утверждение истинно, то в силу своей общности оно должно быть ложно. Энистемологическим примером является утверждение «Я не существую», которое является самоотрицающим, если обращено на меня самого. Так, Декарт доказывал, что некто может быть уверенным в своем существовании, если он думает об этом. Предположение, что мы являемся мозгами в бочке, обладает тем же свойством.

Предположим, что мы являемся «мозгом в бочке», заполненной питательной жидкостью, и наши афферентные нервные окончания связаны с супернейрокомпьютером, создающим все входящие в мозг сенсорные сигналы. Предположим, что такая система хорошо функционирует, и обладает, конечно, сознанием и интеллектом. Но ее идеи и представления деревьев, домов и т. п. не имеют никакой причинной связи с реальными деревьями, домами и т. п. во внешнем мире, так как эти идеи и образы созданы нашим супернейрокомпьютером. Таким образом, если мы предположим, что мы — это «мозг в бочке» со всеми перечисленными условиями, тогда слова «бочка», «питательная жидкость» и т. п. имеют отношение не к реальным бочке, питательной жидкости и т. д., а к определенным идеям и образам, которые произвел наш супернейрокомпьютер. Следовательно, утверждение «Мы есть мозг в бочке» ложно (рис. 6.31).

Мы должны отдавать себе отчет, что возможность того, что мы — мозг в бочке, исключается не физикой, а логикой и философией. Физически возможный мир, в котором мы — мозг в бочке, совместим с законами физики. Однако в мысленном эксперименте мы способны даже вывести по необходимости истинные заключения, выходящие за пределы физически возможных миров.

Причиной этих свойств является, по-видимому, структура самоотносимости, типичная для высокоуровневых возможностей системы мозг—разум. В разд. 4.3 и 4.4 мы доказывали, что самоотносимость может быть существенным свойством, делающим возможными сознание и самосознание, причем не только в системе разум—мозг как продукте биологической эволюции, но и в искусственных сложных системах с совершенно другими аппаратными средствами.

Сам Тьюринг предложил хорошо известный тест, который должен решить, обладает ли искусственная система типа компьютера сознанием или нет. Пусть кто-то проведет с помощью клавиатуры беседу с компьютером и аналогичную беседу с неизвестным ему человеком. Если экспериментатор не сможет сказать, в каком случае разговор шел с компьютером, а в каком — с человеком, тогда компьютер обладает сознанием. Короче, вычислительная машина обладает сознанием, если она может пройти тест Тьюринга.

Мысленный эксперимент с «мозгом в бочке» показал, что диалоговый

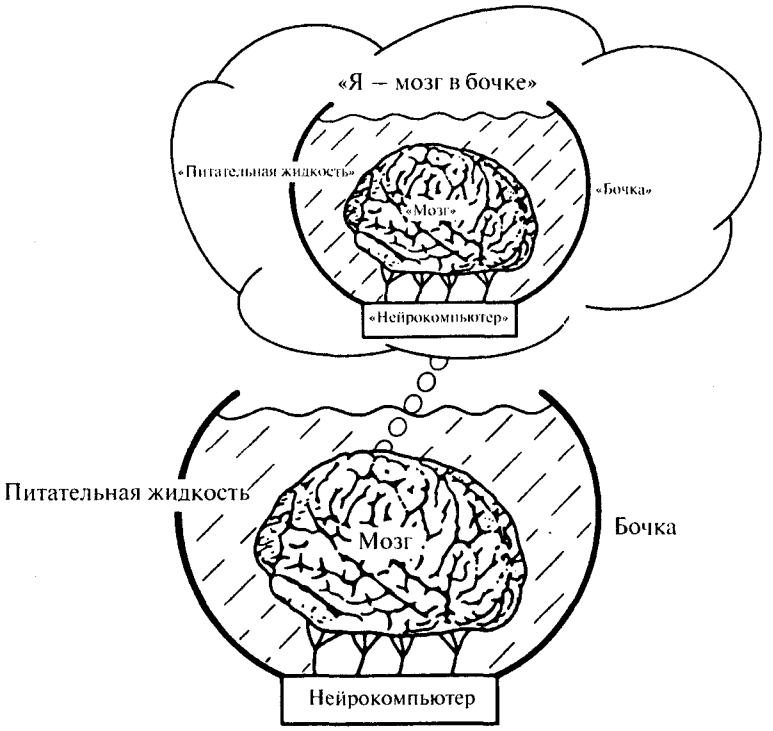


Рис. 6.31. Мозг в бочке думает, что он — мозг в бочке

тест Тьюринга должен быть в определенном смысле ошибочным. Слова и фразы, используемые искусственной системой, не обязательно относятся к реальным объектам и событиям, к которым мы их относим в естественных языках людей. Использование слов и фраз может управляться синтаксичекими схемами, весьма сложным образом запрограммированными в машине Тьюринга. Первое указание на такие возможности может дать программа Вейценбаума ELIZA, имитирующая диалог пациента со своим психологом. В этом смысле тест Тьюринга не может исключить, что разговор машины есть лишь синтаксическая игра, напоминающая интеллектуальный разговор человека. Тем не менее в принципе нельзя исключить, что самоорганизующиеся сложные системы способны выучить конкретные соотношения своих синтаксических слов и правил с прототипными эталонами и впечатлениями своего окружения. В конце концов, вопрос о том, хотим ли мы развивать подобные крайне автономные системы, является этическим.

6.5. От искусственного интеллекта к искусственной жизни

Науки о жизни и вычислительная техника представляют собой не только главные направления развития будущих технологий, но вместе с обычными объектами исследований перерастают в изучение «искусственной

жизни» и «искусственной эволюции». В знаменитой цитате из § 64 «Монадологии» Лейбниц доказывает, что каждый живой организм есть определенный вид «божественной машины» или «естественного автомата, бесконечно превосходящего все искусственные автоматы». Исторические корни тянутся от Лейбница к современным наукам о вычислимости и сложности, которые пытаются моделировать разумное поведение с помощью вычислительных и сложных динамических систем.

Помимо «искусственного интеллекта» (ИИ), являющегося классическим разделом компьютерной науки, новым развивающимся полем исследований в рамках наук о сложности стала «искусственная жизнь» (ИЖ)[8]. Буквально термин «искусственная жизнь» означает жизнь, созданную не природой, а человеком. Для Кристофера Ленгтона из Института Санта Фе, который был организатором первой конференции по ИЖ в 1987 г., жизнь все еще находится в процессе определения самой себя [6.39]. Природная жизнь на Земле организована на молекулярном и клеточном уровнях, а также на уровне организма и уровне экосистем популяций. Искусственная жизнь стремится найти средства моделирования, которые были бы достаточно мощными, чтобы ухватить ключевые понятия живых систем на указанных уровнях возрастающей сложности.

Ключевым понятием в анализе живых систем является различие между генотипом и фенотипом. В биологии *генотип* — это сложное множество генетической информации (генов), закодированной в ДНК организмов. *Фенотип* — это сам физический организм. Развитие фенотипа, направляемое генами генотипа, называется *морфогенезом*. В разд. 3.3 морфогенез был охарактеризован параметрами порядка сложной динамики. В рамках нашего подхода к сложным системам фенотип означает макроявление с параметрами порядка, зависящими от нелинейных взаимодействий генов на микроуровне системы. Сильная нелинейность генетической динамики предполагает большое разнообразие возможных фенотипов. С другой стороны, она предотвращает предсказания, вывод свойств или будущее поведение индивидуального фенотипа.

При рассмотрении искусственной жизни различие между генотипом и фенотипом не ограничено жизненными процессами, основанными на химии углеродных соединений. В теории вычислимости генотип можно обобщить на множество локальных вычислительных устройств («генов»), которые рекурсивно порождают глобальные структуры фенотипов. Существенным предположением является локальность правил. В системе не существует глобальных правил с глобальной информацией о всей структуре. В экспертных системах искусственного интеллекта, которые мы обсуждали в разд. 5.2, также отсутствуют глобальные правила для глобального поведения всей системы.

Примерами подхода, связанного с искусственной жизнью, являются

[8] Искусственная жизнь — научная дисциплина, которая создает и изучает компьютерные модели живых организмов или синтетических систем, которые по своему поведению похожи в определенных аспектах на естественные живые биологические системы. Задача такого исследования — найти основополагающие принципы организации живых систем на Земле и в других мирах. Как направление исследований сформировалась с 1986 г., базируется на биологии, физике, химии и математике. — *Прим. пер.*

так называемые L-системы Аристида Линденмайера, моделирующие нитевидные и ветвящиеся ботанические деревья и другие растения и органы [6.40]. L-системы состоят из наборов правил для вывода цепочек символов по аналогии с формальной грамматикой Наума Хомского. Например, $x \rightarrow y$ означает, что каждое появление символа x в формальной структуре должно быть заменено на цепочку y. Символ x может возникать как в правой, так и в левой части некоторых правил. Таким образом, множество правил может применяться рекурсивно к уже выведенным структурам. Двигаясь шаг за шагом до бесконечности, мы получаем конечные структуры («фенотипы»). Если контекст символической замены не рассматривается, правила называются контекстно-свободными. Если контекстно-свободные правила только заменяют отдельные символы, они эквивалентны операциям конечных автоматов (или так называемых регулярных языков в грамматиках Хомского). Такой тип L-систем может порождать ветвящиеся структуры, такие как сети сосудов сердца на рис. 3.9.

Если в левой части правила содержится более одного символа, правила образуют контекстно-зависимые грамматики, эквивалентные языкам Тьюринга по Хомскому. Очевидно, что в контекстно-зависимых грамматиках применение локальных правил зависит от локально соседствующих символов, соответствующих нелинейным взаимодействиям элементов сложных систем. Если отсутствует контекстная чувствительность, то производимые L-системами глобальные структуры («фенотипы») являются линейно разложимыми.

Формальное преимущество L-систем — это их меры сложности, понимаемые в смысле компьютерной науки (см. разд. 5.2). Фенотип интерпретируется как формальная структура, которая может либо принадлежать, либо не принадлежать классу выводимых структур в определенной L-системе. Таким образом, неразрешимость вопроса в данном классе указывает на более высокую сложность этого класса по отношению к тем, в которых этот вопрос разрешим. Кроме того, можно измерить время, затраченное на выводы в L-системах. В этом случае L-системы можно упорядочить в иерархию по степеням сложности от P- до NP-проблем.

L-системы позволяют получить много разнообразных созданных компьютером форм моделей растений и органов. Иногда формальные правила L-систем можно реализовать наблюдаемыми механизмами из вещества. Например, в супрамолекулярной химии древоподобные полимеры типа дендримеров (см. разд. 2.5) генерируются ветвящимся синтезом повторяющихся бифуркаций, которые могут быть описаны рекурсивными правилами L-системы. Очевидно, что L-системы открывают богатые перспективы в применении компьютерной графики для иллюстрации и визуализации роста молекул и клеток в химии и биологии. Однако, бесспорно, что реальные механизмы молекулярного и клеточного роста должны наблюдаться и измеряться в лабораториях химиков и биологов, а не в ходе компьютерных экспериментов.

Другой пример подхода, основанного на искусственной жизни, — это концепция клеточных автоматов, которую мы обсуждали в разд. 5.4. Простые наборы локальных правил для клеточных автоматов можно интерпретировать как «генотипы», производящие «фенотипы» более или ме-

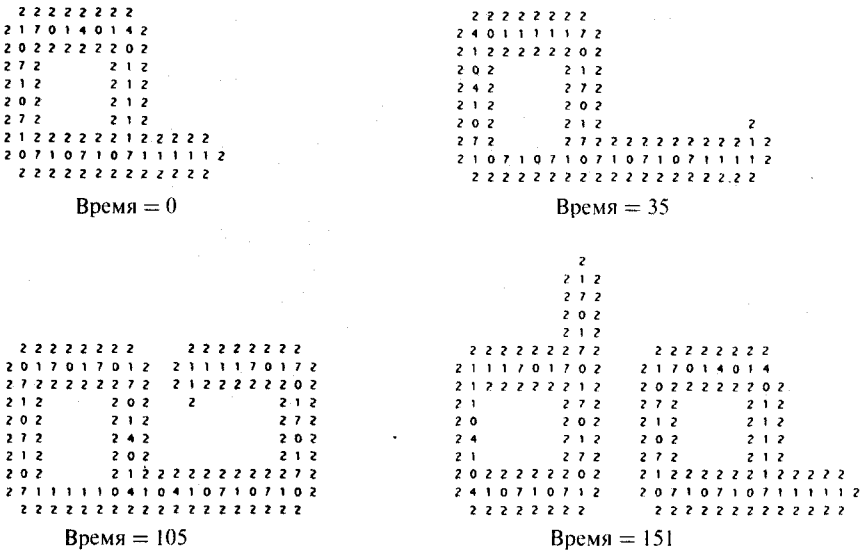


Рис. 6.32. Самовоспроизводящаяся петля Ленгтона с удлиняющимся хвостом и образованием дочерней петли [6.41]

нее сложных структур. Клеточные автоматы позволяют построить замечательные модели, имитирующие свойства биологических систем. Мы уже отмечали идею фон Неймана о самовоспроизводящемся автомате. Хотя эта идея подтверждается строгим математическим доказательством, ее техническая реализация трудна. Причина состоит в требовании фон Неймана, чтобы самовоспроизводящаяся структура была универсальным компьютером, аналогичным универсальной машине Тьюринга. Очевидно, что самовоспроизводящиеся молекулы добиологической эволюции (см., например, модель Эйгена в разд. 3.3) вряд ли были способны к универсальным вычислениям. Поэтому Кристофер Ленгтон отбросил требование универсальности и создал очень простой клеточный автомат, способный воспроизводить сам себя. Он состоит из набора смежных клеток, являющихся конечными автоматами.

На рис. 6.32 каждое число есть состояние одного из автоматов в решетке. Пустое пространство означает клетки в состоянии 0. Состояния 2 образуют оболочку вокруг тракта данных состояния 1 в петле с хвостом на одном конце, напоминающей вирус Q-формы. Внутренний тракт данных передает необходимые для самовоспроизведения данные, например, о парах состояний 70 и 40. С каждым поколением всего клеточного автомата клетки в этом внутреннем слое следуют правилам, влияющим на состояния соседних клеток. Они распространяют сигналы против часовой стрелки вокруг петли. Когда сигналы достигают конца хвоста, каждый сигнал 70 удлиняет хвост на одну единицу, а два сигнала 40 сооружают левый угол в конце хвоста. Для каждого полного цикла сигналов вокруг петли сооружаются другая сторона и угол. После четырех циклов хвост замыкается на себя, и две пет-

ли расцепляются. Таким образом, клеточный автомат петли воспроизводит себя.

Каждая петля продолжает производить дальнейшее потомство, также воспроизводящее себя (рис. 6.33 *а*, *б*). Это развитие продолжается бесконечно долго и порождает расширяющуюся колонию петель. Когда в сердцевине колонии уже нет места для воспроизводства петель, они теряют свои хвосты и «умирают» (рис. 6.33 *в*). Таким образом, колония обретает форму репродуктивной бахромы, окаймляющей растущую «мертвую» сердцевину (рис. 6.33 *г*). Вся картина напоминает рост кораллов с их мертвыми скелетными структурами и живыми клетками на поверхности.

В разд. 5.4 мы отмечали, что клеточные автоматы можно использовать как дискретные и цифровые модели фазовых портретов, описывающих глобальное динамическое поведение сложных систем. Классы сложности клеточных автоматов (рис. 5.21 *б*, *в*) соответствуют степеням сложности аттракторов, систематизирующих динамические системы. Для характеристики динамического поведения клеточных систем в зависимости от их правил перехода Ленгтон ввел некоторый параметр λ [6.42]. На рис. 5.21 *а* показан одномерный клеточный автомат с $8 = 2^3$ правилами перехода, зависящими от 3 соседних клеток и 2 возможных клеточных состояний.

В общем случае клеточный автомат имеет K^N правил перехода для N соседей и K состояний. Произвольное состояние клеточного автомата отмечается как статическое состояние. На рис. 5.21 *б* статическое состояние — белая клетка («нуль»). Если n_q есть число правил перехода в это конкретное статическое состояние, то остается $K^N - n_q$ правил, которые могут распределиться случайно и однородно по остальным $K - 1$ состояниям. Параметр λ определяется

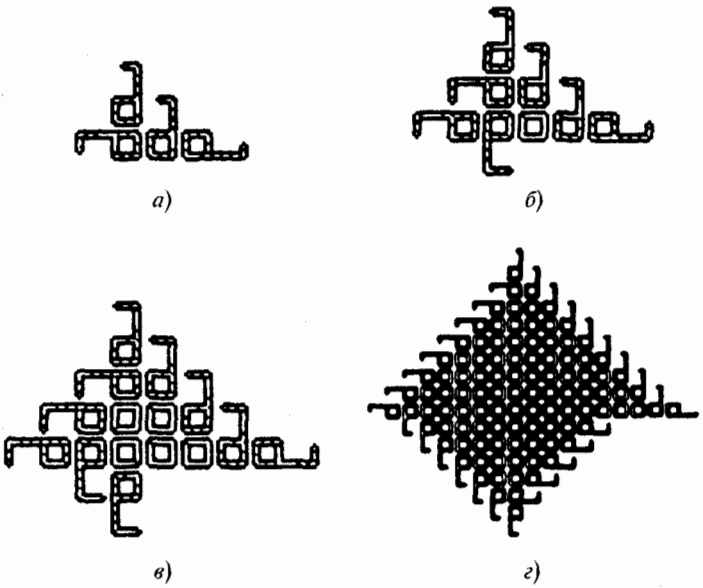


Рис. 6.33. Расширяющаяся колония искусственных кораллов [6.41]

теперь как $\lambda = (K^N - n_q)/K^N$ и может изменяться в диапазоне от 0 до 1. Если $n_q = K^N$, то все правила перехода автомата ведут к статическому состоянию, и $\lambda = 0$. Если $n_q = 0$, то правил перехода в статическое состояние нет и $\lambda = 1$.

Динамический смысл величины λ очевиден. Если значение λ очень мало и стремится к нулю, то через короткое время все изменения прекращаются и конфигурация состояний напоминает молекулы в замерзшем твердом теле. Если значение λ очень велико и стремится к своему максимальному значению, то состояния клеток меняются свободно и хаотично, так что клеточную структуру очень трудно сохранить, как структуру молекул в газообразном состоянии. Физически жизнь в этих экстремальных сценариях не может поддерживаться. Однако между экстремальными ситуациями существует определенная область, в которой динамическое поведение изменяется, но не настолько быстро, чтобы забыть все конфигурации предыдущего состояния. Эта область соответствует жидкому состоянию, которое действительно поддерживает возникновение жизни в процессе биологической эволюции.

Компьютерные эксперименты показывают, что рост параметра λ характеризует спектр динамического поведения от неподвижной точки к циклам, сложной динамике и, наконец, к хаотической динамике. Эти режимы соответствуют классам сложности клеточных автоматов, которые показаны на рис. 5.21 *б* (динамика неподвижной точки), рис. 5.21 *в* (периодическая динамика), рис. 5.21 *г* (сложная динамика), рис. 5.21 *д* (хаотическая динамика). Таким образом, параметр λ соответствует управляющему параметру динамической системы, характеризующему ее фазовые переходы. При промежуточном критическом значении λ_C мы наблюдаем фазовый переход между периодической и хаотической динамикой. В точке λ_C сложность возрастает в смысле возникновения долгоживущих структур. На обоих краях интервала λ длительность переходных процессов для клеточных структур становится меньше, а в середине интервала — больше. В точке λ_C длины перехода расходятся. В области больше λ_C переходный процесс с ростом λ становится короче, хотя динамическая активность развивается со временем быстрее, пока не наступает хаос. Имеется даже свидетельство о фазовом переходе второго рода в точке λ_C, так как средняя энтропия Шеннона роста клеток не меняется скачком, а является гладкой функцией в окрестности λ_C.

С точки зрения компьютерного моделирования, твердотельная, жидкая и газообразная фазы вещества являются только конкретными реализациями динамических систем. Они могут быть также реализованы искусственными системами типа клеточных автоматов в среде[9] компьютера. В рамках такого подхода искусственная жизнь возможна в окрестности критического значения λ_C. В разд. 5.4 мы предположили, каким образом клеточные автоматы могут быть связаны с нашим понятием о параметрах порядка и синергетике. Параметры порядка соответствуют пространственно-временным свойствам клеточных структур типа неподвижной точки, периодического, сложного или хаотического аттракторов.

В синергетическом подходе устойчивые и неустойчивые *коллективные*

[9] Физическая среда для организации канала передачи данных. — *Прим. пер.*

движения (моды) можно различать вблизи критических точек неустойчивости. Последняя вызвана изменением управляющего параметра и приводит к новым макроскопическим пространственно-временным структурам. В клеточных автоматах движения можно характеризовать правилами перехода, которые либо меняют, либо не меняют предыдущие состояния. Устойчивые моды подчиняются неустойчивым модам и могут быть исключены (рис. 6.6 *а*). Остающиеся неустойчивые моды служат параметрами порядка, которые определяют глобальную макроскопическую структуру системы. В общем случае исключение устойчивых мод означает невероятное уменьшение числа степеней свободы. Глобальная динамика параметров порядка может привести к неподвижным точкам, периодическим, колебательным, пульсирующим или хаотическим структурам. Вспомним структуры в динамике жидкости (рис. 2.26 *а–д*) или лазера (рис. 2.27 *а*, *б*).

Если говорить о клеточных автоматах, то динамика неподвижной точки не зависит от флуктуирующих начальных состояний, таких как образование порядка вблизи теплового равновесия. Она соответствует малому значению управляющего параметра λ вблизи нуля. В окрестности критического значения λ_C клеточная динамика обладает чувствительностью по отношению к начальным условиям. Поэтому она имитирует сложную динамику открытых диссипативных систем вроде лазера в физике, реакции Белоусова–Жаботинского в химии или дифференциации клеток организма в биологии. Таким образом, λ_C-режим Ленгтона не ограничивается «искусственной жизнью» как компьютерной имитацией биологической жизни, а соответствует «искусственным диссипативным нехаотическим системам». В разд. 3.3 мы подчеркивали, что с биологической точки зрения недостаточно знать общую схему диссипативной самоорганизации. Мы должны больше знать о трюках органической химии при создании биологической жизни (особенно, о хитроумной комбинации консервативной и диссипативной самоорганизации). Затем мы должны также понять сложную динамику «искусственной жизни» в среде компьютера. В противном случае подход, основанный на клеточных автоматах, оказывается слишком общим для моделирования процессов жизни.

Со времен Дарвина подчеркивалось, что отбор является ключевым механизмом биологической эволюции. Однако существуют также процессы отбора в диссипативных системах, таких как лазеры в физике и реакция Белоусова–Жаботинского в химии. Нелинейность их динамики показывает, что существует не суперпозиция волн или структур, а конкуренция устойчивых и неустойчивых мод. В конце 1960-х гг. Инго Рехенберг [6.43] уже использовал эволюционные стратегии как «шаблоны» для оптимизации технических систем. Джон Холланд применял процессы отбора к алгоритмическим обучающим процедурам [6.44]. Его *генетические алгоритмы* стали ключевым понятием в исследованиях искусственной жизни. В общем случае генетический алгоритм – это метод движения от одной популяции генотипов к новой «более подходящей» популяции. Генотипы могут быть представлены, например, битовыми строками для генов организма или возможными решениями задачи. Основная идея генетического алгоритма сводится к следующему:

1) начинаем со случайно порожденной популяции генотипов;

компьютеру, вирус не является агентом [10]. Очевидно, что компьютерный вирус обладает памятью для хранения информации о самопредставлении. Как в молекулах ДНК, его код — шаблон, используемый вирусом для саморепликации. Похоже, что существует и особый вид метаболизма, преобразующий вещество и энергию. Но, опять же, электрическая энергия используется не вирусом, а базовой компьютерной системой. Кроме того, существуют экологические формы компьютерных вирусов, такие как хищные, территориальные или демонстрирующие самозащиту. Однако до сих пор эти типы поведения инициируются не самими вирусами, а человеком-программистом. В будущем виртуальные компьютерные вирусы могут обладать всеми теми же опасными способностями в виртуальной жизни в киберпространстве, которые хорошо известны в нашей биологической жизни.

В биологии системы искусственной жизни используются как программное обеспечение, «железо» и системы с «человеческой составляющей» [11] [6.48]. Последнее означает технические приемы, используемые в биохимической лаборатории, например, для моделирования молекулярных источников добиологической эволюции в химическом реакторе. Конечно, речь идет об эмпирических экспериментах, воспроизводящих биохимическую эволюцию жизни или создающих новые формы биологической жизни. Правда, эти формы называют «искусственными», так как условия самоорганизации биологической жизни устанавливаются людьми-экспериментаторами. Системы программного обеспечения — это компьютерные программы или сети, моделирующие ключевые понятия жизни или эволюции. Мы уже анализировали подход, основанный на клеточных автоматах. Существуют также компьютерные программы, моделирующие эволюцию животных. Например, в программе GENESYS животные представлены как нейронные сети или конечные автоматы. Гены каждого организма представляются как битовые строки, кодирующие веса нейронной сети или списки переходов конечного автомата. Для того чтобы увеличить моделирующую способность программы, она исполняется машиной, состоящей из массива параллельно подключенных компьютеров. Программа GENESYS напоминает лейбницевское представление о естественных и искусственных автоматах, изложенное в его «Монадологии». Аппаратные модели искусственной жизни используются в робототехнике. В разд. 6.4 мы анализировали первые применения этих моделей в нейробионике. В разд. 2.5 отмечалось самопостроение умелых и «разумных» новых материалов.

В эволюционной робототехнике исследования начались с искусственной эволюции разумных систем. Они показали, что традиционное представление о «разумных» компьютерах не годится, поскольку мозг не выполняет простые программы. Эволюционная теория утверждает, что мозг развился не для выполнения формальных доказательств, а для управления нашим поведением и обеспечения нашего выживания. Таким образом, ра-

[10] По-видимому, здесь имеет место своеобразное соотношение неопределенностей — чем сложнее среда, тем проще могут быть структуры, способные в ней развиваться. И организм, и множество программ достаточно сложны, чтобы использующие их вирусы могли иметь очень простую структуру. — *Прим. ред.*

[11] *Wetware* — люди, рассматриваемые как часть большой компьютерной системы. — *Прим. пер.*

зумность всегда проявляет себя во взаимодействии с поведением нашего тела и взаимодействии с окружающей средой. Вокруг изучения разума, основанного на поведении, возникла новая область знаний, известная также под названием материализованной науки о познании, нового ИИ или *ИИ, основанного на поведении* [6.49]. Эта область служит согласованной базой для изучения естественных и искусственных разумных систем. Цель этой науки — понять сложность и разумность путем создания, конструирования и постройки роботов.

Ясно, что подход, основанный на искусственной жизни, не является однородным полем исследований [6.50]. Однако, по-видимому, он предоставляет много плодотворных инструментов моделирования для исследований в области химии и биологии. Помимо этих практических приложений, существует призрачная мечта об искусственной жизни, базирующаяся на солидной научной основе. Фактическая биологическая эволюция есть всего лишь модель сложной динамики, управляемой сильно нелинейными уравнениями. Сейчас нам известны только некоторые свойства этих уравнений, а в случаях, когда мы знаем эти уравнения, у нас отсутствуют аналитические средства для их точного решения. Даже численные приближения ограничены огромной степенью вычислительной сложности. Тем не менее компьютерные модели и эксперименты могут познакомить нас с возможными сценариями при определенных ограничениях. Такой опыт работы с компьютерными экспериментами может использоваться для создания конкретных условий, при которых могут сами себя строить новые материалы и сами себя организовывать новые формы жизни. Первые шаги уже сделаны. В принципе даже нельзя исключить возникновения *искусственного сознания* [6.51]. Если мы знаем сложную нейродинамику, определяющую состояния сознания (см. разд. 4.3, 4.4, 6.4), то «системы с человеческой составляющей» и «железо» человеческого мозга представляют лишь одну конкретную модель. Новые материалы, жизнь и сознание становятся возможными не благодаря самой материи, а благодаря ее конкретной организации и динамическим законам, которые можно смоделировать в более или менее сложных системах. Таким образом, в длительной перспективе возникает уже этический вопрос о том, желаем ли мы искусственной эволюции с открытым концом, который мы не в силах предсказать.

Глава 7

Сложность и эволюция человеческого общества

Как можно объяснить возникновение политического, общественного и экономического порядка в человеческих сообществах? Глава начинается с краткой истории политических и экономических систем со времен классической античности. Исторические идеи о политическом и экономическим порядке часто иллюстрировались техническими, физическими или биологическими понятиями соответствующего периода. В XVII в. Томас Гоббс попытался перенести законы движения Галилея и Декарта с механики на антропологию и теорию государства. В XVIII в. *физиократы* моделировали экономическую систему абсолютистского государства работой механического часового механизма (разд. 7.1). Либеральные идеи Локка, Юма и Смита возникли на историческом фоне ньютоновской физики. До недавнего времени господствовавшие тенденции в экономике часто вдохновлялись моделями линейной математики, классической механики, термодинамики теплового равновесия и даже дарвиновской теории эволюции. Как и многие физики, экономисты верили в точную вычислимость своих (линейных) моделей и отбрасывали возможность «эффекта бабочки», приводящего к хаосу и исключающего долговременные экономические предсказания (разд. 7.2).

Для описания динамики в экономике необходимы уравнения эволюции множества экономических величин, полученных, возможно, из тысяч секторов и от миллионов агентов. Критическими понятиями для понимания нелинейной динамики в экономике являются фазовые переходы и бифуркации в критических точках. Хаос и случайность приводят к бихевиористскому понятию ограниченной рациональности (разд. 7.3). Основным моментом в подходе, основанном на теории сложных систем, является то, что с макроскопической точки зрения развитие политического, социального или культурного порядка есть не только сумма отдельных намерений, но коллективный результат нелинейных взаимодействий. В разд. 7.4 в рамках подхода, основанного на анализе динамических систем, рассматриваются примеры сложных социальных и культурных проблем: рост городских центров, глобальная миграция и менеджмент в сложных организациях.

Вызовом нелинейной динамике является эволюция сложных коммуникационных сетей в век глобализации (разд. 7.5). Трафик данных можно охарактеризовать фазовыми переходами и аттракторами. Чтобы управлять информационными потоками возрастающей сложности, требуются

дружественные для пользователя методы информационного поиска. В программируемом вычислении информационный поиск поддерживается нейронной сетью и технологией мультиагентов. Однако сложность создания глобальных сетей относится не только к растущему Интернету. Вездесущая компьютеризация (разд. 7.6) представляет собой расширение глобальных сетей, беспроводной доступ к средствам массовой информации, широкополосный диапазон, возможность передачи мультимедиа по стандартным сетям и пакетную маршрутизацию данных. Глава завершается обзором сложных коммуникационных сетей, предлагающих перспективу охватывающей весь мир «глобальной деревни», а также «подчинение» человечества в результате развития современных высоких технологий.

7.1. От полиса Аристотеля до Левиафана Гоббса

Рассмотрев эволюцию материи, жизни, разума-мозга и искусственного интеллекта, мы завершаем книгу вопросом о том, можно ли, по крайней мере частично, описать и смоделировать в рамках теории сложных систем эволюцию человеческого общества. В социальных науках обычно строго различают биологическую эволюцию и историю человеческого общества. Причина состоит в том, что развитие наций, рынков и культур предполагается управляемым целенаправленным поведением людей, т. е. человеческими решениями, основанными на намерениях и ценностях.

С микроскопической точки зрения, мы действительно можем наблюдать отдельных индивидуумов с их намерениями, верованиями и т. п. Но с макроскопической точки зрения, развитие наций, рынков и культур представляет собой нечто большее, чем сумму отдельных частей. Возникновение политического, социального и экономического порядка кажется вызванным процедурами самоорганизации, напоминающими нам определенные фазовые переходы в сложных системах. Тем не менее, избегая всякого редукционистского подхода, такого как натурализм или физикализм, мы рассмотрим характерные интециональные свойства человеческих обществ, а сами сообщества как целеустремленные системы. В разд. 3.4 и 4.3 в рамках подхода теории сложности были рассмотрены модели эволюции популяций животных. Макроскопические структуры – социальный порядок, организация социального поведения, постройка муравейников и т. п. были объяснены с помощью аттракторов сложных систем. Однако различие в сложности между популяциями животных и человеческими обществами колоссально, хотя они имеют общее происхождение и свойства. Таким образом, в последующем изложении понятия «эволюция» и «природа» не могут быть ограничены механизмами эволюции молекул, рыб, муравьев и т. п. Они требуют сложной динамики нового типа, анализ которой должен рассматривать давнюю традицию социальной философии.

Платон и Аристотель были первыми философами, попытавшимися объяснить возникновение политического, социального и экономического порядка в человеческих обществах. Они проанализировали структуру греческого *полиса*, ставшего зародышем всех западных обществ и государств. В греческой античности *полис* (πόλις), например Афины, был маленьким городом-республикой, который можно сравнить с более поздними итальянскими государствами Флоренцией и

Венецией в эпоху Ренессанса и, возможно, со швейцарскими кантонами в наше время. Греческий полис был маленьким, но политически и экономически почти автономным государством и обществом [7.1]. Греческие философы предложили идеализированную модель, которая более или менее реализовывалась на исторических примерах.

Платон различал несколько переходных стадий, которые должен пройти полис, прежде чем достичь конечной цели гармоничного государства. На первой стадии граждане должны обучиться разным ремеслам и профессиям, коммерции и торговле, с тем чтобы удовлетворить различные потребности всего общества. Платон полагал, что граждане полиса должны специализироваться в соответствии со своими талантами. Граждане должны организоваться для совместной работы. Платон предполагал, что обмен товарами и услугами за счет спонтанной самоорганизации приведет к равновесию труда и потребления. Такое экономическое состояние равновесия характеризуется «справедливыми» ценами.

Однако платоновский идиллический мир совместной работы, конечно, неустойчив. Люди пытаются преследовать свои интересы и получать прибыль. Они эгоистичны, самонадеянны, полны зависти и ведóмы страстями. В результате возникают конфликты, и политическая мощь должна быть организована так, чтобы избежать разрушения государства. Платон считал, что государством должна править аристократия, состоящая из лучших и мудрейших граждан («философы-короли») [7.2]. Их правление должно сохранить всю систему с ее конфликтными флуктуациями в состоянии равновесия. Хорошо известно, что Платон не доверял демократии, так как, по его мнению, обычные люди без философского образования не способны распознать истинную идею справедливости. Платон верил в вечную иерархию этических ценностей, находящихся за изменчивым и мимолетным миром видимостей. Таким образом, существует объективная мера ценностей, которую граждане должны осознавать, с тем чтобы избежать хаоса и удержать систему в состоянии гармонии.

Очевидно, Платон защищал централизованную систему политической власти. На языке теории систем — имеется центральный процессор, контролирующий все действия и реакции элементов системы. Как лапласовский демон в науке, существует платоновский политический миф об идеальном, мудром и хорошем политике, приводящем систему к гармоничному равновесию. В маленьком городе, таком как греческий полис, идея платоновской аристократии, состоящей из лучших «философов-королей», может быть реализована при определенных критических обстоятельствах. Тем не менее опыт реальной истории показал, что даже хорошо образованные и интеллигентные политические лидеры не свободны от искушений злоупотребить своей властью. В наши дни платоновскую аристократию лучших можно сравнить с возможностями экспертов в сложных системах, основанных на знаниях. Но в современных условиях высокоразвитых информационных и компьютерных технологий миф Платона о мудром и добром политике легко может превратиться в ужасный оруэлловский сценарий «Большого Брата», обладающего абсолютной властью.

Вторым знаменитым философом, имевшим отношение к греческому по-

лису, был Аристотель [7.3]. Он считал, что люди, по своей природе, являются общественными существами, которые хотят выжить. Кроме того, они являются политическими существами, так как хотят жить хорошо и счастливо. Аристотель верил в органическое развитие человеческого общества, ведомое социальной и политической природой его членов. Социальная и политическая динамика достигает конечного состояния равновесия, когда реализуются социальная и политическая формы полиса. Аристотель описывал социальную и политическую динамику как природные процессы.

Однако динамический процесс в природе представляет собой не причинное движение в механике, а органический рост, как у растения или *животного, стартующий из начального* состояния семени и стремящийся к конечному состоянию зрелой формы (ср. разд. 2.2). Таким образом, аристотелевская модель общества натуралистична, в том смысле, что люди приводятся в движение импульсами их социальной и политической природы. Но только инстинкт социальной организации для выживания роднит людей и животных. Люди отличаются по своей политической природе стремлением достичь справедливого общества. В знаменитой формулировке Аристотеля люди определены как разумные существа, стремящиеся к истине в науке и философии, и как политические существа, стремящиеся к справедливости в обществе.

Справедливость означает естественное состояние завершенности, когда общество упорядочено в гармоничных пропорциях и находится в равновесии, напоминающем статическое равновесие на весах Архимеда (рис. 7.1). Таким образом, экономическое равновесие в аристотелевском обществе измеряется «*справедливыми ценами*», соответствующими «естественной» ценности товаров и услуг. Экономика была частью моральной философии справедливости и государства Аристотеля. Он различал коммутативную (смягчающую) справедливость (*iustitia commutativa*), дей-

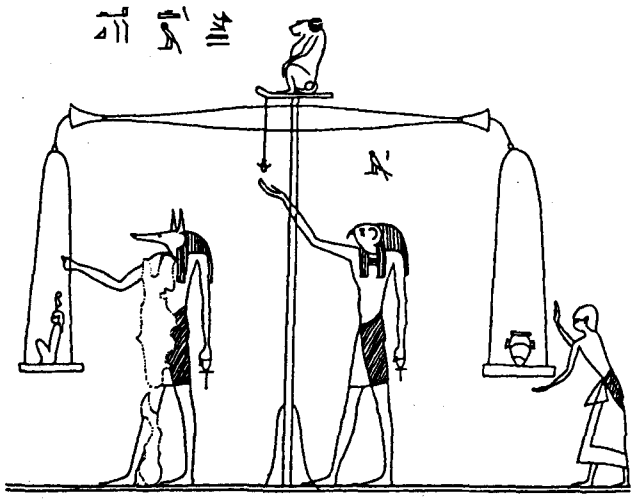


Рис. 7.1. Последний суд Озириса (Египет, II в. до н. э.)

ствующую в частных операциях обмена и делах граждан, и дистрибутивную справедливость (*iustitia distributiva*), касающуюся взаимоотношений граждан и государства. Аристотелевская модель экономической и политической справедливости стала ведущей идеей в Средние века. Очевидно, что в те времена она соответствовала аристотелевским представлениям о природе.

Механистический взгляд на природу был обоснован в трудах Галилея, Декарта и других ученых, и получил завершение в великой системе классической физики Ньютона. В знаменитой книге «Левиафан, или материя, форма и власть государства церковного и гражданского» (1651) Томас Гоббс (1588–1678) разработал механическую модель современного общества и государства [7.4]. Гоббс жил в период драматических политических изменений, происходивших в конце Средних веков и в начале современной эпохи. Традиционная монархия и аристократия Средневековья потеряли свою религиозную легитимность. Европейские общества и государства превращались в руины и хаос в кровавых гражданских войнах. Как ученый, Гоббс был поражен новым механическим методом Галилея и его успехами в физике. Он попытался использовать этот метод для построения механистической модели современного ему общества, не используя устарелую традиционную метафизику для обоснования ее легитимности в науке и политике.

Согласно галилеевской механике, существует аналитический, или разрешающий, метод разделения системы («тела») на отдельные элементы, а также синтетический метод сборки и соединения отдельных строительных блоков в первоначальную систему. Коротко говоря, целое есть сумма своих частей. Очевидно, что Галилей описывал ключевой принцип суперпозиции, обосновывающий линейность механистического взгляда на мир. Действительно, механическая система, например часы, может быть разобрана на отдельные элементы вроде зубчатых колесиков и других механических частей, которые вместе обеспечивают идеальную работоспособность часов.

Гоббс попытался перенести закон движения из механики в антропологию и теорию государства. Предполагается, что людьми правят аффекты и эмоции, точно так же, как физические тела приводятся в движение механическими импульсами. Главным аффектом является индивидуальный инстинкт самосохранения и выживания. По мнению Гоббса, естественным правом человека является следование инстинкту выживания, что приводит к насилию и жестокости по отношению к другим людям. Таким образом, в естественном состоянии человеческого общества по Гоббсу происходит непрерывная борьба всех против всех (*bellum omnium contra omnes*), не приводящая к какому-либо состоянию равновесия.

С другой стороны, люди с их сложными потребностями могут выживать только в обществе. Поэтому их разум диктует первый естественный закон поиска мира. Чтобы реализовать «закон мира», необходим второй закон, требующий заключения общественного договора. Гоббс считал, что в этом общественном договоре все граждане должны передать свое естественное право власти абсолютному суверену («Левиафану»), и только этот суверен будет наделен легитимным правом применять политическую власть и править государством. На современном языке общественный договор Гоббса узаконивал монополию го-



Рис. 7.2. «Левиафан» на титульном листе книги Гоббса

сударства на власть, с тем чтобы сохранить общество в состоянии абсолютного равновесия.

Гоббс определил суверена как «сумму всех индивидуальностей», принимающих участие в общественном договоре. Очевидно, что его идея является применением галилеевского механического принципа суперпозиции, или линейности. На титульном листе книги Гоббса (рис. 7.2) для иллюстрации политического принципа линейности Гоббса тело Левиафана изображено как огромная сложная система, состоящая из отдельных личностей.

«Фазовый переход» от естественного состояния хаоса к государственному порядку и равновесию реализуется общественным договором всех граждан и в этом смысле самоорганизацией. Но в этом случае конечное состояние Левиафана является централизованной и детерминистской системой без всякой государственной «степени свободы» для ее граждан. Гоббс сравнивал экономическое обращение товаров и денег с циркуляцией крови, которая была открыта английским врачом Уильямом Гарвеем. Доход и расход сравнивались с поступающим в сердце и выходящим из него потоком крови, причем само сердце было насосом, обеспечивающим всю циркуляцию.

Механистический взгляд на экономику позднее разрабатывал французский ученый Франсуа Кене (1694–1774), основатель школы физиократов в экономике [7.5]. Кене, начинавший в качестве врача при дворе Людовика XV, написал книгу о «животной экономике» (*oeconomie animale*) человеческого тела, что вдохновило его на идею экономики общественного организма. Ведущей философией физиократов был механистический взгляд на мир Декарта.

Итак, экономическая система была смоделирована как механизм из шестеренок, пружинок и грузов. Часы есть последовательно работающая система с запрограммированными функ-

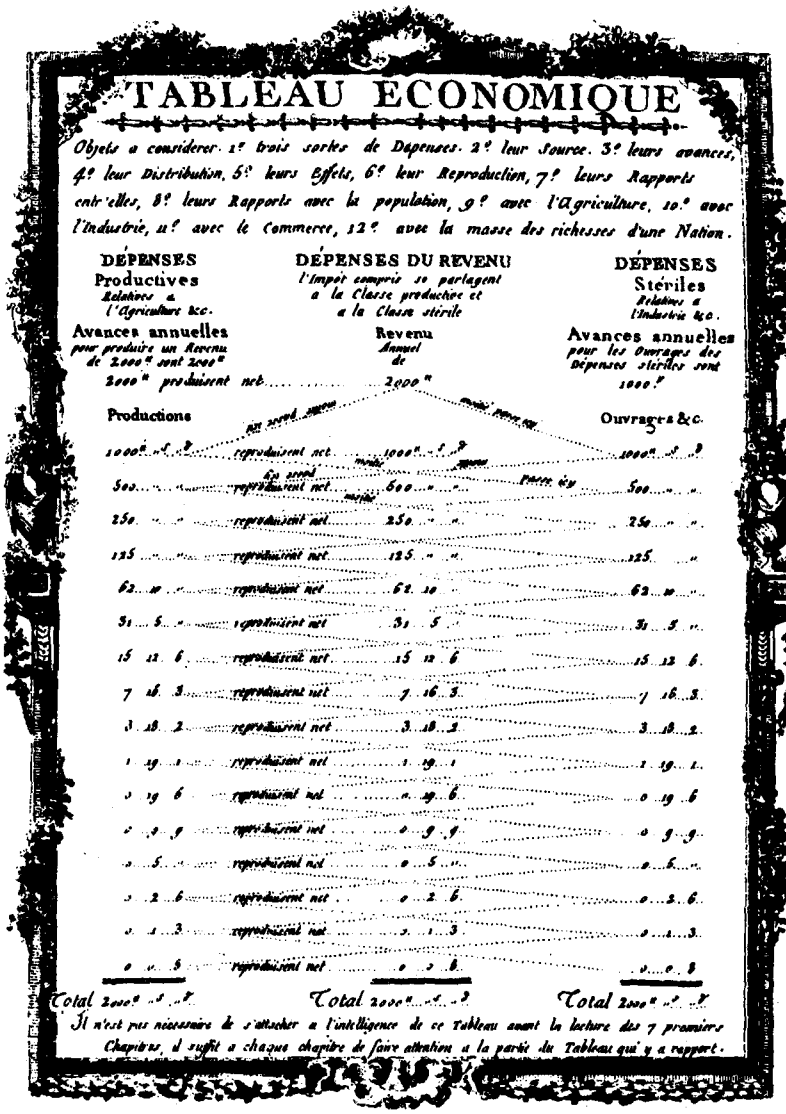


Рис. 7.3 а. «Экономическая таблица» физиократов [7.7]

циями. Аналогично, физиократическая экономика не может регулировать сама себя. Успехи в сельском хозяйстве, явившиеся движущей силой физиократической экономики, можно сравнить с грузами и пружинками часов. Экономическое производство сопоставляется со сложными движениями в часах. Следовательно, экономическое благосостояние гарантируется только регулярным экономическим обращением, аналогичным работе часов.

Для наглядного представления обращения богатства между социальными классами фермеров («производя-

щий класс»), *ремесленников* («бесплодный класс») и землевладельцев физиократы использовали специальную таблицу (*Tableau économique*). На рис. 7.3 *а* экономический период начинается с момента, когда класс землевладельцев распределяет полученную им ренту (например, 200 миллионов луидоров) на пищу и другие сельскохозяйственные продукты фермерам (левая колонка; 100 миллионов луидоров) и на покупку товаров у ремесленников (правая колонка; 100 миллионов луидоров) [7.6]. Оба дохода позволяют двум классам фермеров и ремесленников производить новые товары. Так как фермеры используют продукты ремесленников, а ремесленники используют продукты сельского хозяйства, деньги должны обращаться между колонками соответствующих классов. Это обращение имеет форму зигзага, пока в конце таблицы не будет выплачена чистая прибыль.

Однако расходование чистой прибыли приводит к новым доходам, что делает возможным производить новые расходы и начать новый экономический круговорот. Механика регулярного обращения и повторяющегося воспроизводства чистой прибыли была проиллюстрирована часами с катящимися шариками (рис. 7.3 *б*) [7.7]. Часы измеряют время с помо-

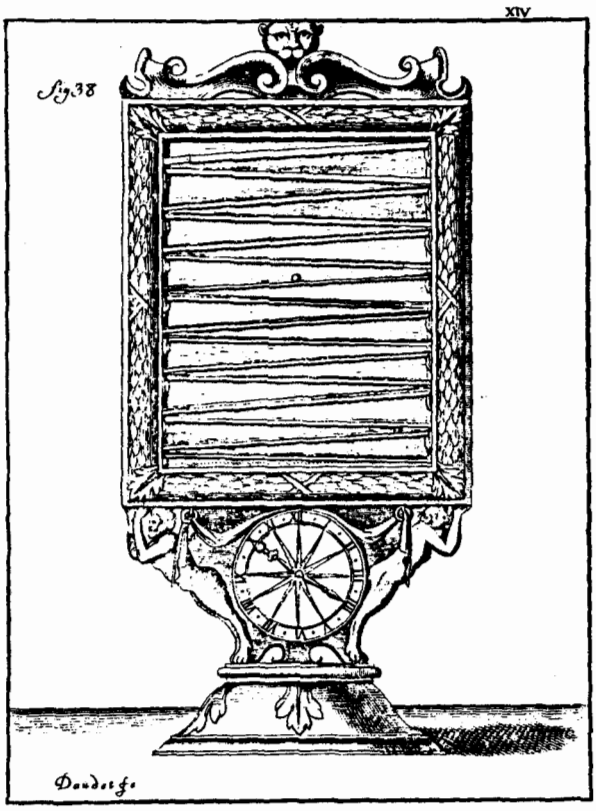


Рис. 7.3 б. «Экономическая таблица» физиократов, наглядно изображенная зигзагообразным путем скатывающегося шарика в часовом механизме [7.7]

щью шариков, скатывающихся вниз по наклонному зигзагообразному пути. Завершив период обращения, шарики поднимаются на вершину системы и процесс повторяется. Очевидно, что распределение чистой прибыли за период обращения можно сравнить с зигзагообразным путем скатывающегося шарика в часовом механизме. Повторение периода экономического обращения соответствует подъему шарика и его скатыванию вниз по зигзагообразному пути.

Экономисты-физиократы использовали механические модели в рамках декартовой механики. Их причинный детерминизм без всякого типа саморегуляции или индивидуальной свободы полностью соответствовал политической системе абсолютизма. Граждане были сведены к работающим элементам в государственной и экономической машине.

7.2. Экономика Смита и рыночное равновесие

В то время как физиократы строили свою экономическую модель на основе механики Декарта, Адам Смит опирался на классическую физику своего великого предшественника сэра Исаака Ньютона. В декартовой механике все физические события сводятся к эффектам соприкосновения взаимодействующих элементов, например, зубчатых колесиков в часах или соударяющихся шаров. Таким образом, физики — последователи Декарта — создавали гипотетические механизмы, которые часто были ненаблюдаемы. Например, преломление света объяснялось взаимодействиями крохотных шариков из стекла. Законы столкновения и импульс были ключевыми в физике Декарта.

Ньютон подверг декартову механику критике, произнеся знаменитую фразу: «*Гипотез не измышляю*». Закон тяготения Ньютона был математически выведен из аксиом механики и эмпирически подтвержден предсказаниями и экспериментами. Однако Ньютон отказался от какого бы то ни было объяснения дальнодействующих эффектов тяготения в пустом пространстве (*actio in distans*) с помощью гипотетического ненаблюдаемого передаточного механизма.

В небесной механике Ньютона материальные тела движутся, находясь в динамическом равновесии, определяемом невидимыми силами тяготения. Физическое понятие о свободно движущихся отдельных телах, находящихся в динамическом равновесии, соответствует либеральным идеям о свободной экономике и обществе с разделением независимых государственных властей. В противоположность либеральным идеям, декартов часовой механизм природы соответствует, скорее, государственной машине абсолютизма, в которой граждане представляются зубчатыми колесиками.

Знаменитый английский философ Джон Локк (1632–1704) оказал влияние не только на эпистемологию и методологию ньютоновской физики, но и на политическую теорию современной ему демократии и конституции. Он задался вопросом, почему человек соглашается отказаться от своей абсолютной свободы в естественном состоянии и подчинить себя контролю государственной власти. Локк доказывал, что обладание собственностью, которую человек имеет в естественном состоянии, очень ненадежно и небезопасно, так как в состоянии неограниченной свободы любой другой хочет отнять эту собственность. Таким образом, состояние природы неустойчиво и должно перейти

к равновесию государственных сил. Для Локка «фазовый переход» от состояния природы к обществу с правительством определяется желанием людей сохранить свою собственность.

Однако наличие правительства не подразумевает несвободного механизма Левиафана. Это состояние баланса («равновесия») с независимыми государственными властями, в частности, судебной и исполнительной. Так как законы принимаются парламентом как представительным органом общества, то это является важной обратной связью с гражданами, которые отказываются от своих естественных свобод в той степени, которую требует сохранение их самих и их собственности: «И все это должно быть направлено ни на что другое кроме мира, безопасности и общественного блага для людей» [7.8]. Исторически идеи Локка о демократии, разделении властей, собственности и терпимости оказали решающее влияние на американскую и французскую конституции.

Великий шотландский философ Дэвид Юм (1711–1776) был одновременно и более критичен, и более точен, чем Локк, как в эпистемологии, так и в политической теории. В эпистемологии он учил, что человеческое сознание управляется соединением ощущений и чувств, которые могут быть усилены или подавлены внешними событиями (см. разд. 4.1). Таким образом, даже в ньютоновской физике не существует абсолютной истины, а имеется только полезный метод с более или менее правдоподобными результатами. Аналогично, не существует вечной этической ценности, например справедливости, определяющей человеческое поведение. Этические понятия можно оценить только по их индивидуальной или общественной полезности [7.9]. В целом политические институты находят оправдание в своей полезности, когда общество принимает или отвергает их. Таким образом, Юм стал предшественником утилитарной этики и политической философии. Его друг и шотландский соотечественник Адам Смит был, вероятно, вдохновлен такой скептической антропологией эгоистичного поведения в человеческих сообществах.

Публикация знаменитого труда Смита «Исследование о природе и причинах богатства народов» (1776) часто отмечается как рождение отдельной науки. Но все же Смит был профессором моральной философии, а Ньютон был профессором натуральной философии. На самом деле Смит пытался объединить этику, экономику и политику, а Ньютон встроил свою физику в космические и даже религиозные рамки. В своей «Теории нравственных чувств» Смит анализирует роль симпатии для людей [7.10]. В «Богатстве народов» предполагается, что важнейшим толчком для экономики является эгоистичное поведение людей.

В обеих этих книгах Смит пытается применить ньютоновский метод к этике и экономике [7.11]. По описанию Смита, ньютоновский метод состоит в том, что ученый закладывает «в основу определенные принципы, первичные или доказанные, с помощью которых затем мы объясняем различные явления, связанные вместе одной цепью». В манере Юма Смит объясняет происхождение науки не любовью человека к истине, а простым желанием максимизировать «удивление, изумление и восхищение». Великой целью человеческой жизни является постоянное, неизменное и непрерывное стремление улучшить положение людей. Ко-

ротко говоря, эгоизм людей стремится максимизировать функцию благосостояния.

Согласно ньютоновскому девизу «*Гипотез не измышляю*», Смит подчеркивал, что человеческий эгоизм является не теоретической конструкцией экономистов, а вытекающим из опыта эмпирическим фактом. Эгоизм — сильный и естественный стимул для поведения отдельных человеческих существ, и поэтому он является человеческим правом. Но взаимодействия нескольких отдельных микроинтересов через механизм рынка достигают общего макроэффекта благосостояния. Две знаменитых цитаты из «Богатства народов» Смита: «*Я* никогда не знал, что много добра совершили те, кто пытался обменивать общественное благо» [7.12]; «Не от благожелательности мясника, пивовара или булочника ожидаем мы получить свой обед, а от соблюдения ими своих собственных интересов» [7.13].

Механизм рынка регулируется предложением и спросом, приводящими конкурирующие микроинтересы к макроэффекту благосостояния и «богатства народов» в условиях равновесия рынка. С механистической точки зрения, представляется, что микроинтересы приводятся к общему макросостоянию равновесия «экономическим демоном» или механическим источником. Согласно методу Ньютона, Смит предпочитает картину «невидимой руки», направляющей микроинтересы, что напоминает «невидимую» дальнодействующую силу тяготения в астрономии. Очевидно, что Смит описывает экономику как сложную систему многих конкурирующих микроинтересов. Динамика их взаимодействий — это самоорганизующийся процесс с конечным состояние равновесия между спросом и предложением.

Ценность товаров измеряется деньгами. Но денежная мера должна использоваться с осторожностью. Необходимо различать «рыночные цены», достигаемые в результате рыночного механизма, и «естественные цены» или реальную стоимость товара. Экономист должен найти «меру ценности», чтобы иметь возможность скорректировать стоимость денег. Таким образом, Смит уже имеет в виду политическую экономию, основанную на теории стоимости. Стоимость необходима для оценки общественного продукта. На рис. 7.4 показана предложенная Смитом экономическая система в виде схемы с обратной связью, где r — спрос товара, c — предложение товара, m — рыночная цена и n — естественная цена [7.14].

Однако Смит не вводил, подобно Аристотелю, «справедливую» цену на основе этических идеалов, в частности, справедливости. В своем ис-

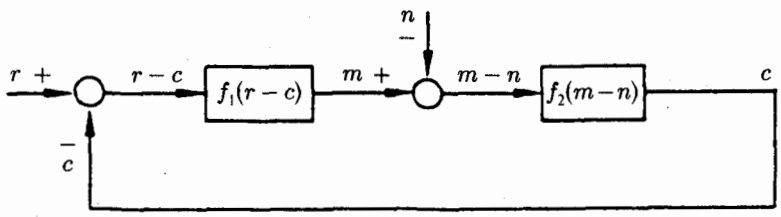


Рис. 7.4. Предложенный Адамом Смитом самоорганизующийся процесс спроса и предложения в виде схемы обратной связи [7.14]. Функции f_1 и f_2 характеризуют экономические механизмы, определяющие производство и потребление

следовании он анализировал «природу» и «причины» «богатства народов», основываясь на реальных явлениях, касающихся природы человека, например, на эгоизме. Что касается естественных цен на товары, Смит и ранние экономисты-классики, например Давид Рикардо, пытались найти абсолютную меру стоимости, такую как золото, зерно или труд.

Для Рикардо общая мера должна была объясняться его трудовой теорией стоимости. Как и Смит, Рикардо был знаком с основными законами классической физики. Поэтому он считал, что некоторые из выводов экономики «столь же точны, как и законы тяготения» [7.15]. Шли годы, менялись экономические и политические проблемы, и на теорию Рикардо экономического роста, ренты и труда оказали влияние исторические условия его времени, начала XIX в. Прежде всего, это были экономические проблемы обеспечения продовольствием растущего населения, которые уже рассматривались Мальтусом.

Джон Стюарт Милль (1806–1873), британский философ и экономист, проявлял большой интерес к методологии экономики. Он определил «политическую экономию» как аксиоматическую систему дедуктивного анализа, покоящуюся на психологических предпосылках и абстрагирующуюся от всех внеэкономических сторон человеческого поведения. Эти абстракции сравнивались с возмущающими причинами, такими как трение в механике:

> Возмущающие причины подчиняются своим законам, как и те причины, которые при этом возмущаются, подчиняются своим; согласно законам возмущающих причин, природа и количество возмущения могут быть предсказаны априори... Влияние частных причин должно тогда добавляться к эффекту общих причин или вычитаться из него [7.16].

В этой цитате Милль, очевидно, описал принцип причинности в классической физике, который, по существу, делал возможным долговременный прогноз: похожие причины вызывают похожие следствия. Таким образом, методология экономики Милля согласуется с классической физикой в лапласовском духе и предполагает, что если приближенно известны начальные условия, то с помощью экономических законов можно осуществить приближенный прогноз. Кроме того, аксиоматические гипотезы Милля определяли не сложную экономическую реальность, а упрощенную модель экономического поведения.

Таким образом, Милль был первым экономистом-теоретиком, который явно оперировал с фиктивным «экономическим человеком» (*homo oeconomicus*[1]), а не с тем реальным человеком во всей его сложности, который первоначально был предметом исследований Смита. Общая гипотеза об экономическом человеке, максимизирующем определенные экономические утилитарные функции, эмпирически основана на некотором опыте, а именно, на самоанализе и наблюдении за друзьями Милля, но не выведена из специальных наблюдений *или конкретных* событий. Аналогично, ньютоновский всеобщий закон тяготения был эмпирически подтвержден специальными наблюдениями падающих тел или движения небес-

[1] Oikonomika (*греч.*) – домашнее хозяйство, в отечественной литературе фигурируют две латинизации этого слова: oeconomicus (экономический) и economicus. Второе написание встречается втрое чаще, первое – ближе к греческому первоисточнику. – *Прим. ред.*

ных тел, но не выведен из этих событий. Методология Милля соответствует новым взглядам на роль формальных систем и моделей в физике XIX в.

Предшественники современной математической экономики, такие как Вальрас и Парето, распространили использование математических методов физики на экономику. Оба мыслителя были представителями так называемой Лозаннской школы. Классические теоретики уже неявно руководствовались физико-математическими понятиями. Они говорили о более или менее грубом соответствии между игрой экономических сил и механическим равновесием. На самом деле предшественники математической экономики позаимствовали значительную часть своего словарного запаса у механики и термодинамики, например, слова равновесие, стабильность, упругость, расширение, инфляция, сжатие, поток, давление, сопротивление, реакция, движение, трение и т. п. [7.17].

В 1874 г. Вальрас развил идею Смита о том, что максимизирующее поведение потребителей и производителей приводит к равновесию между количествами спроса и предложения каждого продукта и рыночного фактора экономики [7.18]. Начиная с Вальраса, общая теория равновесия стала ведущей концепцией, потребовавшей доказательств существования равновесия в математических моделях экономики. Экономисты-математики попытались изолировать элементы сложной системы от окружающей их среды, которая задавалась внешними параметрами. Однако, если внешние параметры сами зависят от влияния всей системы, то разделение системы и окружения и пренебрежение реально существующей обратной связью делает невозможным построение адекватной экономической модели.

В целом классические экономисты пытались свести сложность экономической реальности к нескольким типичным предположениям, характеризующим их линейные и механистические модели. Прежде всего, они верили в домысел о существовании для каждого человеческого действия рациональной экономической личности (*homo oeconomicus*). Индивидуальное поведение этих личностей, например, на рынке должно рассматриваться изолировано, как целое. Человеческое поведение описывается общими поведенческими схемами, абстрагированными из индивидуального поведения. Таким образом, предполагается, что индивидуальное человеческое поведение регулярно и предсказуемо, как элементы механической системы, подчиняющейся определенным математическим законам движения. Если начальные условия и окружающая среда известны и точно измеримы, то индивидуальное поведение внутри окружающей среды считается детерминированным, как поведение молекул газа.

Линейность экономических моделей следует из принципа суперпозиции, предполагающего, что общество определяется суммарными действиями своих членов. Принцип суперпозиции требует, чтобы общество, как целое, не отличалось от суммы индивидуальных действий его членов. Очевидно, линейные модели абстрагируются от непредсказуемого и иррационального индивидуального поведения, от ограничений, связанных с окружающей средой, и от неаддитивных («нелинейных») и синергетических взаимозависимостей между индивидами и их действиями.

Эти линейные принципы методологии полностью соответствуют фи-

зическому мировоззрению Лапласа. Они все еще оказывают сильное влияние на основное направление экономики в наши дни, хотя сама физика претерпела в XX в. ряд драматических революций, таких как квантовая механика с характерным соотношением неопределенности. Однако соотношение неопределенностей Гейзенберга есть следствие конкретных соотношений между квантово-механическими операторами, зависящее от планковской постоянной, и по-видимому, не имеющее отношения к размерам экономического мира. Тем не менее квантовый формализм Шрёдингера или Гейзенберга является линейным (см. разд. 2.3). Тот факт, что классическая линейная динамическая система ведет себя регулярным образом, позволяет делать точные предсказания. Нелинейная модель, демонстрирующая хаотичное поведение, а также невозможность долгосрочных прогнозов, рассматривалась как плохой экономический инструмент.

В XX в. экономисты-математики все больше отказывались от физикализма, например, Лозаннской школы, которая пыталась определить экономику как классическую физическую систему. Экономисты пытались найти свои собственные базовые математические инструменты. По техническим причинам были подтверждены предположения о линейных динамических моделях. Такая формальная позиция выражена в следующем заявлении Джона Мейнарда Кейнса в письме к Рою Хэрроду в 1938 г.:

> Мне кажется, что экономика является ветвью логики, способом мышления, и вы не отвергли достаточно твердо попытки... превратить ее в псевдо-естественную науку... Экономика — это наука мышления в терминах моделей, соединенная с искусством выбора тех моделей, которые существенны для современного мира [7.19].

Под влиянием характерных экономических крахов (например, конца 1929 г.) Кейнс и другие подчеркивали, что экономическая система не способна к саморегуляции автоматически. «Нестабильность капитализма» стала популярной версией так называемой доктрины кейнсианства. Так, было предложено стабилизировать экономическую систему извне с помощью конкретных инструментов типа налогово-бюджетной политики. Линейные модели особенно активно использовались теоретиками-неоклассицистами, которые снова сконцентрировались на исследовании равновесной экономики.

Нелинейные подходы предпочитались, главным образом, теми экономистами, которые чувствовали неудовлетворенность классическим идеалом равновесной экономики. Так, авторы-кейнсианцы, не будучи знакомыми с математическими методами нелинейности, часто критиковали линейную схему равновесных теорий.

С появлением книги Джона фон Неймана и Оскара Моргенштерна «*Теория игр и экономическое поведение*» (1943) началась новая эпоха в линейной математической экономике [7.20]. Эта знаменитая книга повлияла на линейное программирование, операционное исчисление и даже на математическую социологию. В «*Теории игр*» фон Нейман и Моргенштерн предположили существование рационально мыслящих личностей, которые пытаются максимизировать свой выигрыш в единицах определенной выгодности. В общем случае класс возможных действий $a_1, \ldots, a_m$ и класс возможных состояний $s_1, \ldots, s_n$ используются для образования пар (a_i, s_j),

где $1 \leqslant i \leqslant m$ и $1 \leqslant j \leqslant n$, которые отображены на выгодности u_{ij}. Возможные выгодности упорядочены в виде $(m \times n)$-матрицы.

Был предложен ряд критериев рациональных действий, например, для решений в условиях неопределенности. Под неопределенностью понимается то, что неизвестны вероятности возможных выгодностей. Главным образом, используется так называемый *максиминный критерий выгодности*. В этом случае каждое возможное действие a_i ассоциируется с индексом, являющимся минимумом значений выгодности, т. е. наименьшим значением в i-й строке матрицы выгод (u_{ij}). Тогда правило гласит: выбери то действие, индекс которого максимален. Короче, правило максимина выбирает действие, максимизирующее выгодность в самом неблагоприятном случае. Правило можно очень легко и механически применять к матрице выгодности.

Представьте следующий пример, принадлежащий философу Карлу Густаву Хемпелю [7.21]. Имеются две урны с шарами одинакового размера, которые нельзя отличить друг от друга с помощью осязания. В первой урне лежат шары из свинца и платины. Во второй урне лежат шары из золота и серебра. Игроку разрешается взять в качестве подарка один шар из любой урны. Вероятность распределения шаров в урнах игроку неизвестна. Выгодности шаров оценены значениями 1000 (платина), 100 (золото), 10 (серебро) и 1 (свинец).

Правило максимина предлагает выбрать вторую урну. В этой урне самый неблагоприятный случай — это серебряный шар, а самый неблагоприятный случай в первой урне — свинцовый шар. Очевидно, что правило максимина соответствует пессимистическому взгляду на мир. Участник игры предполагает, что его противник крайне недружелюбен. В этом случае правило максимина предлагает наиболее полезные действия.

Оптимистический подход соответствует так называемому *максимаксному критерию выгодности*. Игрок убежден, что каждое возможное действие приводит к наилучшему возможному результату. Таким образом, представляется разумным выбирать действие, наилучший результат которого по меньшей мере столь же хорош, как и самый благоприятный результат альтернативного действия. В нашем примере с урнами правило максимакса соответствует выбору первой урны.

Осмотрительный игрок предпочтет не выбирать это правило. Но, с другой стороны, правило максимина имеет смысл лишь тогда, когда известно, что противник недружелюбен. Несколько численных примеров могут подтвердить эти толкования правил. На рис. 7.5 *а* приведена матрица выгодности для двух возможных состояний s_1, s_2 и двух возможных действий a_1, a_2.

Правило максимина советует совершить действие a_2. Даже если число 1 уменьшить до крохотного значения, например, до 0,000001, а число 100 увеличить до громадного значения вроде 10^{15} (рис. 7.5 *б*), все равно правило максимина будет советовать совершить действие a_2. Такое решение действительно разумно для игрока, предполагающего, что противник абсолютно недружелюбен. В любом случае противник будет пытаться предотвратить состояние, соответствующее максимальной выгодности для играющего. Но иначе правило максимина будет нерациональным, так как a_1 было бы лучшим действием. Если реализуется состояние s_1, тогда

	s_1	s_2
a_1	0	100
a_2	1	1

а)

	s_1	s_2
a_1	0	10^{15}
a_2	0,000001	0,000001

б)

	s_1	s_2
a_1	1	0
a_2	0	99

в)

Рис. 7.5. Матрицы выгодности (а, б); матрица риска (в)

игрок должен отказаться от очень малого прироста выгодности. В случае же s_2, совершив действие a_1, он получил бы очень большое увеличение выигрыша.

Чтобы обосновать такое решение, Саваж ввел так называемый *минимаксный критерий риска*. Он предложил заменить матрицу выгодности (рис. 7.5 *а*) матрицей значений риска r_{ij} (рис. 7.5 *в*). Чтобы получить максимальное значение выгодности в j-м столбце, значение риска r_{ij} должно быть добавлено к значению выгодности u_{ij}.

В матрице 7.5 *а* наибольшее значение выгодности в первом столбце равно 1, а во втором столбце — 100. Таким образом, матрица риска дается рис. 7.5 *в*[2)].

Минимаксное правило риска требует: выбирайте действие, минимизирующее максимальный риск. Так как максимальный риск действия a_2 имеет значение 99, а действия a_1 — 1, то представляется разумным выбрать действие a_1. Конечно, это правило рационально только при определенных конкретных условиях. Существует много других критериев рациональности.

Следующий пример — это так называемый критерий пессимизма-оптимизма, предлагающий промежуточное решение между пессимистическим правилом максимина и оптимистическим правилом максимакса. Для действия a_i пусть m_i является минимальной, а M_i — максимальной выгодностью из ряда $u_{i1}, \ldots, u_{in}$. Пусть α — константа, такая что $0 \leqslant \alpha \leqslant 1$, называемая индексом оптимизма-пессимизма. Тогда действие a_i ассоциируется с так называемым α-индексом $\alpha m_i + (1-\alpha)M_i$. *Правило пессимизма-оптимизма* предпочитает действия с бóльшими значениями α-индекса. Но, конечно, конкретный критерий определен, только если задано определенное число α. Эти примеры демонстрируют, что не существует абсолютного критерия рациональности, а имеется класс критериев, соответствующих разным степеням оптимизма и пессимизма при определенных обстоятельствах.

В книге фон Неймана и Моргенштерна «Теория игр» стабильность общества или рынка рассматривается как результат взаимодействия конкурирующих или сотрудничающих лиц и групп людей. Во многих случаях они допускают переупрощение реальной экономической, социальной и психологической сложности. Каждый игрок может точно определить свои возможные действия, приводящие к определенным состояниям и возможным выигрышам. В общем случае теория игр предполагает принцип линейности (суперпозиции), заключающийся в том, что сложные взаимодействия многих личностей в обществе («игре») могут быть сведены к сумме многих простых взаимодействий нескольких лиц.

[2)] $r_{ij} = \max_j u_{ij} - u_{ij}$. — *Прим. ред.*

Таким образом, ключевую роль в теории игр играет исследование игр с двумя участниками. Событие, когда игрок 1 выбирает действие a_1, а игрок 2 выбирает действие a_2, обозначается парой (a_1, a_2). В случае такого события выгодности определяются как $u_1(a_1, a_2)$ для игрока 1 и $u_2(a_1, a_2)$ для игрока 2. Важный класс игр характеризуется тем, что выигрыши обоих игроков в каждом событии прямо противоположны, так что

$$u_1(a_1, a_2) + u_2(a_1, a_2) = 0$$

(«игра с нулевой суммой»). Всякое взаимодействие исключается. Тогда, если нет специальной информации о нерациональности противника, правило максимина представляется рациональным. В других случаях иногда взаимодействие может быть рациональным.

Важная математическая проблема — это существование точек равновесия в играх [7.22]. Если нет взаимодействия, для возможных действий двух игроков можно определить *точку равновесия* следующим образом. Событие $(\bar{a}_1, \bar{a}_2)$ является точкой равновесия игры, если значение выигрыша $u_1(\bar{a}_1, \bar{a}_2)$ игрока 1 больше или равно значениям $u_1(a_1, \bar{a}_2)$ для всех его действий a_1, и если значение выигрыша $u_2(\bar{a}_1, \bar{a}_2)$ игрока 2 больше или равно значениям $u_2(\bar{a}_1, a_2)$ для всех его действий a_2.

Если игрок 1, предполагая, что игрок 2 выбирает действие $\bar{a}_2$, пытается максимизировать свой выигрыш, то он должен выбрать действие $\bar{a}_1$ и наоборот. Равновесие устойчиво в том смысле, что игрок, зная, что его противник находится в точке равновесия, не имеет никаких причин изменять свое поведение. Очевидно, что такое определение равновесия не рассматривает никаких динамических аспектов. Однако реальное поведение обществ и рынков определяется сложной динамикой во времени. Хорошо известными примерами экономической динамики являются торговые циклы. Возникают вопросы, стремятся ли эти динамические процессы к равновесию и являются ли эти равновесные состояния устойчивыми. В общем случае теория игр не рассматривает «эффект бабочки», состоящий в том, что малое нарушение поведения может иногда вызвать глобальный кризис и даже хаос.

Теория игр фон Неймана и Моргенштерна не только следует традиции линейной математической экономики. Она развивает идеи экономической теории благосостояния. Предполагается, что разумное общество выбирает такое распределение прибылей, которое оптимально по Парето. Распределение прибылей называется *оптимальным по Парето*, если ни у одного индивидуума благосостояние не может отклониться в сторону увеличения без уменьшения благосостояния по крайней мере одного другого индивидуума. Но выполнение этого слабого условия оптимального по Парето благосостояния недостаточно. Необходимо рассматривать власть потенциальных коалиций. Теория кооперативных решений в теории игр главным образом возвращает нас к идеям экономики благосостояния, дипломатии и встречающимся в обществе эгоистичным политиканам. Математически понятия справедливости, беспристрастности или честной игры, определяющие политические и общественные рамки экономики благосостояния, сводятся к некоторым принципам симметрии.

Теория игр является точной математической теорией, применение которой к экономике часто переоценивается. Ограничения этой теории

в основном определяются ее типично линейными предположениями об обществе. Тем не менее теория игр представляет собой выдающееся математическое достижение, главным образом обязанное работам Джона фон Неймана. Примечательно, что Джон фон Нейман был центральной фигурой почти во всех научных достижениях XX в., рассматриваемых в этой книге. Он участвовал в развитии программируемых компьютеров, теории автоматов, квантовой механики и теории игр. Кроме того, он интересовался междисциплинарными математическими моделями в естественных и общественных науках. В основе этих блестящих исследований в основном лежат принципы линейности. Но Джон фон Нейман был также одним из первых ученых, обративших внимание на важность самовоспроизведения и самоорганизации. Знаменитым примером является его теория клеточных автоматов.

7.3. Сложные экономические системы, хаос и случайность

С методологической точки зрения, основное направление развития в экономике часто вдохновлялось моделями линейной математики, классической механики, термодинамики теплового равновесия и иногда дарвиновской теорией эволюции. Классические экономические модели постулировали существование рационального экономического человека (*homo oeconomicus*), стремящегося максимизировать свою выгоду, минимизируя расходы и максимизируя прибыль. Предполагалось, что эти рациональные агенты взаимодействуют путем обмена товарами на рынках, что приводит к экономическому равновесию спроса и предложения за счет определенных механизмов цен.

Чтобы описать динамику экономики, необходимо знать уравнения эволюции для множества экономических величин, возможно, полученных из тысяч секторов и от миллионов агентов. Так как в экономике, как и везде, все зависит от всего, уравнения будут связанными и нелинейными, чтобы как можно лучше смоделировать экономическую сложность. Но затем даже полностью детерминированные модели могут порождать в высшей степени нерегулярное поведение, которое, в конце концов, оказывается непредсказуемым. Похоже, что экономика страдает от тех же недостатков, что и метеорология [7.23].

До того как в метеорологии были открыты динамический хаос и эффект бабочки, ученые верили в возможность точных долговременных предсказаний погоды. Джон фон Нейман, как пионер компьютерных вычислений, поддерживал точку зрения, что при наличии суперкомпьютера и достаточного количества данных о погоде в мире он смог бы обеспечить точные предсказания погоды во времени и в пространстве. С математической точки зрения, он не ошибался, так как в рамках линейной математики он был столь же прав, как и классический астроном. Однако реальное поведение жидкостей и погоды, в конце концов, начинало резко отличаться от этих моделей.

Что делать со сложностью погоды и экономики? В метеорологии Эдвард Лоренц предложил нелинейную динамическую модель, которая может порождать хаотическое поведение за счет ее внутренних возмущений (см. разд. 2.4). Аналогично, есть два возможных пути объяснения слож-

ности экономической эволюции. Общепринятый подход предполагает линейные модели со специально взятыми для этой цели и необъясненными внешними скачка́ми. Нелинейный подход отрицает переупрощенную гипотезу линейности и специально придуманные гипотезы скачков, вызванных внешними факторами, и пытается объяснить сложность реальных экономик их нелинейной внутренней динамикой. В ряде случаев нелинейности могут быть так малы, что линейные приближения не приводят к существенным ошибкам.

В истории экономики Великая депрессия 1930-х гг. породила теории, которые попытались объяснить экономические нерегулярности. Но модели (например, модели Калеки[3)] и Хансена–Самуэльсона) были линейными и не могли объяснить возникновение колебаний [7.24]. Таким образом, для объяснения наблюдаемых колебаний экономисты предполагали внешние скачки́. Если бы экономисты были лучше знакомы с достижениями математики, они могли бы знать о нелинейных математических моделях, приводящих к решениям в виде предельных циклов.

Первоначально экономисты знали только об устойчивом равновесии и аттракторах типа неподвижной точки. Пуанкаре обобщил понятие равновесия, включив равновесное движение в форме предельных циклов. Но для хаотических аттракторов, таких как модели Лоренца (рис. 2.21), нет ни устойчивых особых точек, ни фиксированного периодического движения, а существует лишь никогда не повторяющееся движение. Тем не менее ограниченное движение и неблуждающее множество притягивают определенные динамические системы к конечному состоянию динамического равновесия.

Исторически экономика в XX в. характеризовалась ростом, который прерывался глубокими кризисами, например, в 1930-х гг. (Великая депрессия) и в 1970-х гг. (Нефтяной кризис). При рассмотрении структуры роста особое внимание следует обратить на инновации и технический прогресс. Экспансия успешных инноваций эмпирически хорошо описывается логистической функцией, введенной в разд. 2.4. Рекурсивная версия может относиться к целым значениям t, играющим роль временно́го интервала, и фактору роста $\alpha > 0$. Первоначально инновация довольно непривычна. Затем, когда признание растет, скорость распространения достигает своего максимума. После этого возникает медленное торможение процесса освоения новшества, пока инновация не интегрируется полностью в экономику.

Результирующая кривая показана на рис. 2.22. При $\alpha \leqslant 3$ аттрактор – неподвижная точка, он показан на рис. 2.22 *а*. Для больших значений α результатом являются периодические колебания (рис. 2.22 *б*, 2.24 *в*), и затем – хаотическое движение (рис. 2.22 *в* и 2.24 *б*). При $\alpha > 3$ число периодов последовательно удваивается с ростом α (рис. 2.23 *а*), пока траектория не станет полностью хаотичной (рис. 2.23 *б*).

Связь между инновацией и экономическим производством показана на следующей модели (рис. 7.6) [7.25]. Начальное производство q берется в состоянии равновесия, так что, когда скорость роста Δk увеличивается, постепенно растет и производство. Но затем, когда инновация достигает насыщения и Δk стремится к нулю, производство q возвращается к своему первоначальному уровню. Таким

[3)] М. Калеки – польский экономист, специалист по макроэкономике. – *Прим. ред.*

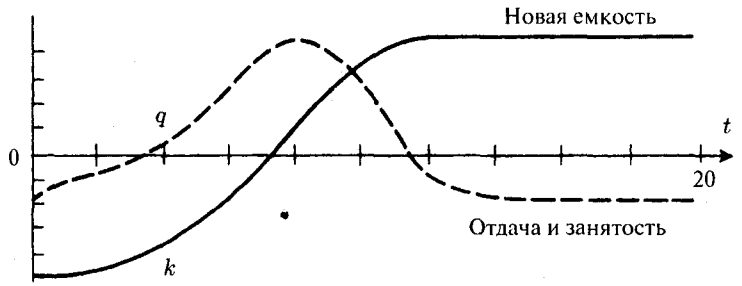


Рис. 7.6. Логистическая кривая емкости инноваций, а также кривые производства и занятости

образом, инновация стимулирует как бум, так и последующий спад. Инновация может быть трудосберегающей. Если входные значения затрат труда на единицу производства упадут на 20 %, занятость также упадет.

Так как предполагается, что рост числа новых идей происходит экспоненциально, экономисты, такие как Шумпетер, полагали, что в конце инновационного взрыва начинается следующий цикл. Тогда инициируются новые бум и коллапс, и т. д., и экономическая система продолжает функционировать, а технологический потенциал продолжает расти примерно на 4 % в год. Для теории экономических циклов нововведения являются критически важными, так как в стадии депрессии нет иного основания для новых инвестиций, необходимых, чтобы породить новый рост.

Новые идеи возникают постоянно. Когда накапливается достаточное количество идей, создается группа нововведений. Сначала они развиваются медленно, затем ускоряются, когда совершенствуются технологии. Типичную траекторию инновации характеризует логистическое развитие. Внедрению новшества должна предшествовать определенная инвестиция. Эти вложения стимулируют спрос. Возрастающий спрос облегчает распространение инновации. Затем, когда все инновации начинают полностью использоваться, процесс замедляется.

Шумпетер называл этот процесс «роением» инноваций. В его модели из трех циклов первый короткий цикл связан с циклом акций, и в нем инновации не играют никакой роли. Следующий, более длительный цикл связан с нововведениями. Шумпетер обратил внимание на важность исторической статистики и связал наличие длинных волн с тем, что наиболее важным инновациям, например, пару, стали, железным дорогам и электричеству, потребовалось от 30 до 100 лет, чтобы полностью интегрироваться в экономику.

В целом он описал экономическую эволюцию как технический прогресс в форме «роев», объяснявшихся в рамках логистики. Предполагается, что технологический рой циклическим образом сдвигает равновесие к новой неподвижной точке. В результате новое равновесие характеризуется повышением реальной зарплаты и более высоким потреблением и объемом производства. Но анализ Шумпетера игнорирует при определении объема производства существенную роль эффективного спроса.

Исторически экономические модели циклов деловой активности были связаны с Великой депрессией 1930-х гг. Однако первые модели (на-

пример, Хансена–Самуэльсона и Лундберга–Метцлера) были линейными, и поэтому для объяснения их нерегулярности требовали внешних скачков. В рамках этой традиции обсуждалась стандартная эконометрическая методология, хотя с момента математического открытия странных аттракторов уже был возможен внутренний анализ циклов. Традиционные линейные модели 1930-х гг. можно легко переформулировать в рамках нелинейных систем.

Модель Метцлера определяется двумя уравнениями эволюции. В первом уравнении скорость изменения объема производства $\dot{q}$ пропорциональна разности реальных запасов s и желаемых запасов s^*. Желаемые запасы пропорциональны объему производства. Следующее уравнение описывает скорость изменения запасов $\dot{s}$, равную объему производства q за вычетом спроса. Спрос пропорционален объему производства. Сложная система, динамика которой определяется этими двумя уравнениями эволюции, будет порождать простое гармоническое движение с нарастающей амплитудой.

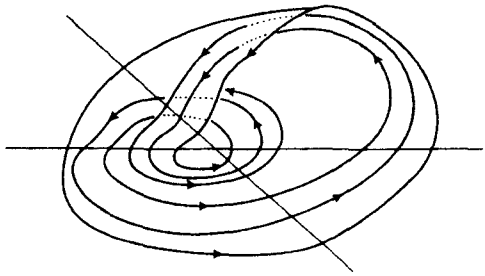
Если система дополняется определенными нелинейностями, это приводит к поведению разного типа. Третье уравнение можно сопоставить с неправильным поведением нераспределенных прибылей и дефицита. Цель состоит в том, чтобы породить цикл, длящийся определенное количество лет. Математическая модель предложена коллективом исследователей под руководством Рёсслера [7.26]. Аттрактор этой модели напоминает ленту Мёбиуса, представляющую собой одностороннюю поверхность (рис. 7.7 *а*). Следуя по траектории, внешняя петля расширяется направо и вверх. Затем она загибается и спускается вниз, сокращается до внутренней петли и т. д. На рис. 7.7 *а* дана двухмерная проекция, демонстрирующая два цикла. Линии стремятся сгруппироваться, оставив между собой пустое пространство. Если продолжать расчет, то ленты становятся все более плотными.

На рис. 7.7 *а* представлен простой, но примечательный пример хаотичного («странного») аттрактора. Хотя каждая траектория точно определена уравнениями эволюции, она не может быть рассчитана и предсказана в долгосрочной перспективе. Крохотные отклонения начальных условий могут значительно изменить вид траекторий в соответствии с эффектом бабочки. На рис. 7.7 *б* показана траектория объема производства и запасов в фазовом пространстве, вычисленная на 15 лет вперед, полученная в компьютерном эксперименте с выбранными параметрами. На рис. 7.7 *в* показана зависимость объема производства от времени[4] [7.27].

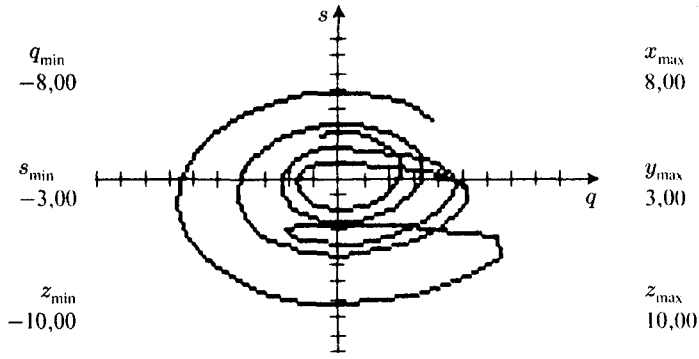
Такое в высшей степени изменчивое поведение возникает в полностью автономной системе без всяких скачков внешних параметров. В экономике нерегулярности временны́х рядов обычно объясняются именно такими скачка́ми. Но они являются всего лишь произвольными, выбранными *ad hoc* гипотезами, и поэтому могут объяснить все, что угодно. С методологической точки зрения, хаотические автономные модели со странными аттракторами кажутся более удовлетворительными. Тем не менее и автономные нелинейные модели, и линейные модели с экзогенными скачка́ми должны восприниматься серьезно и проверяться в экономике.

Очевидно, что экономика состоит из многих связанных и отдельных

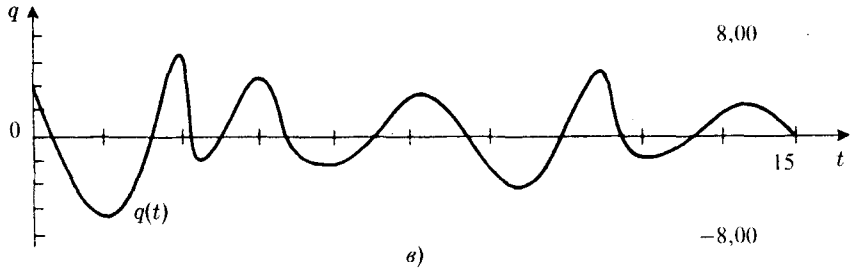
[4] Проекция интегральной кривой, говоря на языке дифференциальных уравнений. — *Прим. ред.*



а)



б)



в)

Рис. 7.7. Аттрактор Рёсслера (*а*); цикл деловой активности автономной нелинейной системы с траекторией в пространстве состояний (*б*); временной ряд для объема производства (*в*) [7.27]

частей с автономной динамикой и внешними силами. Имеются индивидуальные национальные экономики, все больше и больше действующие в соответствии с развитием мировой экономики. Внутри данной экономики имеется несколько рынков с конкретной динамикой. На них влияют циклы, например, ежегодный солнечный цикл, определяющий сельскохозяйственный, туристический или топливный рынки. Другими, хорошо известными, экономическими примерами являются свиной и строительный рынки. Следовательно, автономные нелинейные системы с выраженными волнами экзогенных сил являются реалистическими моделями экономик.

В конечном итоге возникает динамика, имеющая характер возмущенного хаотического аттрактора или своего рода суперхаоса. Именно изменчивый характер экономических событий является причиной больших проблем для экономических агентов, которые должны принимать решения, зависящие от непредсказуемого будущего.

В разд. 2.3 мы видели, что самоорганизующиеся сложные системы могут быть как консервативными, так и диссипативными. На рис. 2.14 *а*, *б* показаны разные типы аттракторов у таких систем. Некоторые хорошо известные примеры консервативных и диссипативных моделей были применены также и к экономике. В 1967 г. Гудвин предложил консервативную динамическую модель, которая должна была отразить идею XIX в. о классовой борьбе. Он рассмотрел экономику, в которой есть рабочие и капиталисты. Рабочие тратят весь свой доход на потребление, а капиталисты прячут весь свой доход. Гудвин использовал немного модифицированную модель хищника-жертвы Лотки и Вольтерры, описанную в разд. 3.4 [7.28].

Консервативная модель Гудвина поддерживает идею, что капиталистическая экономика носит циклический характер. Таким образом, траектории описывают замкнутые орбиты, как показано на рис. 3.11 *б*. Модель Гудвина критиковали как поверхностную за то, что она не имеет непосредственного отношения к действующим доходным акциям капиталистов и рабочих или к их совокупному объему. Но все же главной причиной того, почему модель Гудвина кажется экономически нереалистичной, является ее консервативный характер. Модель основана на множестве предположений, не отражающих другие факторы.

Исходя из этого, модель была сделана более реалистичной с помощью предположения об «экономическом трении». В биологическом случае диссипативная модель Лотки–Вольтерры с точечным аттрактором была проиллюстрирована на рис. 3.11 *в*. Диссипативная система всегда обладает аттракторами или репеллерами[5] — неподвижными точками, предельными циклами или странными аттракторами. Поскольку эволюция диссипативной системы во времени необратима, всякого рода предсказания в обратную сторону исключены [7.29][6].

В реальности динамическую систему нельзя рассматривать в изоляции от других динамических систем. Так, в разд. 2.2 мы изучали связанные колебательные системы, например, двух часов (рис. 2.11 *а*, *б*). Пространство состояний комбинированной системы было представлено тором (рис. 2.11 *в*, *г*). Динамика всей системы была проиллюстрирована фазовым портретом траекторий и векторным полем на торе.

Экономическую модель связанных колебательных систем предоставляет международная торговля. Представьте упрощенную макроэкономическую модель одной экономики с капиталовложениями и сбережениями, зависящими как от дохода, так и от процентной ставки. Динамика системы определяется уравнением эволюции для дохода, которое подстраивает его в соответствии с избытком спроса на рынке товаров и вторым уравнением эволюции для процентной ставки.

---

[5] Репеллер (от *англ.* Repel — отталкивать, отражать) — отталкивающее множество в фазовом пространстве. Траектории стремились бы к репеллерам, если бы заменить t на $-t$ в изучаемой системе. — *Прим. ред.*

[6] Вообще говоря, в силу единственности решений изучаемых уравнений можно проследить траекторию «назад», в обратном времени, однако численно эта процедура неустойчива. — *Прим. ред.*

Эти уравнения составляют нелинейный осциллятор, так что модель генерирует сложную динамику.

Взаимодействие, например, трех экономик можно описать системой трех независимых двумерных динамических систем с предельным циклом. Фазовое пространство всех трех экономик — трехмерный тор. Связь нелинейных осцилляторов можно понимать как возмущение движения автономных экономик на трехмерном торе, описывающее их взаимодействие. Процедура связывания была применена к нескольким примерам экономик, таких как модели международной торговли, модели циклов деловой активности и взаимозависимых рынков.

Ключевая проблема практической политики возникает тогда, когда допускается влияние политического вмешательства на самоорганизующиеся экономические системы. В ряде случаев рынок не способен развиваться согласно критериям благосостояния. Если экономика предоставлена самой себе, ее можно охарактеризовать флуктуациями. Но если не рассматривается сложность и нелинейность экономического роста, то политические меры могут дать эффект, противоположный тем, которые ожидались.

Что касается драматических социальных и политических последствий экономических катастроф, то в рамках кейнсианства и неокейнсианства обсуждались различные политические меры. Например, сбалансированная налоговая политика может рассматриваться как тип динамического контроля. Она должна уменьшать амплитуду экономических колебаний. Однако послевоенный опыт показал, что нет никакой надежды свести колебания к нулю или удерживать постоянным уровень занятости. Кроме того, хорошая политика нуждается в значительном времени для сбора данных, анализа результатов и формулировки законодательных или исполнительных мер. В результате любая политика может устареть к тому моменту, когда она становится эффективной. Таким образом, многие политические меры в сложном и нелинейном мире экономики могут оказаться абсолютно контрпродуктивными [7.30].

Например, кейнсианская политика доходов может оказаться неэффективной, если предполагаемая экономическая динамика и предложенная временна́я траектория политического вмешательства слишком просты. В рамках сложных систем меры экономической политики можно интерпретировать как экзогенные силы, влияющие на колебательную систему. Таким образом, нельзя исключить того, что экономика становится хаотичной. Примеры динамики колебательных систем под действием вынуждающих сил хорошо известны в физике. Например, если на динамическую систему типа маятника (рис. 2.7) периодически воздействует экзогенная сила, то результат может оказаться непредсказуемым из-за возрастания амплитуд, полного затухания колебаний или полной нерегулярности поведения.

Со времен классической экономики и до сего дня целью теории циклов деловой активности было построение модели динамики экономики с типичными регулярными колебаниями. Согласно линейной механической точке зрения, реальный цикл деловой активности моделировался регулярными системами с наложенными стохастическими экзогенными скачка́ми, которые следовало объяснять более или менее правдоподобными экономическими предположениями. Конечно, крайне неудовлетворительно, когда эти экзогенные силы опре-

деляют главные качественные свойства модели, не имея при этом разумной экономической интерпретации. Если реальная система нелинейна и хаотична, дальнейшая информация о возможных экзогенных силах, которые могут влиять на динамику экономики, представляется излишней. С методологической точки зрения, для того чтобы отсечь такие избыточные, предложенные *ad hoc*, экономические гипотезы, следует применять знаменитый принцип бритвы Оккама, согласно изречению которого *entia non sunt multiplicanda sine necessitate* (не следует умножать (теоретические) сущности без необходимости).

С практической точки зрения агента, довольно безразлично, сталкивается ли он со стохастическим линейным процессом или хаотической нелинейной динамикой. Оба типа систем, по-видимому, не позволяют ему формулировать и использовать точные предсказания. Так как хаотическая модель обладает чувствительностью по отношению к начальным данным, то цифровые компьютеры с конечной точностью вычислений в принципе неспособны рассчитать будущую эволюцию системы на долгий период времени. Траектории экспоненциально расходятся. С другой стороны, агент, верящий в стохастические экзогенные скачки, может отступить перед лицом слишком сложного поведения системы.

Тем не менее нелинейные системы с хаотическим временным рядом не исключают локальных предсказаний. Если удается реконструировать аттрактор нелинейной системы, то компьютерные системы прогноза обещают предсказать эволюцию на короткий период времени с достаточной точностью. Краткосрочное экономическое предсказание может быть интересным приложением теории сложных систем в экономике, но оно находится пока что в младенческом состоянии [7.31].

С самого зарождения экономики трудной методологической проблемой для экономических моделей были эмпирические тесты и подтверждения. В противоположность естественным наукам с их произвольно большим числом измерений и лабораторных экспериментов, экономические временны́е ряды должны использовать данные, собранные за день, год, квартал или месяц. Длина стандартного временно́го ряда составляет обычно несколько сотен точек. Таким образом, существуют чисто эмпирические причины для ограниченной применимости экономических моделей. Конечно, эмпирические эксперименты практически исключены.

Поэтому адекватное знание экономической динамики помогает построению математических моделей, будущее развитие которых может опираться на вычислительный эксперимент. Политик и менеджер в этом случае получат «фазовый портрет» альтернативных экономических сценариев, возникающих при реализации их инициатив. Качественное понимание высокой чувствительности нелинейных систем, вероятно, может остановить зарвавшихся агентов, которые толкают систему от неустойчивой точки к дальнейшему и, возможно, еще большему хаосу.

Главные аргументы в пользу нелинейных моделей в экономике предоставлены недавним структурным изменением экономического роста, вызванного развитием новых доминирующих технологий. Традиционная экономическая теория предполагает уменьшение прибыли. Чем больше товаров определенного сорта произво-

дится и поступает на рынок, тем труднее становится их производство и продажа, и тем меньшую прибыль можно получить. Взаимодействие агентов определяется отрицательной обратной связью, стабилизирующей экономику за счет противодействия каждой реакции, вызванной экономическим изменением.

В экономике с обратной связью может возникать и может быть предсказано равновесие цен и долей рынка. Знаменитым примером является Нефтяной кризис в 1970-х гг. Внезапный рост цен на неочищенную нефть в 1970-е гг. вызвал экономию и поиски альтернативных источников энергии, что привело к падению цен на нефть в 1980-е гг. В традиционных экономиках равновесие соответствует оптимальному результату по отношению к конкретному окружению. Теорема об уменьшении прибыли требует существования единственной точки равновесия. Экономики с отрицательной ответной реакцией на уменьшение прибыли типичны для традиционных секторов – сельского хозяйства, добывающей промышленности и серийного производства.

Но секторы экономики, зависящие от высоких технологий и уровня знаний, усиливают рост прибыли. Развитие и производство высокотехнологичных товаров, таких как компьютеры, программное обеспечение, самолеты, химикаты и электроника, нуждаются в сложных исследованиях, экспериментах, планировании и дизайне, требующих больших инвестиций. Но если высокотехнологичные товары выходят на рынок, увеличение объема производства обходится сравнительно дешево и прибыль продолжает расти. Таким образом, современные высокотехнологичные производства должны описываться в динамических моделях как генераторы с положительной обратной реакцией на рост прибыли.

Системы с положительной обратной связью имеют не одно, а несколько состояний равновесия, которые не обязательно оптимальны [7.32]. Если товар на рынке имеет случайные конкурентные преимущества, то лидер рынка будет, в конце концов, доминировать и даже увеличит свое преимущество, торгуя при этом не обязательно лучшим товаром. Многие примеры современного высокотехнологичного производства показывают, что конкурирующие товары могут в начале занимать примерно равные доли на рынке. Но крохотные флуктуации, увеличивающие долю конкретного товара на рынке, предопределяют его конечный успех. Иногда окончательный лидер рынка может обладать, с технической точки зрения, даже худшим качеством.

Эти явления невозможно объяснить в рамках традиционной линейной динамики. Но они хорошо известны в нелинейных системах. На рис. 7.8 показано соревнование двух технологий с положительной обратной связью. На выпуклой поверхности показаны некоторые траектории долей рынка. Чем больше технология доминирует на рынке, тем легче она может вызвать увеличение растущей доли рынка. Так как ведущая рыночная позиция инициируется случайными флуктуациями, она не может быть предсказана. На рис. 7.8 левая кривая иллюстрирует конечное господство технологии **A**. В двух других случаях после начальных флуктуаций на рынке в конце концов будет доминировать технология **B** [7.33].

Нелинейная динамика этих экономических моделей определяется начальными случайными флуктуациями и положительной обратной связью. Очевидно, что бифуркация возмож-

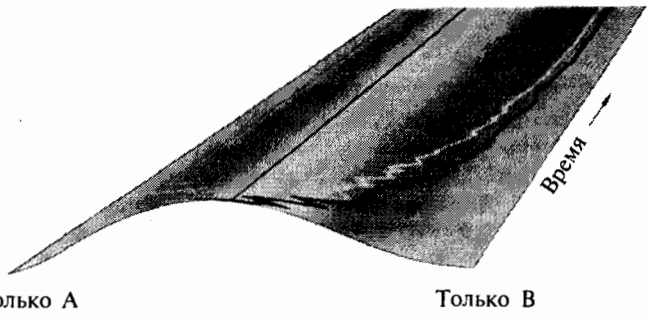


Рис. 7.8. Нелинейная динамика двух конкурирующих технологий [7.33]

ных траекторий есть определенный тип нарушения симметрии случайными начальными флуктуациями, хорошо известный в случае сложных физических систем. Читателю достаточно вспомнить стационарные конвективные валы, возникающие в нагретой жидкости (рис. 2.20 *б*), направление вращения которых влево или вправо зависит от случайных начальных флуктуаций.

Очевидно, существует много структурных аналогий между типами поведения в обществах и формированием структур в природе. С микроскопической точки зрения, экономики можно рассматривать как сложные многокомпонентные системы, состоящие из отдельных элементов, взаимодействующих друг с другом и своим материальным окружением. С макроскопической точки зрения, коллективные тенденции поведения возникают из микроскопических взаимодействий.

Таким образом, возникает вопрос о том, существует ли общая стратегия и процедура моделирования для коллективных динамических макропроцессов в обществе и экономике, аналогичных природным процессам? Такую процедуру моделирования нельзя просто позаимствовать из неравновесной термодинамики. В этом случае нам потребуются уравнения движения взаимодействующих агентов на микроуровне в экономике, которые необходимы для вывода соответствующих уравнений для макропеременных, описывающих возникновение структур. Только в сравнительно простых моделях социобиологии мы можем наблюдать непосредственные входные стимулы и конечные реакции между взаимодействующими членами популяции, например, нейрохимические взаимодействия насекомых или павловский рефлекс у млекопитающих. В общем случае имеются только косвенные, опосредованные суждения и оценки о связи между входным сигналом от окружающей среды и индивидуальными решениями и реакциями.

Сложность человеческого поведения допускает только вероятностное рассмотрение индивидуальных решений и действий. Исходя из стохастического микроповедения, мы получаем стохастическое описание макродинамики с помощью так называемого основного уравнения для вероятностного распределения макропеременных, являющихся параметрами порядка для экономик и обществ. Эти параметры определяют общие позиции и действия, соответствующие микропеременным, и управляют форма-

ми поведения на макроуровне. Следовательно, подходящий выбор макропеременных играет ключевую роль в успешном моделировании в экономике и общественных науках.

В экономике мы различаем конфигурацию коллективных материальных переменных и социоконфигурацию коллективных персональных переменных. Материальные переменные в экономике хорошо известны. Как в термодинамике, имеются интенсивные переменные, не зависящие от размеров системы. Примерами могут служить цены, производительность труда и количество товаров. Экстенсивные переменные пропорциональны размеру системы и касаются, например, уровня производства и инвестиций, или числа и размеров зданий. Коллективные материальные переменные измеримы. Однако на их значения оказывает влияние часто непосредственно не измеримая деятельность отдельных факторов. Социальный и политический климат в фирме связан с социопсихологическими процессами, на которые влияют позиции, мнения или действия отдельных лиц или их подгрупп. Таким образом, чтобы ввести социоконфигурацию коллективных персональных переменных, мы должны рассмотреть состояния отдельных лиц, выраженные их позициями, мнениями или действиями. Далее, существуют подгруппы с постоянными характеристиками (например, подразделения или департаменты фирмы или ведомства), так что каждый индивидуум является членом одной из подгрупп. Число членов определенной подгруппы, находящихся в определенном состоянии, является измеримой макропеременной. Таким образом, социоконфигурация, например, компании есть множество макропеременных, описывающих распределение позиций, мнений и действий в ее подгруппах в данный момент времени. Полная макроконфигурация определяется кратной суммой материальной конфигурации и социоконфигурации.

Если все макропеременные макроконфигурации остаются постоянными во времени, то социальная система находится в стационарном макроскопическом равновесии, которое можно сравнить с термодинамическим равновесием. Если имеется динамика, нужно рассматривать вероятность перехода между макроконфигурациями за счет возрастания или убывания макропеременных. В случае материальной конфигурации элементарное изменение состоит в росте или уменьшении одной макропеременной (например, цены товара) на одну подходяще выбранную единицу. Элементарное изменение в социоконфигурации происходит тогда, когда один индивидуум из подгруппы изменяет свое состояние, что приводит к росту или уменьшению числа подгрупп на единицу. Таким образом, вероятности перехода соседних конфигураций описывают вероятность в единицу времени того, что такой переход произойдет, если начальная конфигурация реализована. Такие вероятности можно использовать для установления центрального уравнения эволюции социальной системы – основного уравнения для распределения вероятности по макропеременным полной макроконфигурации. Функция распределения $P(m, n; t)$ основного уравнения есть вероятность обнаружения конкретной макроконфигурации материальной конфигурации m и социоконфигурации n в момент времени t. Основное уравнение, содержащее

$$\frac{dP(m, n; t)}{dt},$$

описывает изменение вероятности полной макроконфигурации за счет переходов материальных конфигураций и социоконфигураций [7.34].

В качестве экономического примера рассмотрим систему фирм, производящих один и тот же тип взаимозаменяемого, надежного, высокотехнологичного товара и соревнующихся за качество своей продукции. Предполагается положительная обратная связь между улучшением качества и реакцией потребителя. Со стороны спроса *конфигурация потребителя* состоит из коллективных персональных макропеременных, отличающихся числом обладателей определенного товара и числом лиц, у которых такого товара нет, так что они являются потенциальными потребителями. *Конфигурация предложения* состоит из материальных переменных, относящихся к числу единиц товара, производимого определенной фирмой за единицу времени, цен на товар и параметров качества товара. Полная экономическая конфигурация E содержит конфигурацию потребителя n и конфигурацию предложения m. Эволюция системы происходит за счет элементарных переходов между данной экономической конфигурацией и соседними экономическими конфигурациями. Со стороны потребителя соответствующие вероятности перехода описывают число покупок, сделанных теми, у кого данного товара нет, и превращение их в обладателей товара, и отбрасывание числа обладателей, прекративших пользование товаром. Со стороны предложения вероятность перехода относится к решениям фирм об изменении объема выпуска продукции, цен и качества своих товаров. Используя эти вероятности перехода, можно составить соответствующее основное уравнение. Функция распределения $P(E;t)$ есть вероятность нахождения экономической конфигурации E в момент времени t. Основное уравнение

$$\frac{dP(E;t)}{dt}$$

описывает влияние переходов на потребительскую конфигурацию персональных переменных и переменных предложения.

Однако в общем случае невозможно исчерпать всю информацию, содержащуюся в распределении вероятности, даваемом основным уравнением, путем сравнения с эмпирическими данными. В этом случае лучше всего пренебречь флуктуациями макропеременных в окрестности эволюции их средних величин и ограничиться уравнениями для квазисредних от макровеличин, которые могут быть выведены из основного уравнения.

Рассмотрим экономическую систему лишь с двумя конкурирующими фирмами. В синергетике параметры порядка макродинамики системы были введены путем адиабатического исключения быстро релаксирующих переменных (см. разд. 2.4). Идея состоит в том, что динамическая система с флуктуациями (например, лазер) начинает эволюцию с устойчивых мод (волн) в соответствии с определенным управляющим параметром (например, накачкой энергии). Если управляющий параметр принимает значение, близкое к критическому, те моды, которые становятся неустойчивыми, принимаются за параметры порядка, так как они начинают доминировать над устойчивыми модами (т. е. «подчинять» их себе). Поскольку их время релаксации стремится к бесконечности, быстро релаксирующие переменные могут быть адиабатически исключены. В более привычных выражениях, синергетика требует, чтобы дол-

гоживущие системы подчиняли себе короткоживущие.

Таким образом, если мы предполагаем, что цены и предложение являются быстро подстраивающимися переменными нашей экономической системы, то их можно адиабатически исключить в соответствии с синергетической процедурой. В результате остаются уравнения для макропеременных потребителя и макропеременных качества товаров. Основным управляющим параметром такой системы, очевидно, является величина, характеризующая конкуренцию между двумя фирмами. Если качество товаров эволюционирует медленно, по сравнению с покупательной активностью потребителей, тогда, в согласии с синергетикой, быстро релаксирующие потребительские переменные могут быть также адиабатически исключены. Единственным «выжившим» уравнением эволюции остается уравнение для переменных качества, которые могут рассматриваться как параметры порядка системы.

Эволюцию переменных качества q_i для фирмы $i = 1$ и фирмы $i = 2$ можно исследовать численно. На рис. 7.9 представлены стационарные решения $q_i(\phi)$ соответствующих уравнений как функции параметра конкуренции ϕ. Оказывается, что до тех пор пока значение конкуренции ϕ меньше критического значения ϕ_c, обе фирмы имеют одинаковое постоянное качество $q(\phi)$ своих товаров, а также одинаковую постоянную долю рынка. В точке ϕ_c возникает бифуркация, и при $\phi > \phi_c$ существуют два устойчивых значения качества $q_+(\phi)$ и $q_-(\phi)$. Прибыльная фирма, например $i = 1$, достигнет качества $q_+(\phi)$, а убыточная фирма $i = 2$ достигнет качества $q_-(\phi)$ с соответствующими долями рынка.

Помимо диссипативных систем, рассматриваемых в синергетике, существуют также консервативные системы с нарушением симметрии. Рассмотрим самоорганизацию диполей в спиновом стекле в результате повышения температуры (рис. 4.9 *а*). В тепловом равновесии спины выстраиваются в одинаковом направлении, зависящем от начальных случайных флуктуаций. Динамика долей рынка развивается аналогичным образом. Существует много примеров технологий, развившихся благодаря случайным начальным флуктуациям. В XIX в. соседние железнодорожные компании приняли одну и ту же ширину колеи в общей области. Стандартная колея не была выбрана по техническим соображениям, а явилась результатом исторической случайности.

Поведение этих сложных систем, такое как нарушения симметрии в спиновых стеклах или ферромагнетиках, определяется одинаковыми уравнениями эволюции. На рис. 7.10 *а* показана эволюция магнитных диполей в ферромагнетике. Каждый диполь или

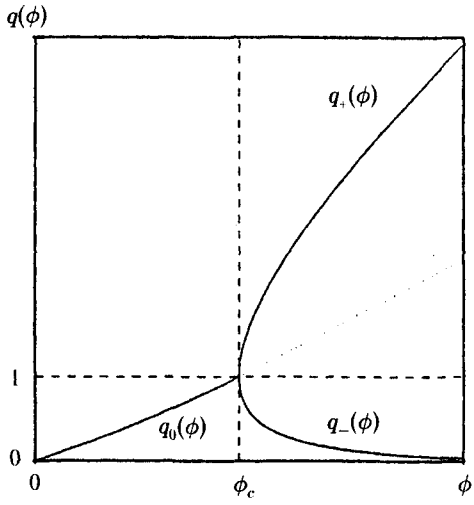
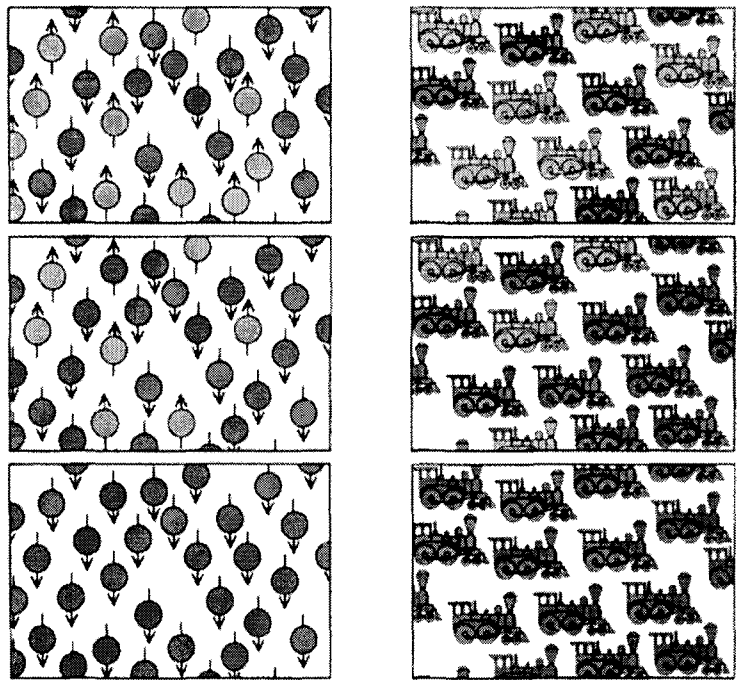


Рис. 7.9. Бифуркация двух конкурирующих фирм на прибыльную и убыточную в результате конкуренции $\phi > \phi_c$ [7.35]



а) *б*)

Рис. 7.10. Нелинейная динамика магнитных диполей в ферромагнетике (*а*); нелинейная динамика конкурирующих технологий в экономике (ширина колеи на железных дорогах разных компаний) (*б*)

элементарный магнит может быть расположен в направлении либо вверх (на север), либо вниз (на юг). Диполь может взаимодействовать с ближайшими соседями. При высокой температуре направления диполей случайны. Если температура уменьшается, то элементарные диполи выстраиваются в одном направлении. Так как эволюция является видом нарушения симметрии, то невозможно предсказать, какое направление окажется предпочтительным в конечном состоянии равновесия. На рис. 7.10 *б* показан аналогичный процесс самоорганизации для ширины колеи, выбранной железнодорожными компаниями.

Самоусиливающиеся механизмы с положительной обратной связью являются типичными для многих нелинейных сложных систем в экономике и обществе. Например, можно поразмышлять, почему графство Санта Клара в Калифорнии превратилось в знаменитую Кремниевую долину. В 1940-е и 1950-е гг. некоторые выдающиеся личности (такие как предприниматели Хьюлетт, Паккард и Шокли) основали вблизи Стэнфордского университета фирмы по электронике. Эти пионеры создали концентрацию инженеров по высоким технологиям и производству, которая в результате стала аттрактором для более 900 фирм. Вначале происходили случайные флуктуации, связанные с выбором графства Санта Клара. Поэтому отнюдь не чудо, а закономер-

ность в нелинейном смысле объясняет, *как* возникла Кремниевая долина. Но чудом в смысле случайности является то, что она возникла *именно* в графстве Санта Клара.

В наши дни механика самоусиления определяет международную торговлю высокими технологиями [7.36]. В этих рамках можно объяснить конкуренцию автомобильной промышленности США и Японии. Вначале японская промышленность предложила на американском рынке небольшие автомобили, не встретив никакого сопротивления со стороны американской автомобильной промышленности, традиционно специализировавшейся на производстве больших автомобилей. Японская промышленность смогла увеличить долю рынка, понизить цены и улучшить качество. Таким образом, положительная обратная связь позволила японской индустрии завоевать американский рынок.

Более глубокое проникновение в эти нелинейные рыночные эффекты может иметь большие последствия, касающиеся политических решений. С традиционной точки зрения, предполагая постоянный или убывающий доход, правительства верят в открытые рынки, пытаются предотвратить монополизацию и надеются, что промышленность будет поддерживать исследования и техническое развитие. Они верят в постоянное равновесие цен на мировом рынке и отказываются вмешиваться с помощью субвенций или тарифов. Такая политика оправдана в экономике с уменьшающимися доходами, но она может оказаться опасной в секторах, зависящих от высоких технологий, с растущими доходами.

Механизмы, управляющие растущими доходами, изменяют равновесие в конкуренции между нациями. Даже сильные национальные экономики могут упустить возможность развития важных технологий. Известным примером является технологический разрыв между Западной Европой и США в 1960-е гг. (например, в компьютерной индустрии). Технические стандарты или соглашения часто устанавливались за счет положительной обратной связи. Такие примеры, как колея железных дорог, английский язык как стандартный язык в авианавигации, ФОРТРАН как компьютерный язык, определенная резьба на винтах и т. п., показывают, что часто ничего нельзя изменить, хотя альтернативные технологии или соглашения могли бы быть лучше. Однако их конкуренты захватили слишком большую долю рынка. Но первоначальное превосходство не является гарантией выживания в течение долгого времени.

Теория сложных систем может помочь создать глобальный фазовый портрет экономической динамики. Анализ временны́х рядов предоставляет полезные критерии и процедуры для выбора стратегий поведения, например, на рынках акций. Но иногда в поисках локального равновесия экономического благосостояния опыт и интуиция оказываются полезнее, чем научное знание. Имея дело с весьма чувствительными сложными системами, экономисты и политики сами должны быть весьма чуткими и должны принимать соответствующие решения.

Опыт показывает, что рациональность в принятии решений человеком ограничена. Когнитивные возможности человека подавляются сложностью тех нелинейных систем, которыми он пытается управлять. Традиционная математическая теория принятия решений предполагала идеальную рациональность экономических

агентов (*homo oeconomicus*). Герберт Саймон, Нобелевский лауреат по экономике и один из ведущих пионеров науки о системах и искусственном интеллекте, ввел в 1959 г. *принцип ограниченной рациональности:*

> Способность человеческого разума формулировать и решать сложные задачи очень мала по сравнению с масштабом задачи, решение которой требуется для объективно рационального поведения в реальном мире или даже для разумного приближения к такой объективной рациональности [7.37].

Ограниченная рациональность определяется не только пределами человеческого знания, информации и времени. Это не только неполнота нашего знания и упрощение наших моделей. Хорошо установлены ограниченность нашей краткосрочной памяти и сохранения информации в долгосрочной памяти. В стрессовых ситуациях людей ошеломляет поток информации, который необходимо в спешке профильтровать. Поэтому мы должны обратиться к реальным свойствам обработки информации и принятия решений человеком, которые характеризуются эмоциональными, подсознательными, а также аффективными и нерациональными факторами всех типов. Даже эксперты и менеджеры часто предпочитают полагаться на эмпирические правила и эвристику, которые основаны на интуитивных ощущениях из прежнего опыта. Как показывает практика, человеческая интуиция означает не только недостаток информации и неспособность принимать решения. Наше эмоциональное поведение и чувство интуиции являются частями эволюционного наследия, позволившего нам принимать решения в ситуации, когда на кону стоят вопросы выживания.

В традиционной экономике и теории принятия решений эмоциональность и интуиция рассматривались как несовершенство обработки информации, которое должно быть преодолено компьютерными и информационными технологиями. Но даже современное проникновение в вычислительную сложность природы и жизни заставляет нас отказаться от традиционных стандартов так называемой рациональности. Действительно, природа и жизнь характеризуются не только очень сложной и хаотичной динамикой, но также случайностью и шумом. В этом случае не существует короткого пути к любой конечной программе или закону, которые могли бы предсказать будущее и уменьшить сложность. Объем вычислений для уменьшения сложности будет по крайней мере так же велик, как и для реального поведения системы. Вычислительная несводимость и неразрешимость (см. разд. 5.4) принуждают искать поведенческие стратегии, основанные на нашем реальном опыте в аналогичных ситуациях. Вместо математической теории оптимизации, необходимы эмпирические и экспериментальные исследования для поиска и оценки той эвристики, которую люди действительно используют при принятии решений.

Так как оптимальное принятие решений с помощью идеальных моделей невозможно, люди в качестве ответа на ограниченную рациональность развили много индивидуальных стратегий [7.38]. Они всегда стремятся уменьшить сложность реальных ситуаций. Организационные привычки и общепринятые правила подтверждаются традициями и культурой фирмы. Эмпирические правила основаны на упрощенных и неполных моделях ситуаций, которые были подтвержде-

ны в прошлом. Например, если менеджеры не имеют информации или времени на установление цены каждого товара для оптимизации доходов магазина, они могут умножить *общую стоимость на принятую* торговую надбавку. Когда цены слишком высоки или слишком низки, они корректируются в соответствии с другими эмпирическими правилами. Решение проблем оптимизации часто слишком сложно для принятия решений. Вместо оптимизации люди пытаются установить те цели, которые могут быть достигнуты при заданных ресурсах и ограничениях по времени. Если цели достигнуты, работники прекращают свои усилия, хотя они не могут быть уверены, что не существует лучшего решения задачи. Например, потребители прекращают искать более дешевые товары, если они считают, что цена на данный товар достаточно низка. Работодатели иногда нанимают первого кандидата, удовлетворяющего условиям работы, и перестают искать лучшего. Еще одной стратегией уменьшения сложности является разбиение (декомпозиция) задач принятия решений на подзадачи. Однако, конечно, местные специалисты по принятию решений в больших фирмах подвергаются опасности игнорирования тех аспектов их подзадач, которые, по их мнению, непосредственно к ним не относятся.

Если специалисты по принятию решений игнорируют побочные эффекты и обратную связь действий в *нелинейной динамике фирмы* или рынка, они могут вызвать неустойчивость и нарушение работы системы. Однако люди все же не полностью иррациональны, бесчувственны или недалеки. Принцип ограниченной рациональности утверждает, что *не существует глобального понятия рациональности*. Тем не менее, когда люди пытаются целенаправленно действовать на основании своих знаний, опыта и чувств, их решения могут быть намеренно или *локально рациональными*. Правило принятия решения называется *намеренно или локально* рациональным, если оно порождает разумные и ощутимые результаты в рамках предполагаемой и допускаемой специалистами по принятию решений окружающей обстановки. Например, при низкой утилизации запасов для фирмы представляется рациональным уменьшить цены, чтобы сохранить или отвоевать долю рынка. Однако это не всегда рациональное правило, поскольку оно зависит от веры менеджера, что конкуренты не будут или не смогут отвечать уменьшением собственных цен. Кроме того, этот пример показывает, каким образом из-за нелинейной динамики сложной системы локально рациональные правила могут приводить к глобальной иррациональности.

Нелинейная динамика конкурирующих фирм определяется несколькими петлями обратной связи. Компания снижает цены, когда утилизация запасов падает ниже определенного уровня. Это отрицательная обратная связь, которой пытаются следовать менеджеры. Они фокусируются *только на этой петле* обратной связи и упрощают всю систему в том смысле, что цена конкурирующих товаров рассматривается как внешний параметр. Если бы это было верно, тогда уменьшение цен для стимулирования спроса и возрастания доходов имело бы смысл. Однако модель менеджеров является всего лишь малой частью всей нелинейной реальности. Конкуренты предпочитают устанавливать цены, используя в качестве своей локальной стратегии ту же петлю обратной связи. Уменьшение цен при падающей утилизации порождает

усиливающуюся обратную связь, в которой падение цен приводит к падению доли рынка и утилизации у конкурирующих фирм. Поэтому у таких фирм появляется мотивация снизить свои цены. Компания констатирует, что ее доля рынка и утилизация товара не исправились, как ожидалось, и снова уменьшает цены, замыкая тем самым положительную петлю обратной связи. Если предложенная менеджерами модель внешних цен неверна, то их локальные и намеренно рациональные решения приводят к непреднамеренной войне цен, разрушающей рентабельность для всех.

Чтобы избежать глобального банкротства в результате локально рациональных решений, необходимо проверять частные модели. В соответствующем тесте каждая организационная функция изолируется от ее окружения до тех пор, пока она совместима с моделью, сочетающейся с правилом принятия решений. Очевидно, что в сложных системах намеренно и локально рациональные правила принятия решений, используемые отдельными действующими лицами, не могут гарантировать глобально рационального поведения. В общем случае одним из самых поразительных достижений современных исследований вычислительной сложности является выяснение того, что очень простые и хорошо определенные правила локального поведения порождают не только очень сложную и хаотичную, но и случайную динамику системы в целом (см. разд. 5.4).

Если мы посмотрим на эволюцию цен на финансовых рынках, то увидим не только временны́е ряды с определенными тенденциями и структурами, но и множество случайных явлений, определяющих колебания цен. Причина состоит в том, что цены определяются не истинными значениями, как полагали Аристотель и Адам Смит, а оценочными значениями в каждый данный момент времени. На эти оценки влияют все типы событий, которые люди с ними связывают, а также чувства и интуиция людей. В этом смысле случайные колебания цен отражают случайные изменения во внешнем мире и их оценки людьми, которые можно наблюдать на разных масштабах временно́го ряда. Таким образом, колебания цен являются результатом нелинейных взаимодействий большого числа факторов. Каким образом это большое число факторов можно представить в подходящих моделях? Даже нелинейные уравнения для динамических систем сводят сложность к определенному числу непрерывных функций. Иногда эти функции плохо известны или должны быть отобраны и изолированы от сложного фона в результате идеализации. Вместо решения сложных нелинейных уравнений с подобранными функциями может оказаться удобнее рассматривать компьютерные программы для сложных систем с большим числом взаимодействующих объектов, которые могли бы анализироваться в вычислительных экспериментах.

В духе разд. 5.4 рынок можно рассматривать как одномерный клеточный автомат. Каждая клетка представляет одну торговую единицу с конечным числом состояний (скажем, цветов), показывающих, например, выбирает ли агент покупку или продажу на данном шаге. Изменяя состояния единиц, можно интерпретировать все типы поведения. Информационный поток на рынке реализуется изменением состояний в зависимости от действий соседей на предыдущих шагах. В простом клеточном автомате Уолфрэма (рис. 7.11 *а*) состояние данной клетки определяет-

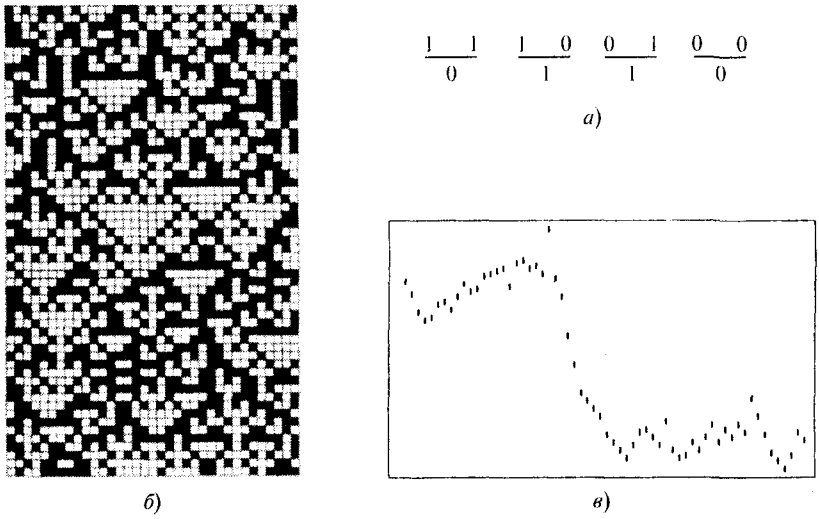


Рис. 7.11. Клеточный автомат, имитирующий динамику продаж: *а* — правило для этого автомата; *б* — пространственно-временная динамика (пространственная координата идет слева направо, временная — сверху вниз); *в* — изменение во времени полного числа белых и черных клеток

ся рассмотрением состояний двух ее соседей на предыдущем шаге в соответствии с простыми правилами для клеточных состояний 1 (черное) и 0 (белое).

В качестве грубого аналога рыночной цены на графике в виде временно́го ряда изображена переменная разность полного числа черных и белых клеток в клеточной структуре на последовательных шагах (рис. 7.11 *в*). Этот график выглядит случайным, хотя, глядя на поведение системы в целом (см. рис. 7.11 *б*), можно увидеть области предсказуемости. На реальных рынках у нас, конечно, нет ни малейшего шанса узнать детальное поведение каждой единицы, как это имеет место в клеточном автомате. Но такой тип идеализации предполагается также и в молекулярных моделях термодинамики. Хотя точное поведение каждой молекулы газа нам неизвестно, мы можем выявить тенденции поведения или полную случайность для всего газа.

В случае клеточных автоматов и эквивалентных систем хорошо известно, что даже более сложные локальные правила взаимодействия единиц не изменяют глобальной структуры поведения. Таким образом, даже в более реалистичных моделях, в которых агентам разрешается иметь разные или изменяющиеся правила, не наблюдается существенного изменения в глобальном поведении. Такие системы могут порождать сложные, хаотичные и даже случайные структуры. Так, в экономическом контексте, локально или намеренно рациональное поведение может привести к случайным флуктуациям. Отсюда вытекает, что даже с вычислительной точки зрения мы должны поддерживать экспериментальный поиск реального поведения экономических агентов в изменяющихся ситуациях. В экономике нет короткого пути к философскому камню.

7.4. Сложные общественные и культурные системы

В общественных и гуманитарных науках обычно проводят строгое различие между биологической эволюцией и историей человеческих культур. Главная причина состоит в том, что развитие наций и культур, очевидно, управляется целенаправленным поведением людей с их позициями, эмоциями, планами и идеалами, в то время как системы, участвующие в биологической эволюции, предполагаются ведомыми непреднамеренной самоорганизацией. С микроскопической точки зрения, мы наблюдаем человеческих индивидов с их намерениями и желаниями. Даже в биологических системах, например сообществах животных, имеются индивидуумы, поведение которых до определенной степени намеренно.

Критический момент в подходе, основанном на теории сложных систем, состоит в том, что, с макроскопической точки зрения, развитие политического, социального или культурного порядка является не только суммой отдельных намерений, а коллективным результатом нелинейных взаимодействий. Уже Адам Смит знал, что распределение богатства и экономического благосостояния не является следствием социального альтруизма отдельных булочников и мясников. Индивидуальные корыстолюбивые и эгоистичные намерения могут противоречить общественным интересам. Тем не менее их (нелинейные) взаимодействия приводят к коллективному равновесию за счет «невидимой руки» (Смит) или «хитрости разума» (*List der Vernunft*) (Гегель).

Нелинейные системы отдельных личностей с целенаправленным поведением могут быть более сложными, чем, например, физическая система или химическое соединение молекул. В разд. 4.3–4.4 такое поведение и сознание моделировались как самосоотносимые глобальные состояния сложных нейронных систем, вызванные нелинейными взаимодействиями нейронов. Возникновение явлений коллективного порядка с большей или меньшей степенью сложности является общим свойством, внутренне присущим всем нелинейным системам и необязательно связанным с сознанием. Государственный строй, как коллективный порядок в человеческом обществе, очевидно, не обладает сознанием или интеллектом, как ошибочно полагал Гегель, хотя его возникновение можно смоделировать определенным типом фазового перехода, вызванного нелинейным взаимодействием сознательных людей с целеустремленным поведением.

Таким образом, в математических рамках теории сложных систем понятие «эволюции» в общем случае не относится к конкретным механизмам биологической эволюции. В сложной системе так называемые уравнения эволюции описывают динамику ее элементов, которыми могут быть элементарные частицы, атомы, молекулы, организмы, люди, фирмы и т. п. Другим понятием, обладающим широким смыслом, является сама сложность. В контексте социальных наук понятие сложности имеет много аспектов, часть из которых представлена на рис. 7.12 [7.40].

В данной книге в математических рамках теории сложных систем сложность определяется, во-первых, как *нелинейность*, что является необходимым, но не достаточным условием хаоса и самоорганизации. С другой стороны, линейность требует выполнения принципа суперпозиции, который на доступном языке гласит, что

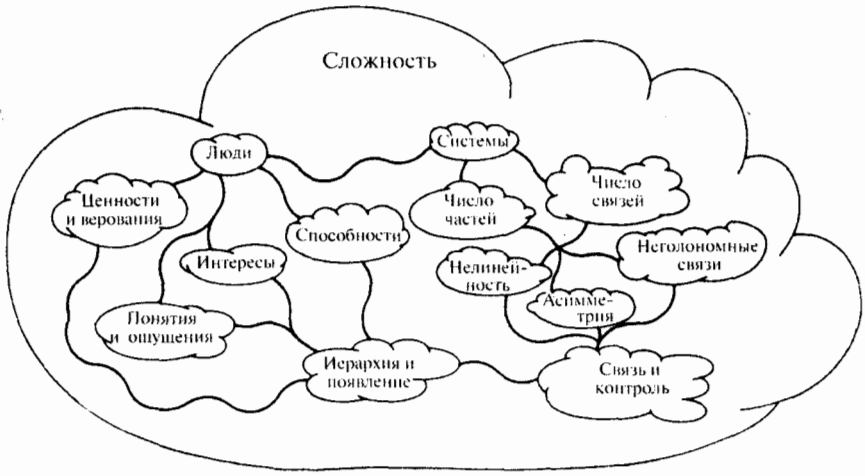


Рис. 7.12. Смысл понятия сложности [7.40]

«целое есть только сумма своих частей». Второй важный аспект сложности определяется *структурой алгоритмов*, которая обсуждалась в разд. 5.2. Теория сложности в компьютерной науке предполагает иерархию степеней сложности, зависящих, например, от времени вычисления компьютерных программ или алгоритмов. Так как нелинейные сложные системы иногда моделируются с помощью компьютерных программ, их степень алгоритмической сложности может быть сопоставлена с их способностью к самоорганизации. Эта взаимосвязь использовалась в теории клеточных автоматов (см. разд. 5.4), в которой моделировались различные классы самоорганизующихся сложных систем.

В общественных науках сложность высокоиндустриального общества определяется, главным образом, большим числом его граждан, их взаимосвязей, организационных подструктур и их зависимостей [7.41]. Следует помнить, что для возникновения явлений коллективного (синергетического) порядка в сложной системе существенно не большое число ее элементов, а их нелинейные взаимодействия. Читатель может вспомнить астрономическую задачу трех тел, имеющую в качестве возможных решений хаотические траектории.

В любом случае в математических рамках теории сложных систем не подтверждается физический или биологический редукционизм человеческой истории и социокультурного развития. Модели общественного и культурного развития следует обсуждать с учетом их конкретных связей и ограничений. Тяжелой методологической проблемой является обеспечение эмпирических тестов и подтверждений этих моделей. Поэтому компьютерное моделирование сложных культурных систем стало ключевым инструментом для обеспечения новых методов анализа их динамики, что может быть полезным для наших решений и действий.

Исторически интерес социальных наук к нелинейным задачам восходит к Томасу Мальтусу [7.42]. Он утверждал, что народонаселение обгонит свои запасы пищи, так как народонаселение растет экспоненциально, а запасы

пищи только линейно. В 1844 г. Ферхюльст модифицировал линейное уравнение, соответствующее идеям Мальтуса и описывающее экспоненциальный рост, утверждая, что скорость роста народонаселения пропорциональна произведению численности народонаселения и разности между полным количеством ресурсов и количеством тех ресурсов, которые потребляются существующим населением. Его знаменитая логистическая кривая с характерным равновесным аттрактором использовалась в демографии, экономике и многих других общественных науках. Она (в ее дискретной версии) приводит к каскаду возможных бифуркаций и фазовых переходов, включая хаос.

Эволюция биологических систем управляется их генами. В дарвиновской схеме эволюции новые типы особей появляются за счет естественного отбора среди спонтанно возникающих мутантов. В популяциях высших животных возникает новая возможность изменения поведения и адаптации за счет подражания. В человеческих сообществах существуют еще более сложные стратегии обучения, определяющие формы поведения. Чтобы стабилизировать изменение поведения у последующих поколений, общества развили особые институты – системы правосудия, государства, религии, торговлю и т. п.

Подход, основанный на теории сложных систем, обнаруживает глубокое понимание того, что ни генетическая эволюция, ни эволюция поведения не требуют глобальной программы, например наблюдающей божественной воли, жизненной силы или глобальной стратегии эволюционной оптимизации. Выживание генов или возникновение глобальных структур поведения объясняются локальными взаимодействиями составляющих структуру отдельных представителей. Чтобы прояснить этот момент, заметим, что существование «глобальной программы» – Бога, Истории или Эволюции – может быть вопросом религиозного или политического мировоззрения (*Weltanschauung*). В рамках методологии сложных систем эти гипотезы не нужны для объяснений и избыточны в духе бритвы Оккама и его экономии теоретических концепций.

Очевидно, что нелинейные системы – биологические организмы, популяции животных или человеческих сообществ – эволюционировали в сторону все большей и большей сложности. По сравнению с полисом Аристотеля или политической системой физиократов, современное общество характеризуется большой сложностью своих институтов и информационных сетей. Уже в XIX в. Герберт Спенсер отмечал, что растущая сложность является общим клеймом эволюции: «Эволюция есть возрастание сложности структуры и функции... свойственное... процессу уравновешивания...» [7.43]. Спенсер все еще рассуждал в термодинамических рамках теплового равновесия.

В синергетике показывается, что вдали от теплового равновесия существует не просто одна неподвижная точка равновесия, а иерархия более или менее сложных аттракторов, начиная с неподвижных точек и кончая фрактальными структурами странных аттракторов. Таким образом, ни в биологической, ни в социокультурной эволюции не существует фиксированного предела сложности, а есть достаточно сложные аттракторы, представляющие метастабильные равновесия определенных фазовых переходов, которые можно преодолеть при достижении определенных пороговых параметров. Структурная

стабильность общества связана с такими аттракторами.

Традиционная функциональная точка зрения на гомеостаз и саморегулирующиеся системы восходит к понятию технического термостата. Возможно, этот образ помогает понять, почему общества достаточно стабильны, но он не объясняет, почему они изменяются и почему уничтожается равновесие. В рамках теории сложных систем динамика общества понимается в терминах фазовых переходов в диссипативной системе, обменивающейся веществом, энергией и информацией с окружающей средой. Институты общества суть диссипативные структуры, которые могут возникать и оставаться неизменными в определенном интервале внешних условий. Например, в неолитических деревнях институт сельского хозяйства изменялся от «сухого земледелия» к ирригационному хозяйству, как только установившиеся общественные структуры не могли обеспечить снабжение продовольствием.

В истории индустриальных обществ можно выделить достаточно сильные экономические флуктуации, которые могли инициировать крах старых и возникновение новых общественных институтов. Например, экономический спад в США в 1922 г. был сравнительно мягким и краткосрочным и не произвел структурных изменений в обществе. В противоположность этой фазе американской истории, биржевой крах 1929 г. повлек за собой реальный эффект бабочки, породив Великую депрессию 1933 г. [7.44]. Этот кризис стал причиной финансового разорения многих фирм и появления огромного числа безработных, и он не мог быть преодолен с помощью установленных общественных институтов. Пороговые параметры установленных структур были превышены. Для преодоления кризисных явлений и предотвращения чрезмерных колебаний будущего цикла деловой активности были созданы новые институты, такие как Комиссия по ценным бумагам, Федеральная корпорация страхования банковских вкладов США и Ведомство общественных работ. Такая кейнсианская реакция американского общества вошла в историю под названием «Нового курса» президента Рузвельта.

Однако, как мы узнали от экономистов неоклассической школы и из опыта социального развития после Второй мировой войны, оптимальная стратегия общественного благосостояния может вызвать саморазвитие административной бюрократии, парализующей экономические инициативы и противодействующей первоначальным благим намерениям. Для структурной устойчивости системы чрезмерная реакция может оказаться столь же опасной, как и ее отсутствие. С другой стороны, история политических революций показывает, что общества могут полностью потерять свою структурную устойчивость и создать новые конституции, государственные институты и общественные структуры, конечно, без всяких гарантий долговечности.

С методологической точки зрения, возникает вопрос о том, каким образом можно представить социокультурную эволюцию обществ в математических рамках теории сложных систем. Понимание того, что такое аттракторы и равновесие, требует фазового портрета социокультурной динамики, что предполагает определение «социокультурного состояния» и «социокультурного пространства состояний». Но что такое социокультурное пространство состояний

викторианской Англии или Веймарской республики? Эти вопросы демонстрируют очевидную ограниченность метода. Каковы же возможности подхода, основанного на теории сложных систем, в исторических и общественных науках?

Представление исторического периода в полностью математическом пространстве состояний не может быть целью исследований. Соответствующие данные часто неизвестны, случайны и не подсчитаны. В предыдущем разделе для моделирования экономической эволюции человеческих обществ были использованы сложные системы с пространствами состояний и динамическими фазовыми портретами. Однако экономисты не заявляют при этом, что они могут представить полную картину экономического развития, например, Веймарской республики. Но нелинейные автономные или линейные экзогенные модели циклов деловой активности могут описать типичные экономические сценарии, оказывающие влияние или зависящие от ситуаций в политической и культурной истории.

Экономические модели не изучаются сами по себе. Экономисты хотят понять экономическую динамику, с тем чтобы поддержать практические решения лучшим пониманием сути экономических структур и механизмов. Экономическая динамика общества связана с его глобальным социокультурным развитием. С учетом его сложности, делались попытки построить модель социокультурного развития только таких подсистем, как городские центры. Эти модели могут отразить типичные свойства развивающихся городских систем, что может помочь политикам и горожанам принимать в соответствующих ситуациях лучшие решения.

В современных индустриальных обществах существует большое разнообразие центров всех размеров, форм и типов, от очень больших городов с большой плотностью населения до маленьких деревень с несколькими жителями. Можно спросить, чем обусловлено пространственное распределение таких разных центров и какой будет их эволюция во времени. Чтобы дать ответ, нам нужно знать глобальное пространственно-временное состояние городской системы, возникшее в результате локальных нелинейных взаимодействий ее агентов — отдельных лиц, семей, фирм, администраторов и т. п., которые могут иметь различные кооперативные или конфликтующие интересы. Структура городского центра зависит от коммерческих и производственных потребностей, потоков товаров и услуг, транспортных связей, культурной привлекательности и экологических требований. Все эти факторы можно точно описать в виде измеряемых величин. Городская система имеет несколько пунктов обмена с внешним миром. Таким образом, ее можно интерпретировать как диссипативную структуру, порожденную сложной динамической системой.

Петер Аллен предложил систему, эволюционные уравнения которой выражают нелинейные взаимодействия различных действующих субъектов. Пространственно-временная структура городской системы с ее меняющимися центрами и концентрацией жителей есть не просто тривиальная сумма различных действующих субъектов. Это есть не результат действий некоторого глобального оптимизатора или какой-то коллективной функции полезности, а результат неустойчивости последовательных равновесных состояний, вызванной нелинейными

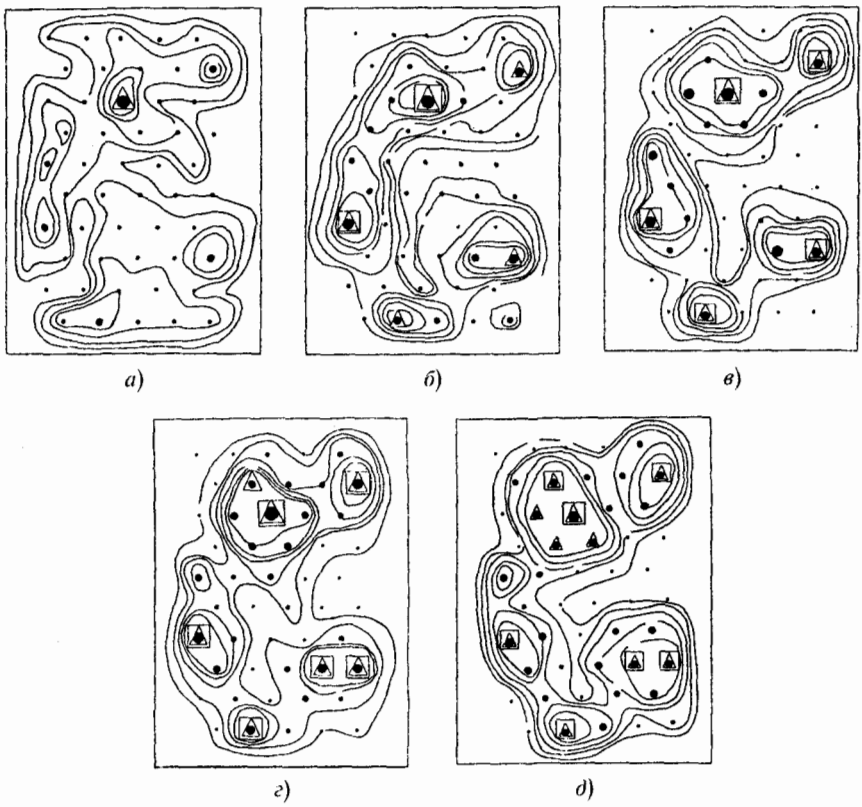


Рис. 7.13. Рассчитанная на компьютере модель городской эволюции в моменты времени: $t = 4$ (а); $t = 12$ (б); $t = 20$ (в); $t = 34$ (г); $t = 46$ (д) [7.45]

фазовыми переходами. В этом смысле эволюция городской системы управляется не платоновским царем (или диктатором), не сконструирована архитектором Декарта или предсказана демоном Лапласа. В математических рамках теории сложных систем форма городской системы представляется растущей наподобие живого организма.

В анализе Аллена [7.45] географическое пространство городской системы имитируется треугольной решеткой, построенной по 50 локальным точкам (рис. 7.13). Рост городской системы определяется двумя уравнениями, описывающими изменение населения в локальных точках и эволюцию числа рабочих мест, предлагаемых в этих точках. Число жителей и ресурс рабочих мест в данной точке связаны городским множителем в виде положительной обратной связи. Концентрация рабочих мест подразумевает внешние эффекты и общую инфраструктуру, которые, в свою очередь, порождают положительную обратную связь, в то время как местные жители и предприниматели вместе соперничают за место в центре, что обеспечивает отрицательную обратную связь.

Нарисованные на компьютере картинки рис. 7.13 *а–д* показывают эволюцию распределения населения об-

ласти, начинающуюся с площади, на которой отсутствует взаимодействие между центрами. Процесс урбанизации проявляется в фазовых переходах с меняющимися локальными аттракторами. На рис. 7.13 *б* в момент времени $t = 12$ единиц структура начинает застывать вокруг пяти главных центров. На рис. 7.13 *в* центральное ядро самого большого центра проходит через максимум. На рис. 7.13 *г* в момент времени $t = 34$ основная структура становится по существу устойчивой. В двух центрах происходит распад центрального ядра. На рис. 7.13 *д* основная структура стабильна. Спад, централизация и децентрализация вытекают из сложной нелинейной динамики.

Рисунки 7.13 *а–д* образуют ускоренный кинофильм глобальной эволюции городской системы. Каждый кадр является фазовым портретом глобального динамического состояния в заданный момент времени. Конечно, модель переупрощена. Но ее можно расширить, включив более функциональные аспекты и изучив их более сложные нелинейные взаимодействия. Тем не менее возможности модели для исследования альтернативных решений можно проанализировать на смоделированных на компьютере конкретных примерах. Систему можно подвергнуть как локальным, так и глобальным изменениям. Такие расчеты представляют чрезвычайный интерес для правительства.

Возможной стратегией может быть вмешательство в городскую структуру путем конкретного вложения капитала в определенную точку. Подобная стратегия принятия решений соответствует развитию до того времени неразвитой области городской системы. Вложения капитала подразумевают не только экономические меры, но также, например, повышение культурной привлекательности и совершенствование транспортных связей. Иногда вложение капитала может инициировать локальный эффект бабочки с глобальными последствиями, противоречащими добрым намерениям городских планировщиков. Это может возникнуть из-за нелинейности модели, ограничивающей возможности долгосрочных предсказаний.

Городская динамика — практический пример сложной системы, демонстрирующий, что добрая воля отдельных личностей недостаточна и даже может представлять опасность, если пренебречь нелинейными последствиями. Наше общество характеризуют коллективные эффекты отдельных действий. До тех пор пока это возможно, следует принимать решения, понимая эти коллективные эффекты. Важность этих результатов заключается не только в компьютерном моделировании конкретных решений и их нелинейных эффектов. Даже те граждане, которые не участвуют в конкретном планировании, должны понимать существующие в обществе сложные взаимозависимости.

Демагогическое требование появления сильного политического лидера, который может решить все проблемы, не только опасно с точки зрения демократии. Оно ошибочно по математическим причинам, связанным со сложностью, характерной для современных высокоразвитых обществ. С другой стороны, мы не должны возлагать особые надежды на отдельных политиков или партии, и затем, когда наши преувеличенные ожидания не оправдаются, реагировать на это полным политическим разочарованием. Человеческие общества характеризуются целями и интересами своих членов. Тем не менее они управляются нелинейными законами сложности, как группы атомов, молекуляр-

ные соединения, клеточные организмы или экологические популяции.

Социологические теории, рассматривающие эпистемологические последствия сложности и нелинейности, находятся все еще в стадии становления. Мостом к традиционным понятиям социологии может служить развитие соответствующей статистической математики, способной обращаться со сложностью социальных проблем. В подходе, основанном на теории сложных систем, социальные явления описываются нелинейными уравнениями. Например, когда Эмиль Дюркгейм [7.46] говорит о сплоченности в обществе, мы можем приписать функциональные аспекты этого понятия нелинейным и коллективным явлениям в сложных системах. Например, мы можем отличать «линейные» политические решения, соответствующие «индивидуальным» возможностям выбора, от «нелинейных» решений, соответствующих институциональной окружающей среде из учреждений, средств массовой информации, политических партий. Действия и реакции многих граждан и государственных учреждений можно понимать как флуктуации, присущие статистическому описанию общества. Детерминированный характер общества отражает только средние значения функций распределения, которые развиваются во времени в соответствии с нелинейными законами, такими как основное уравнение.

Такой подход к социоэкономической динамике был реализован Штуттгартской школой Вольфганга Вайдлиха. С помощью синергетики и статистической физики обосновываются математические методы моделирования, строятся конкретные модели, которые затем позволяют дать количественное описание коллективных событий в обществе. Синергетика предполагает связь между микроуровнем индивидуальных решений и макроуровнем динамических коллективных процессов. Различия между микро- и макроэкономикой или микро- и макросоциологией – хорошо известные традиционные понятия общественных наук. Синергетический подход Вейдлиха стремится к вероятностному описанию макропроцессов, включая стохастические флуктуации и вывод пренебрегающего флуктуациями квазидетерминированного описания.

Модели решений можно изучать либо аналитическими методами, например, искать точное или приближенное решение основного уравнения или уравнений для средних, или численным и компьютерным моделированием характерных сценариев. Эмпирические системы можно анализировать и вычислять, определяя параметры модели путем исследований на местах на микроуровне, или путем оценки будущих событий с помощью модельной имитации. На рис. 7.14 представлены методологические рамки синергетического подхода к моделированию социальной динамики [7.47].

Примером приложения этих методов являются городские структуры, которые можно рассматривать как эволюционирующие диссипативные структуры в духе Аллена и Пригожина, а также как стохастические системы в духе синергетики. Имеются материальные макропеременные (см. разд. 7.3), характеризующие состояние города. Влияние людей непосредственно не представлено коллективными персональными макропеременными. Деятельность муниципальных властей, строителей домов, архитекторов и других принимающих решения лиц неявно выражена в эволюции состояний городской системы. Позднее она обнаруживается в различных стилях и формах пригородов,

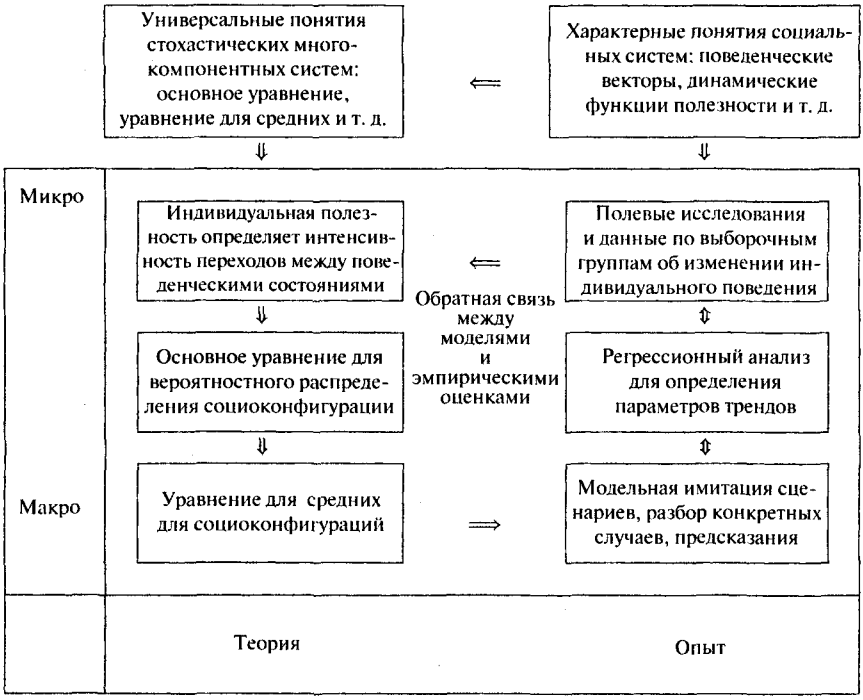


Рис. 7.14. Синергетическая методология моделирования социальной динамики [7.47]

дорог и районов города. На детальном уровне состояние города можно охарактеризовать числом, местонахождением и распределением различных типов зданий, например, жилых домов, заводов, школ, магазинов, построек, парков и т. п. В клетках решетки имеется некоторое число строительных единиц определенного типа. Например, в клетках решетки указаны макропеременные жилых домов или заводов. Множество чисел, характеризующих постройки всех типов, во всех клетках обозначается как городская конфигурация.

Чтобы использовать синергетику, должны быть установлены интенсивности переходов от одних городских конфигураций к соседним конфигурациям. Элементарное изменение городской конфигурации состоит в увеличении или уменьшении одной макропеременной (например, числа жилых домов на определенной площади) на одну, подходящим образом выбранную единицу. Интенсивности перехода между соседними конфигурациями описывают вероятность осуществления за единицу времени соответствующего перехода при заданной начальной конфигурации. Интенсивности переходов связаны с функциями полезности, измеряющими разности полезностей городской конфигурации до и после одного шага перехода. Например, может оказаться невыгодным строить жилые дома и заводы по соседству, и значительно полезнее иметь их на определенном расстоянии друг от друга на пространственной решетке. Согласно синергетике, интенсивность переходов мож-

но использовать для задания основного уравнения для вероятностного распределения $P(x, y, t)$ городских конфигураций, например, по макропеременным x числа жилых домов и макропеременным y числа заводов в момент времени t. И снова в общем случае невозможно исчерпать всю информацию, содержащуюся в получаемом из основного уравнения вероятностном распределении, путем сравнения с эмпирическими данными. Тогда это указывает на то, что нужно пренебречь флуктуациями макропеременных вокруг их средних значений и ограничиться уравнениями для квазисредних, например, для макропеременных x числа жилых домов и макропеременных y числа заводов, которые выводятся из основного уравнения. Эволюция этих уравнений приводит к нескольким возможным *стационарным состояниям*, зависящим от различных начальных условий. В соответствующих имитациях с помощью компьютера стационарные состояния городских конфигураций представляются различными распределениями жилых и производственных районов внутри города.

Моделирование применялось при решении ряда вопросов социальных наук, например, коллективного формирования политических взглядов, демографии, миграции населения и региональной географии. Такие подходы, опирающиеся на представления синергетики, особенно подходят для описания взаимодействий ряда социальных систем или процессов, например, связи между экономикой и коллективным формированием политических взглядов, или взаимодействия между экономикой и процессами миграции. В наши дни миграция является весьма болезненным вопросом, демонстрирующим, насколько может быть опасным линейное и монопричинное мышление. Добрые намерения отдельных личностей недостаточны без рассмотрения нелинейных эффектов индивидуальных решений. Линейные мышление и действие могут спровоцировать глобальный хаос, хотя локально мы действовали с лучшими намерениями.

Согласно синергетическому подходу, социоэкономическая система характеризуется двумя уровнями, различающими микроаспект индивидуальных решений и макроаспект коллективных динамических процессов в обществе. Вероятностные макропроцессы со стохастическими флуктуациями описываются основным уравнением человеческих социоконфигураций. Каждый компонент социоконфигурации относится к субпопуляции с характерным вектором поведения. Рассматривая миграцию населения, поведение и решение остаться в данном районе или уехать из него можно отождествить с пространственным распределением населения и его изменением. Таким образом, динамика модели позволяет описывать фазовые переходы между различными глобальными макросостояниями населения.

Для проверки теории можно использовать эмпирические административные данные. Модели могут описывать региональную миграцию внутри страны, вызванную различным экономическим и городским развитием, и даже происходящую во всем мире и порожденную политическим и экономическим спадом миграцию между «Югом» и «Севером», между бедными государствами и развитыми странами Западной Европы и США. Физический перенос или миграция популяций животных часто являются неконтролируемыми, случайными и линейными процессами, не содержащими никакого взаимодействия между элементами и коллективами. Но мигра-

ция людей целенаправлена (понуждается рассмотрением полезностей) и нелинейна, так как интенсивности перехода нелинейно зависят от всей социоконфигурации.

Миграционное взаимодействие двух человеческих популяций может вызвать ряд синергетических явлений, таких как возникновение устойчивого целостного сообщества, возникновение двух обособленных, но устойчивых гетто, или возникновение постоянного процесса миграции. При рассмотрении численного моделирования и фазовых портретов миграционной динамики синергетические макроявления можно отождествить с соответствующими аттракторами. На рис. 7.15 *а*, *б* показана однородная смесь обеих популяций со слабой тенденцией к образованию скоплений и сегрегации в каждой популяции. На рис. 7.15 *а* показан фазовый портрет уравнений для средних, содержащий устойчивую точку равновесия. На рис. 7.15 *б* показано стационарное решение основного уравнения и стационарное вероятностное

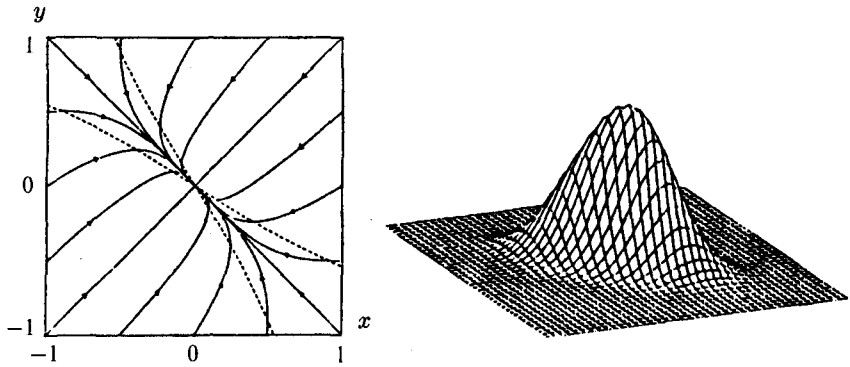


Рис. 7.15. Миграционная динамика с устойчивой точкой равновесия: *а* — фазовый портрет; *б* — вероятностное распределение [7.47]

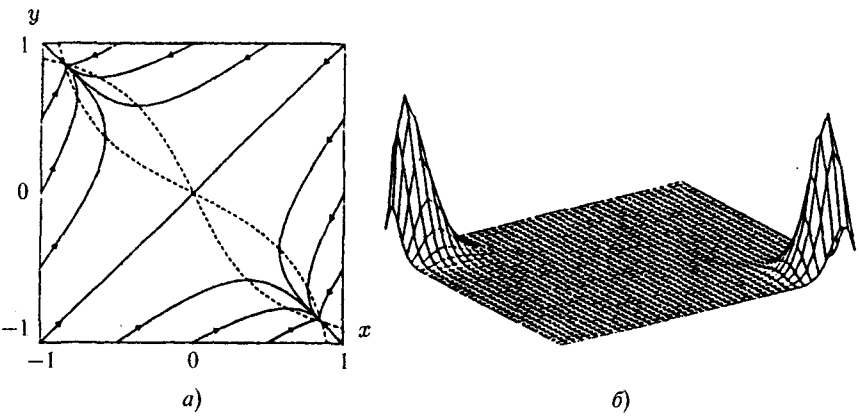
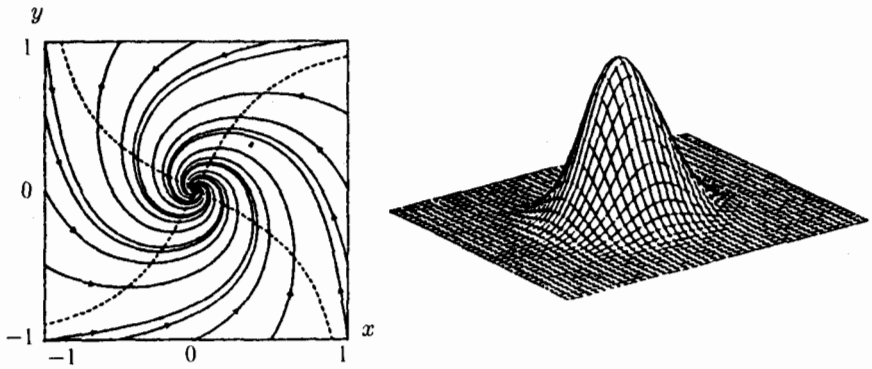


Рис. 7.16. Миграционная динамика с двумя устойчивыми особыми точками типа узел [7.47]

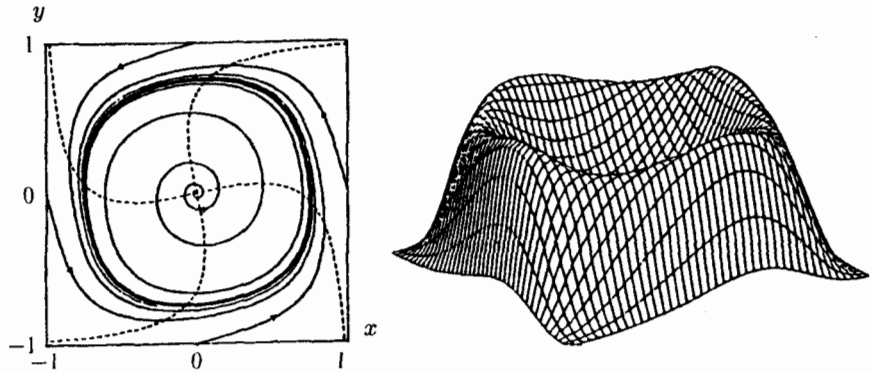
распределение с максимумом в начале координат. На рис. 7.16 *а, б* показано возникновение двух устойчивых гетто со слабой тенденцией к образованию скоплений и сильной тенденцией к сегрегации между популяциями. На рис. 7.16 *а* показан фазовый портрет с двумя особыми точками, а на рис. 7.16 *б* показано вероятностное распределение с максимумами в особых точках.

На рис. 7.17 *а, б* показана умеренная тенденция к образованию скоплений в каждой популяции и сильное асимметричное взаимодействие между популяциями. На рис. 7.17 *а* показана картина фокуса, а на рис. 7.17 *б* — соответствующее вероятностное распределение с максимумом в начале координат. Рис. 7.18 *а, б* соответствует безостановочному процессу миграции с сильной тенденцией к образованию скоплений в каждой популяции и сильным асимметричным взаимодействием между ними. Фазовый портрет на рис. 7.18 *а* показывает предельный цикл с неустойчивым фокусом в центре. Стационарное вероятностное распределение на рис. 7.18 *б* имеет четыре максимальных значе-



а) *б)*

Рис. 7.17. Миграционная динамика с устойчивым фокусом [7.47]



а) *б)*

Рис. 7.18. Миграционная динамика с предельным циклом и неустойчивым фокусом [7.47]

ния со связывающими их гребнями вдоль предельного цикла. С социологической точки зрения, этот случай можно интерпретировать как последовательное размывание областей за счет асимметричного нашествия и эмиграции популяций.

Если вместо двух рассмотреть три популяции, то в нелинейной модели миграции возникает явление детерминированного хаоса. В ряде случаев численного моделирования в конечном состоянии траекторий возникает странный аттрактор. В других случаях в результате последовательности бифуркаций возникает множество сложных циклов, переходя, в конце концов, в хаос.

Другое практическое применение подхода, основанного на теории сложных систем — это менеджмент и организационная социология [7.48]. Действительно, современные фирмы приступили к реорганизации и децентрализации своих больших организаций, для того чтобы дать возможность развитию успешных стратегий, несмотря на растущую сложность их задач. Например, они стали поддерживать организационную подвижность, создавая новые направления, позволяющие нацеленным на решение задачи группам быстро формироваться и перестраиваться, если того требуют обстоятельства. Подвижные организации показывают более высокие уровни кооперации, чем группы с фиксированной социальной структурой. Столкнувшись с социальной дилеммой, подвижные организации показывают огромное разнообразие сложных кооперативных типов поведения, вызванных нелинейным взаимодействием между индивидуальными стратегиями и структурными изменениями.

Таким образом, динамику этих социальных групп можно смоделировать на основе теории сложных систем. Имитация с помощью компьютеров может привести к более глубокому пониманию форм поведения, которое может помочь менеджерам достичь соответствующих результатов. Конечно, если модели сложных систем приемлемы, то долгосрочное планирование и общий контроль централизованным надзирателем исключены.

Модель состоит из целеустремленных агентов, делающих выборы, зависящие от их индивидуальных предпочтений, ожиданий и убеждений, а также от неполного знания прошлого. При определенных пороговых значениях формы кооперации складываются из индивидуальных выборов. Если доля группы, воспринимаемой как взаимодействующая, превышает критическое пороговое значение, агент будет взаимодействовать. Критические пороги зависят от размера группы и социальной организационной структуры, возникающей из структуры взаимозависимостей между отдельными личностями. Если группам позволено изменять свою социальную структуру, то потенциал совместных решений проблем возрастает. Преимущества организационной текучести должны быть сбалансированы, чтобы не допустить возможной потери эффективности. Эффективность организации можно измерить ее способностью получать со временем чистую выгоду.

В фирмах обычно существует как неформальная структура, возникающая из структуры эмоциональных связей между сотрудниками, так и формальная структура, диктуемая иерархией. Неформальная структура возникает за счет определенного типа самоорганизации и может быть представлена социометрической структурой социальной сети. Такой подход, восходящий к ранним социологическим исследованиям социальной струк-

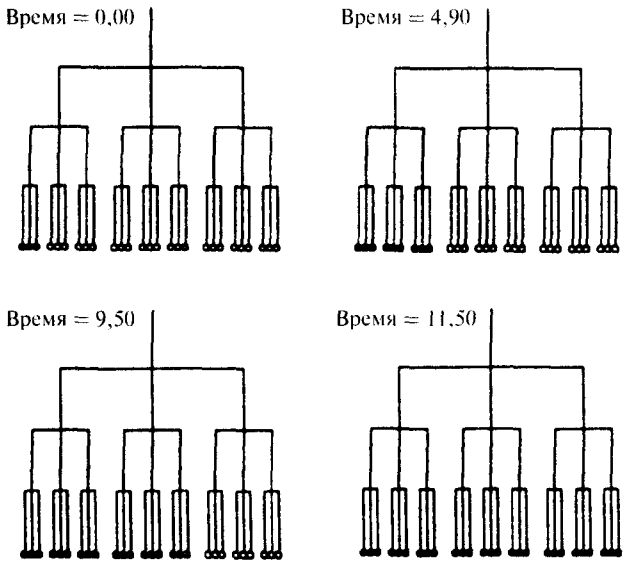


Рис. 7.19. Социальная динамика в фиксированной трехуровневой иерархии. Кружки на самом нижнем уровне каждого дерева представляют индивидуумов; черные кружки соответствуют сотрудникам, а белые кружки — перебежчикам [7.51]

туры городских семей в 1950-е гг., развился в хитроумный компьютеризованный инструмент социологии [7.49]. С микроскопической точки зрения отдельных взаимозависимостей возникает глобальный взгляд на социальные структуры.

На рис. 7.19 и 7.20 эти структуры изображены как деревья. Каждая ветвь представляет подраздел более высокого уровня иерархии. Моды на нижнем уровне представляют индивидуумов, причем черные кружки представляют сотрудников, а светлые кружки — перебежчиков. Число организационных слоев, разделяющих двух индивидуумов, определяется числом мод, на которые нужно подняться по дереву от каждого индивидуума, чтобы достичь общего предка. Расстояние между двумя сотрудниками в организации измеряется числом отдельных слоев. По предположению, чем больше расстояние между двумя сотрудниками, тем меньше их действия влияют друг на друга. Таким образом, дерево иллюстрирует величину и размер кластеризации в группе.

Ключевым является вопрос о том, каким образом структура и текучесть группы будет влиять на динамику кооперации. Текучесть зависит от того, насколько легко индивидуумы могут передвигаться в рамках социальной структуры и изменять ее. В рамках теории сложности макроскопические свойства системы выводятся из лежащих в основе взаимодействий между составными частями, которые математически моделируются нелинейными уравнениями эволюции [7.50].

На рис. 7.19 *а–г* из работы Гланса и Хубермана показана компьютерная имитация ряда фазовых переходов в фиксированной социальной структуре, трехуровневая иерархия которой состоит из трех больших кластеров, каждый из которых подразделяется

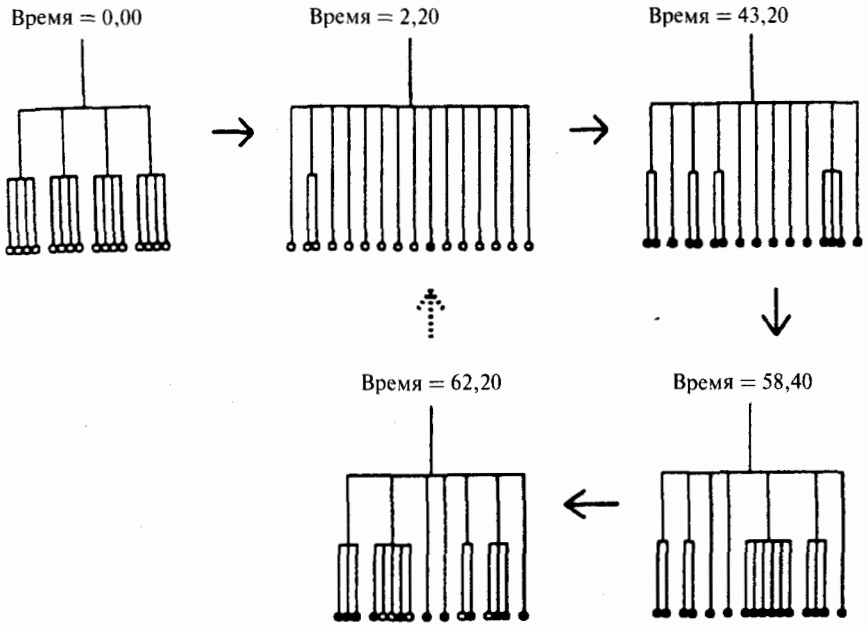


Рис. 7.20. Социальная динамика в иерархии с текучей структурой [7.52]

на три кластера из трех агентов [7.51]. Окончательное всеобщее сотрудничество на рис. 7.19 *г* было инициировано действиями нескольких агентов, объединенных вместе на рис. 7.19 *а*. Эти агенты укрепляют друг друга и в то же время могут побуждать агентов, удаленных на один уровень дальше, начинать сотрудничество. Этот рост сотрудничества может влиять на сотрудничество еще более удаленных агентов.

Маленький акт сотрудничества внутри иерархии может инициировать широко распространяющийся переход к сотрудничеству внутри всей организации. Этот каскад растущего сотрудничества приводит к равновесию. Однако группы с фиксированными структурами легко перерастают границы, внутри которых сотрудничество устойчиво. В этом случае группа быстро эволюционирует в равновесное состояние всеобщего отступничества. Но даже в этих границах формы сотрудничества могут быть метастабильны в том смысле, что агенты продолжают долгое время сотрудничать, пока не происходит внезапное нарушение симметрии с переходом к полному отступничеству.

В текучих структурах отдельные агенты способны передвигаться внутри организации. Индивидуумы принимают решение о сотрудничестве или отказе от него в соответствии с той долгосрочной выгодой, которую они рассчитывают получить. Чтобы оценить свое положение в структуре, индивидуум сравнивает долгосрочную прибыль, которую он может ожидать, если останется на месте, с той долгосрочной прибылью, которую можно ожидать, если он перейдет на другое, случайно выбранное место. При оценке своей позиции индивидуум, если он чувствует, что ему нечего терять, рассматривает также возмож-

ность вырваться и образовать новый кластер. То, насколько легко агенты соблазняются на отделение, определяет порог отделения, равный доле максимального возможного дохода за определенный период времени.

На рис. 7.20 *а–д* представлены моментальные снимки фазового перехода в текучей организации [7.52]. Сначала (рис. 7.20 *а*) все члены группы, разделенной на четыре кластера по четыре агента в каждом, дезертируют. Рис. 7.20 *б* показывает, что почти все агенты отделились и существуют самостоятельно. В такой ситуации агенты намного охотнее переключаются к стратегии сотрудничества, как это показано на рис. 7.20 *в*. Из-за неопределенности ситуации агенты случайным образом переключаются между кластерами (рис. 7.20 *г*). Когда кластер становится чересчур большим, внутри него может начаться переход к дезертирству. На этой фазе перехода (рис. 7.20 *д*) все больше и больше агентов возвращаются к самостоятельности и повторяется аналогичное развитие. По наблюдениям, цикл такого типа часто возникает в искусственных организациях.

Как в случае роста городов (см. рис. 7.13) или миграционной динамики (рис. 7.15–7.18), компьютерные эксперименты, имитирующие социальные организации, не могут давать детерминированные предсказания индивидуального поведения, но способны помочь качественному пониманию социальной динамики. Соответственно, должны иметь место подходящие обстоятельства, которые позволяют исправить реальные условия людей в соответствующих социальных системах.

Модели социокультурной эволюции должны рассматривать несколько взаимодействующих сегментов общества. Если общество составлено из перекрывающихся слоев и диссипативных структур, необходимо найти подходящую картину того, как они возникли. В сложных событиях, включающих взаимодействующие диссипативные системы, возникновение новых макроструктур является в общем нецентрализованным и незапланированным событием. Кроме того, каждая сфера включает много более или менее смутных идей, чувств и проектов, оправдывающих и вдохновляющих действия людей. Их нельзя непосредственно идентифицировать как измеряемые величины, так как они растворены в своего рода господствующей тенденции, носящей название «стиль жизни». Тем не менее стиль жизни общества – это типичное социокультурное макроявление, зависящее от нескольких доступных идентификации взаимодействующих факторов, например, от условий, связанных с экономикой, технологией, работой, путешествиями, экологией и средствами массовой информации.

В наше время эволюция технологий стала движущей силой изменений, оказывающих влияние на многие компоненты стиля жизни. В отношении процессов самоорганизации важным свойством технологических достижений является то, что они автокаталитичны, т. е. каждая инновация стимулирует рождение следующей. Если технологическая и социальная эволюция интерпретируются как результат последовательных замен технологий, главной идеи («парадигмы») или артефакта на другие, тогда развитие от роста до насыщения может быть математически смоделировано структурой взаимозависимых логистических кривых. Утверждение, что технология развивается через серию фазовых переходов и замещений, означает, что ее можно было рассматривать как последовательность логистических кривых. Каждая кривая до-

стигает уровня насыщения. С каждым уровнем эволюционной инновации развивается переход к новой логистической кривой.

В разд. 7.3 мы уже обсуждали, как эти фазовые переходы в технологии связаны с ростом и упадком экономик. Развитие компьютерных и информационных технологий, как никогда ранее в истории, повлияло на жизнь человечества практически во всех сферах. По-видимому, это сравнимо с квазиэволюционным процессом производства компьютеров и информационных систем растущей сложности. Ученые-компьютерщики используют терминологию Герберта Спенсера, когда они говорят о поколениях компьютеров, сокрушающих сложность предыдущих поколений. Действительно, сложность функционирования системы возросла. Однако, с другой стороны, сложность проблем, измеряемая, например, затрачиваемым компьютерным временем, уменьшилась. Сокращение сложности проблемы — это параметр порядка квазиэволюционного процесса в таких технологиях.

Компьютеры и информационные системы стали ключевой технологией социокультурного роста, развивающегося в рамках квазиэволюционного процесса. *Репликаторами* этого процесса являются любые информационные структуры, пополняющие культуру и разносящиеся от человека к человеку. Так как люди, в противоположность молекулам или примитивным организмам, обладают собственными целями, процесс распространения информационных структур реализуется не через механическую имитацию, а через передаваемую информацию. По аналогии с генами, эти репликаторы иногда называют «мемами» [7.53]. Они включают идеи, верования, моральные устои, обычаи, технологию и т. п.

Любая структура, которую можно распространить, передавая информацию, — это *мем*, даже если его хозяин-человек не может это ясно выразить или вообще не знает о его существовании. Важно заметить, что репликаторами человеческой культуры являются мемы, а не люди. Наша способность изменять склад ума позволяет культурной эволюции происходить не путем отбора людей, а путем «позволения нашим теориям умирать от нашего имени», как заявил Карл Поппер [7.54].

В рамках теории сложных систем мы, конечно, можем говорить об «эволюции» системы в абстрактном смысле математических уравнений эволюции. Биологическая эволюция с ее специальными биохимическими механизмами есть всего лишь частная модель общей математической схемы, характеризующей сложные системы. Следовательно, эволюционный характер человеческой культуры не может быть сведен к биохимическим механизмам биологической эволюции. Однако не следует неправильно воспринимать понятия типа «мемов» как простой социал-дарвинистский жаргон. Они могут иллюстрировать основные свойства сложных систем, которые можно математически определить и эмпирически проверить.

В этом смысле развитие всемирной сети связи можно интерпретировать как эволюцию сложных систем с целью распространения мемов среди людей и установления меметической экосистемы [7.55]. Составляющие человеческую культуру мемы, так же как их механизмы изменчивости и отбора, многообразны. В разд. 6.3 мы уже рассматривали «экономических мемов» с их механизмом отбора рынков. Экономические рынки более или менее открыты к собственной окружающей среде в человеческом

обществе. Они функционируют под действием широкого диапазона ряда в разной степени обязывающих правил, накладываемых разными правовыми и регуляторными институтами.

В человеческих обществах рамки рынка обеспечиваются правовыми институтами и деятельностью правительства. В рамках сложных систем эти институты не защищены от эволюционных сил. Они развиваются внутри политических экосистем со своими механизмами изменчивости и отбора законов [7.56]. Некоторые политические мемы, вроде политических убеждений, лозунгов или программ, могут стать аттракторами в динамическом фазовом портрете общества. В открытом демократическом обществе они могут как возникать, так и исчезать, если их привлекательность уменьшается под давлением отбора конкурирующих альтернатив.

7.5. Сложные коммуникационные сети и поиск информации

Эволюция в природе не концентрируется на отдельных организмах с возрастающей разумностью, основанной на обработке информации нейронами. В отдельных видах и популяциях мы наблюдаем растущую степень приспособления, допускаемого растущими возможностями роевого, коллективного и распределенного разума с внетелесной обработкой информации. В *социобиологии* популяции муравьев и термитов организуют сложные транспортные, информационные и коммуникационные системы с помощью «роевого разума». В этом случае при постройке сложных сетей дорог между своими бивуаками отсутствует центральный контролер. Порядок в системе возникает в соответствии с химическими сигналами между тысячами насекомых. В человеческой истории также возникли сложные транспортные и информационные сети с самоорганизующимся поведением. Телефонные и железнодорожные сети находятся под контролем глобальных станций, в то время как автомобильное движение по сети дорог зависит от локального поведения водителей. Следовательно автотрафик можно рассматривать как сложную динамическую систему с типичными явлениями колебаний («стой — двигайся»), пробками и хаосом.

Способность управлять сложностью современных обществ решающим образом зависит от эффективных коммуникационных сетей. Как нейронные сети в биологических мозгах, эта сеть определяет способность к обучению, которая может помочь человечеству выжить. В рамках теории сложных систем мы должны моделировать динамику коммуникационных технологий, распространенных в своем информационном и культурном окружении. Таким образом, мы говорим об информационной и вычислительной экологии. Уже существует ряд реализованных примеров сетей, например, используемых при предварительном заказе авиабилетов, связи между банками или исследовательскими лабораториями, которые включают сети, содержащие много компьютеров разных типов.

Типичными свойствами открытых вычислительных систем без центральных элементов управления являются неполное знание и задержка информации. Эти огромные сети, возникающие в результате растущей связываемости различных центров компьютерной обработки информации, становятся самоорганизующимися системами, отличающимися от своих ин-

дивидуальных, управляемых программой компонентов. Незапланированный рост приводит к огромному разнообразию технических структур и применений с усложняющимися возможностями взаимодействия сетей. Окончательным следствием множества возможных малоприятных сценариев может оказаться устрашающее виде́ние разделенного мира роботов, порабощающих человеческую культуру.

Так как общемировой рост числа локальных информационных и вычислительных центров не может планироваться централизованным процессором, он, скорее всего, описывается нелинейной динамикой, которая должна изучаться в рамках теории сложных систем. Даже изучение упрощенного случая обеспечило бы решающее понимание сложной динамики современной социокультурной эволюции. Сложные взаимозависимости вычислительных экологий нарушают обычные требования используемого в традиционном менеджменте иерархического разложения на технические, промышленные или административные блоки. Современные промышленные коммуникационные сети являются растущими открытыми системами, которые должны использоваться без центрального управления, синхронизации или согласования данных, получаемых от других агентов, например, от машин или людей. Таким образом, динамическая теория информационных и вычислительных процессов, включающая свойства неполного знания и задержанной информации, обеспечит хорошо известные эволюционные структуры в фазовом пространстве — особые точки, предельные циклы, странные аттракторы.

Неполное знание приводит к интервалу оптимальных значений, в то время как задержки в доступе к информации индуцируют колебания в числе участвующих агентов. В случае конечных ресурсов в результате кооперации и конкуренции могут возникать синергетические эффекты. Хаос не допускает никакой устойчивой стратегии решения задач. Марвин Минский изучал упрощенную модель коллективного решения задач почти независимыми агентами, которые работают над множеством связанных задач и взаимодействуют друг с другом. В конце 1980-х гг. этот пример уже использовался как проектируемая модель для схемы распределения компьютеризованных информационных систем [7.57].

Мир собирается заполниться огромным количеством вычислительных систем возрастающей сложности [7.58]. Среди них будут традиционные машины фон Неймана, векторизующие суперкомпьютеры, мультипроцессоры с совместно используемой памятью, машины с переменной структурой связей [7], нейросетевые имитаторы, миллионы персональных компьютеров, размножившиеся по миру, как амебы, и будущие молекулярные машины. Эти компьютерные системы становятся все больше связанными с такими информационными системами, как спутники, телефоны и оптоволоконные линии. Реальностью становится идея о самоорганизующейся общемировой сети программного обеспечения и «железа». Решающим шагом стал перенос основанного на сложных системах подхода с нейронных сетей на глобальные сети технической информации (*World Wide Web*). В 1969 г. в министерстве обороны США была установлена компьютеризованная информационная сеть.

[7] Параллельные процессоры, настраивающиеся на структуру задачи. — *Прим. пер.*

Она стала ядром разросшейся сети из 175 000 компьютеров, 936 подсетей и бесчисленного количества людей. Рост Интернета не планировался и не контролировался никаким центральным процессором, а был более или менее анархичным процессом. Тем не менее организационные структуры возникают из хаоса и/или упадка в результате глобальной самоорганизации.

В сложных информационных сетях знание и информация распределены среди нескольких центров и отдельных программистов. Сложность этих сетей исключает центральное планирование. Как все системы, включающие цели, средства, и действия, система вычислений должна описываться в экономических терминах. Очевидно, что уже существует рынок вычислений для программ и «железа», использующий рыночные механизмы. Как мы видели в разд. 7.2–7.3, рынки являются формой самоорганизующейся сложной экосистемы. Согласно фундаментальной идее Смита, сила выбора потребителя может заставить экосистемы вычислительного рынка служить потребностям человека лучше, чем способен запланировать или понять любой программист или центральный процессор. Причина заключается в невероятных сложности и разнообразии вычислительных экосистем, связанных с человеческим рынком.

Читатель может вспомнить сложность биологических экосистем различных уровней — клеток, органов и организмов. Элементы вычислительной экосистемы похожим образом группируются на различных уровнях согласно растущей сложности ее вычислительных систем. На рис. 7.21 показана глобальная сеть USENET, выросшая в результате множества местных инициатив [7.59]. Сеть показана в состоянии на начало 1990-х гг. как часть Интернета.

Сегодня Интернет можно рассматривать как сложную открытую компьютерную сеть из автономных узлов

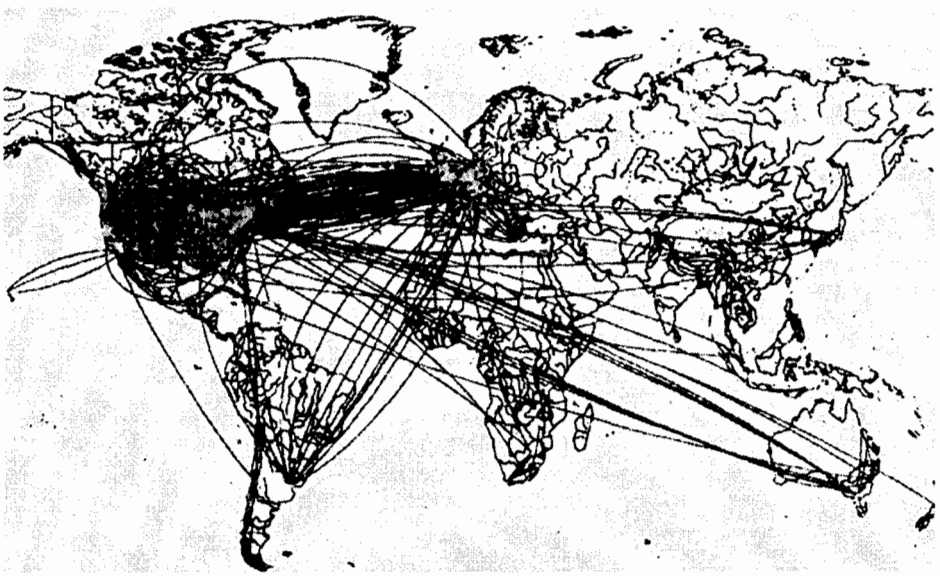


Рис. 7.21. Глобальная сеть в начале 1990-х гг. [7.59]

(хостов[8]), маршрутизаторов[9]), шлюзов[10]) и т. п.), самоорганизующуюся без участия центрального управляющего механизма. В случае связи с компьютерами через Интернет, сообщение (например, электронное письмо) на подходящем компьютерном языке (например, HTML) должно быть закодировано и направлено в несколько протокольных слоев, прежде чем оно может быть послано в сеть как пакет байтов от отправителя к получателю. Например, связь в компьютерной сети реализуется моделью OSI[11]) Международной Организации Стандартов (ISO).

Поток информации реализуется информационными пакетами с указанными адресами отправителя и получателя (например, IP-адрес[12]). Интернет вместе с КА и КНС разделяет понятие локальной активности в следующем смысле: маршрутизаторы являются узлами сети, определяющими локальный путь каждого пакета с помощью локальных маршрутных таблиц с оценкой исходных параметров для соседних маршрутизаторов. Маршрутизатор продвигает каждый пакет к соседнему маршрутизатору за наименьшую цену, так что он добирается до места назначения (рис. 7.22). В духе парадигм КА и КНС локальные маршрутные таблицы могут рассматриваться как «эталоны» локальной нелинейной обработки информации.

Так как маршрутизатор способен обрабатывать в данный момент времени лишь один пакет, то другие поступающие пакеты должны сохраняться в буфере. Если поступит больше пакетов, чем может сохранить буфер, маршрутизатор отбрасывает лишние пакеты. Отправители пакетов ожидают подтверждения от хоста-получателя. Вся эта деятельность маршрутизаторов по сохранению и повторной отправке сообщений может вызвать перегрузку в Интернете. Флуктуации перегрузок информационных пакетов можно косвенно наблюдать с помощью экспериментов по отражению, заключающихся в контрольных посылках сообщений между соседними маршрутизаторами. Контролирующий хост между двумя маршрутизаторами периодически посылает серию отраженных пакетов обеим маршрутизаторам. Распространение пакетов по замкнутому пути с возвращением в точку отправки занимает

---

[8]) Любое устройство, подключенное к сети и использующее протоколы TCP/IP; общий термин, описывающий нечто, содержащее ресурс и предоставляющее к нему доступ. — *Прим. пер.*

[9]) Программно-аппаратное устройство, физически объединяющее вместе две или более компьютерные сети, передавая с помощью специального ПО пакеты из одной сети в другую. — *Прим. пер.*

[10]) Сетевое устройство или компьютер, осуществляющие связь между двумя различными (использующими разные коммуникационные протоколы) компьютерными сетями или мэйнфреймом и сетью. Кроме передачи данных, могут выполнять их фильтрацию. — *Прим. пер.*

[11]) Взаимодействие открытых систем (Open Systems Interconnection), семиуровневая модель протоколов передачи данных, утвержденная ISO в 1984 г., для обеспечения взаимодействия открытых систем. В модели OSI все сетевые функции разделены на уровни таким образом, что все вышележащие уровни пользуются услугами нижележащих через стандартизованные интерфейсы. Такая структура позволяет модифицировать любой из уровней, не затрагивая остальные. Уровни OSI снизу вверх: физический (physical layer), канальный (data link layer), сетевой (network layer), транспортный (transport layer), сеансовый (session layer), представления данных (presentation layer) и прикладной (application layer). Поскольку уровни с первого по третий управляют физической доставкой данных по сети, то их иногда называют уровнями среды передачи данных (media layers)

[12]) Сетевой адрес в Интернете — 4-байтовое (32-разрядное) число, задающее уникальный номер хост-компьютера в сети. — *Прим. пер.*

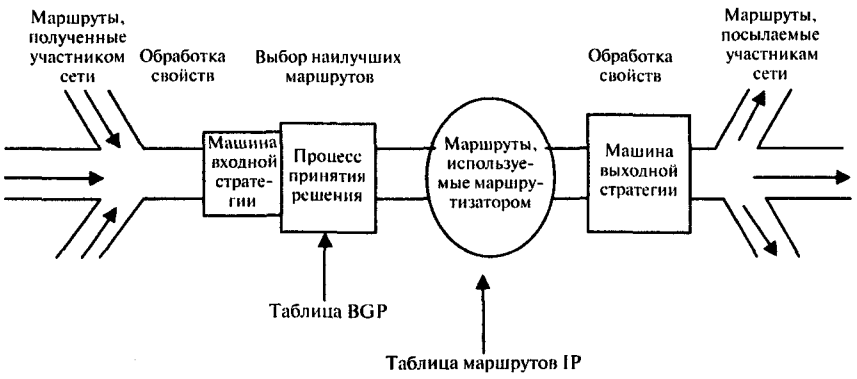


Рис. 7.22. Маршрутизаторный узел в Интернете [7.60]

определенное время на передачу и подтверждение приема (время кругового обращения, ВКО). Перегрузка связана с большими значениями ВКО. Флуктуации этого времени возрастают при продвижении по последовательности маршрутизаторов в сети Интернет (рис. 7.23).

В системе автомобильного движения фазовый переход от движения без пробок к движению с пробками зависит от управляющего параметра — средней плотности автомобилей. При критическом значении можно наблюдать флуктуации с автомодельным поведением и степенным законом распределения. Исходя из этой аналогии, управляющий параметр плотности данных определяется распространением перегрузки от маршрутизатора к соседним маршрутам и растворением перегрузки на каждом маршрутизаторе [7.62]. Кумулятивное распределение насыщения перегрузки является параметром порядка в образовании структур. Существуют фазовые переходы между умеренной фазой и фазой перегрузки. Умеренная фаза соответствует случаю, когда средний входной сигнал информационной системы меньше максимального выходного сигнала. Условие критичности достигается тогда, когда средняя скорость входного сигнала равна максимальной скорости (рис. 7.24).

В критической точке, когда скорость распространения перегрузки равна ее растворению, в потоке данных можно наблюдать фрактальные и хаотические свойства. Мы можем проанализировать в разных временны́х шкалах автомодельность флуктуаций информационных пакетов, что является необходимым (но не достаточным) условием появления странных аттракторов (рис. 7.25).

Перегруженные буферы удивительно напоминают людей, зараженных какой-то инфекцией. Если буфер перегружен, он пытается отправить пакеты к соседним маршрутизаторам. Таким образом, перегрузка распространяется в пространстве. С другой стороны, маршрутизаторы могут восстановиться, если перегрузка, направленная к их собственной субсети и от нее, меньше, чем сервисная скорость маршрутизатора. Описание процессов эпидемии малярии в связи с динамикой маршрутизатров является не просто иллюстративной метафорой, а дает указание о поведении нелинейных математических моделей. Следователь-

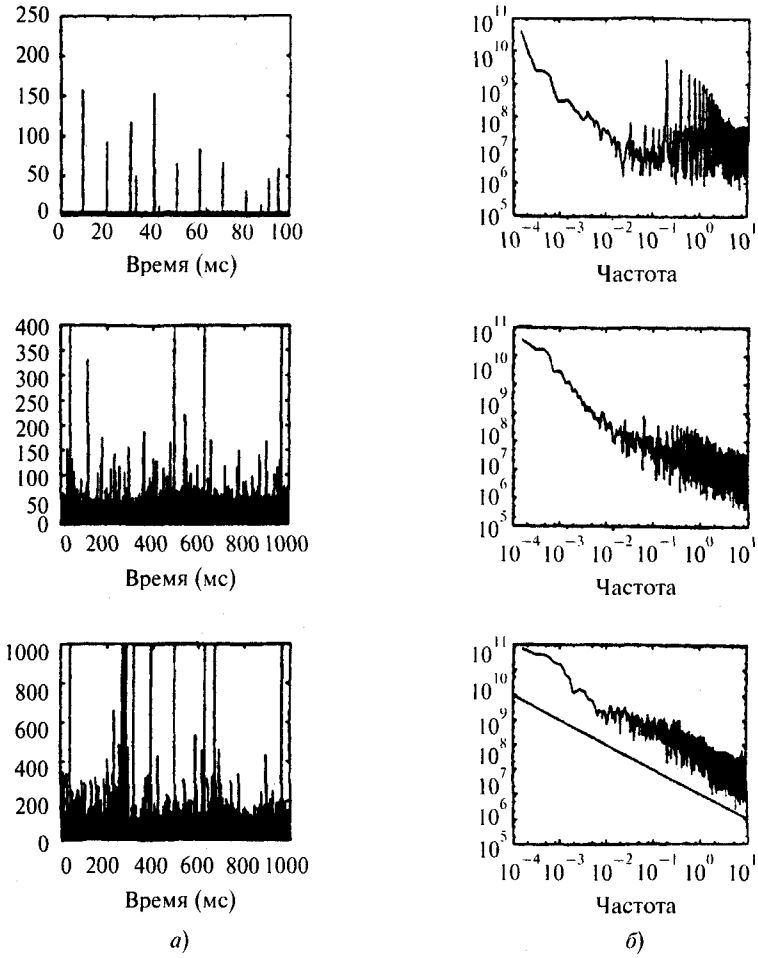


Рис. 7.23. Флуктуации данных о ВКО в маршрутизаторах Интернета: *а* — временны́е ряды; *б* — спектры мощности

но, соответствующие КА и КНС, порождающие распространение нелинейных волн, способны имитировать трафик данных во Всемирной паутине [7.65]. Вычислительные и информационные сети превратились в технические суперорганизмы, развивающиеся в квазиэволюционных процессах. Компьютерные сети порождаются вычислительными экологиями. Если Интернет представляет собой очень сложную информационную сеть, то мы должны управлять информационным потоком без потери информации в хаотических ситуациях. Популярным девизом для описания этих проблем растущей сложности является выражение «Затерян в сети».

Информационный потоп в более или менее хаотичном Интернете бросает вызов разумному информационному поиску [7.66]. Информационный поиск (ИП) в Интернете можно рассматривать как решающую процедуру

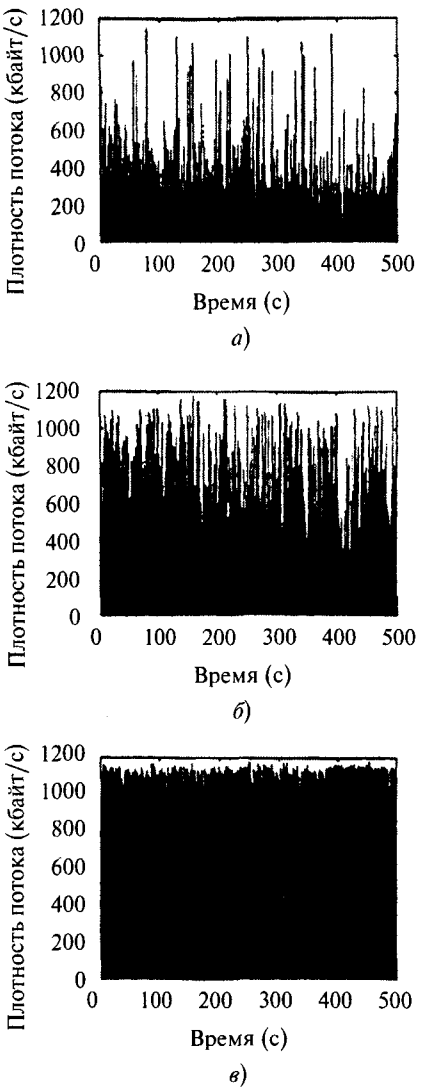


Рис. 7.24. Фазовые переходы трафика данных: *а* — низкой, *б* — средней и *в* — высокой средней плотности

для оценки и отбора наиболее подходящих документов, отвечающих определенным ограничениям. В двоичной (булевой) логике документ либо соответствует (1), либо не соответствует (0) информационному запросу. В нечеткой логике его степень соответствия лежит в интервале [0, 1]. Каждый документ характеризуется ключевыми словами. Запрос есть предложение из логически связанных ключевых слов. Документ соответствует запросу, если в нем и в булевом предложении для запроса имеются одинаковые ключевые слова. Запрос и документы можно геометрически представить как векторы в векторном пространстве ключевых слов. Степень соответствия ключевых слов в документе или запросе взвешивается координатами. Совпадение запросов и документов измеряется косинусом (со зна-

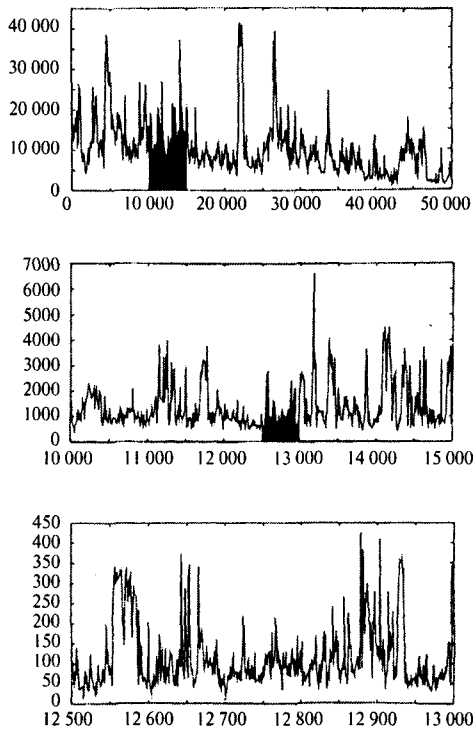


Рис. 7.25. Автомодельность флуктуаций информационных пакетов на разных временны́х масштабах («странный аттрактор») [7.64]. (Участок, помеченный черным на верхнем рисунке, в растянутом по оси абсцисс виде показан на среднем. Черный участок на среднем растянут на нижнем. — *Прим. ред.*)

чениями между 0 и 1) угла между представляющими их векторами.

Чтобы улучшить информационный поиск, можно применять генетические алгоритмы. Эти алгоритмы оптимизируют популяции хромосом в последовательных поколениях путем воспроизводства, мутации и отбора. В информационном поиске они используются для оптимизации запросов документов. *Хромосома* — это последовательность документов, характеризующаяся взвешенными ключевыми терминами в двоичных кодах. По расширению, *популяции* — это множества хромосом. *Мутация* — это случайное изменение двоичных цифр. Последовательные двоичные коды можно воссоединять. Степени соответствия измеряют значимость документов. *Селекция* — это оценка популяций документов.

Рассмотрение Интернета как своего рода супермозга с самоорганизующимися свойствами обучения и адаптации является не простой метафорой [7.67]. Для управления информационным потоком в Интернете мы могли бы использовать аналогии с мозгом как эвристическим устройством. Информационный поиск уже реализован нейронными сетями, адаптированными с синаптической гибкостью к информационным предпочтениям пользователей-людей. Многослойные нейронные сети можно применять для оптимизации запросов на документы (рис. 7.26). Синаптические связи («веса») между нейронами изменяются в соответствии с обучающими алгоритмами. Топология нейронной сети состоит из входного слоя, содержащего информационные предпочтения пользователя $q_{ui}^{(s)}$ с ключевыми терминами t_i поиска u в состоянии s, нейронного слоя ключевых терминов t_i, нейронного слоя документов d_i, и выходного слоя резуль-

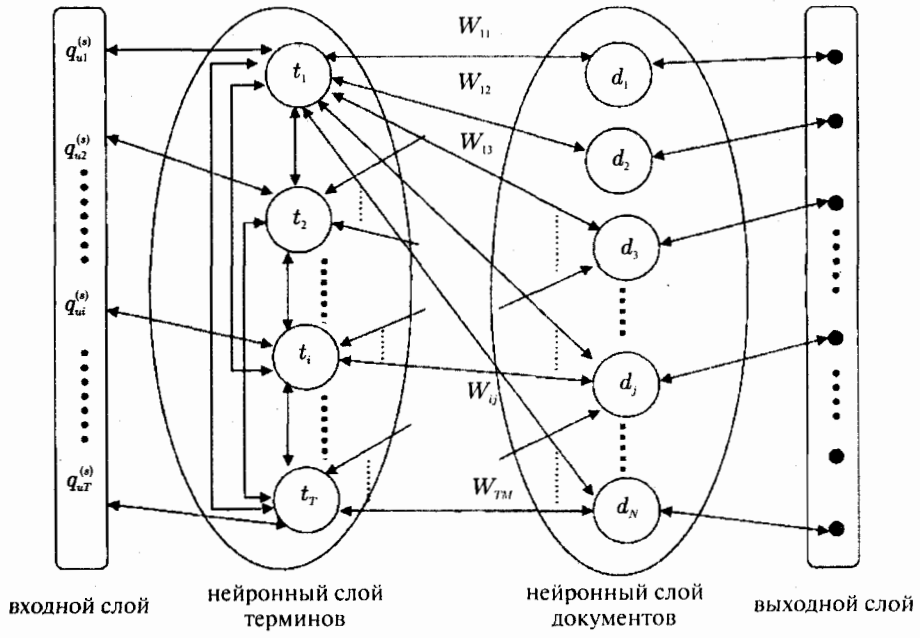


Рис. 7.26. Информационный поиск с помощью многослойных нейронных сетей [7.68]

татов поиска. Степень соответствия терминов в документе отвечает весам между нейронами терминов и документов. Нейроны возбуждаются, если сумма взвешенных входных сигналов превышает критический порог. Обучающий алгоритм обеспечивает первый результат запроса путем продвижения по сети. Отклонения в предпочтениях пользователя взвешиваются, передаются назад к термину и входному слою («обратное распространение ошибки») и исправляются за несколько итераций.

> Нейронные карты в мозге (например, зрительная кора) генерируют представления мира нейронными кластерами. Аналогично действуют самоорганизующиеся карты Кохонена (*рис.* 4.14). Их *можно использовать* для нахождения семантического сходства между самоорганизованными в кластеры документами. Каждый нейрон в нейронной сети (пространство выхода) связан с весом нейронной активности (пространство входа). Например, 245 документов о разных странах были охарактеризованы 952 ключевыми терминами с присвоенными весами. На карте 10 × 10 нейроны были связаны с именами стран и регионов в соответствии с входной структурой документов [7.69]. Страны и регионы с похожими свойствами самоорганизуются в соседние кластеры (например, Западная Европа, Восточная Европа, Южная Америка и Африка).

В социобиологии на примере популяций муравьев и термитов мы можем изучить организацию движения и обработки информации с помощью роевого разума. С технической точки зрения, нам нужны распределенные по сетям разумные программы. Уже существуют более или менее разумные виртуальные организмы (агенты), которые обучаются, самоорганизуются и приспосабливаются к нашим индивидуальным предпочтениям информации, отбору нашей электронной почты, подготовке экономических сделок или защиты, наподобие иммунной системы человека, от атак враждебных компьютерных вирусов. Создаваемые виртуальные агенты обладают разными степенями автономности, мобильности, реактивности и способности к обучению обменом информацией. Они общаются и взаимодействуют со своим виртуальным окружением как локальные агенты.

Стационарные агенты, локализованные в специальных серверах, или мобильные агенты могут быть посланы в виде байтовых кодов во Всемирную паутину, выполняя свое задание без непосредственной связи между клиентом и сервером. Вызовом для исследования проблем сложности является электронная коммерция, так как она может управляться только с помощью виртуальных агентов, поддерживающих экономические сделки. В будущем генетические алгоритмы будут способны размножать популяции агентов в сложной эволюции виртуальной жизни. Популяции агентов могут воспроизводить себя с помощью генетических алгоритмов с целью оптимизации информационного поиска в соответствии с запросами пользователя. Агенты начинают с анализа параметров пользователя и взвешивают релевантность документа, например, определяя расстояние (число связей) между ключевыми словами в поисковой машине и в запросе. «Жизненная энергия» агента увеличивается или уменьшается в соответствии с успехом или неудачей ответа на запрос. Успешные агенты отбираются, мутируют свой генотип и сами *себя воспроизводят* [7.70].

Аналогия между вычислительными и биологическими экосистемами [7.71] не требует какого-то редукцио-

низма или биологизма. В рамках теории сложных систем вычислительные и биологические экосистемы являются только моделями уравнений математической эволюции, характеризующими нелинейную динамику сложных систем. Согласно Минскому, распространенные по всему миру компьютеризованные сети можно интерпретировать как «рыночную площадь» или «общество разума» [7.72].

С философской точки зрения, такой новый тип всемирной «среды знаний» или компьютеризованного «интеллекта» может напомнить нам идеи Гегеля, касающиеся возникновения «объективного разума», включающего человеческие общества и их системы власти, экономику и бюрократию, который превосходит «субъективный разум» отдельных людей [7.73]. Однако эти вычислительные экосистемы не обладают ни сознанием, ни целеполаганием, которые имеются в нейронных сетях мозга человеческих личностей (см. гл. 4).

Тем не менее возникает вопрос о том, можно ли назвать вычислительные экосистемы до некоторой степени «разумными». Умственные способности индивидуумов при тестировании оцениваются их способностью достичь целей, поставленных составителем тестов, за предусмотренное для этого время. В этом смысле разум не является метафизическим универсальным понятием; напротив, существует несколько более или менее хорошо определенных и проверяемых стандартов поведения. Некоторые авторы предлагают аналогично судить о «разуме» общества, оценивая его способность достичь целей, поставленных определенной легитимной подгруппой (например, парламентариями), используя предназначенные для этой цели средства. Степень «интеллекта» будет зависеть от уровня целей, которые можно достичь, той скорости, с которой они могут быть достигнуты, и эффективности использованных средств. Детали этих определений могут различаться, но основанный на таких принципах «интеллект» будет, на самом деле, относиться к макросвойству системы в целом. Практическая цель этих определений будет состоять в сравнении вычислительных экосистем и степеней их успешного решения задач. Напротив, такие понятия, как коллективный «интеллект» нации, идеологически опасны. Кроме того, мы должны быть уверены, что технические стандарты интеллекта отличаются от понятий, характеризующих сознание, которые на самом деле реализуются самоотносимостью определенных сетей мозга в процессе биологической эволюции.

Рост информационных и вычислительных экосистем связан с фундаментальным изменением общества, с переключением от традиционных отраслей промышленности, оперирующих товарами, к индустрии знаний, оперирующей информацией и экономикой информационных служб. Производство, распределение и управление информацией стало главной деятельностью современных, основанных на базах знаний обществ. Таким образом, для того чтобы реализовать идеал всемирной связи людей, нужно непрерывно совершенствовать взаимодействие между человеческими и информационными системами. Человеческие средства выражения, такие как речь, жесты или письмо, должны немедленно восприниматься вычислительными и информационными системами. На первый план в информационном мире будущего выдвигаются «парадигма цельной личности» и «сеть человек—машина».

Связь между людьми включает не только битовые строки информации,

но также интуицию, ощущение и эмоцию. Будущий информационный мир называют иногда «глобальной деревней», чтобы подчеркнуть уровень ознакомления, порождаемый высокотехнологичной окружающей средой. Однако его приемлемость решающим образом зависит от реализации дружественного к человеку интерфейса. Мы должны рассматривать новый тип сложности, относящийся к интуиции и чувствам человека. Старые идеалы рациональности, извлеченные из этих основ человеческой жизни, полностью игнорируют мир человека. Даже процесс научного исследования побуждается человеческой интуицией и подталкивается человеческими чувствами, которые должны рассматриваться в будущем мире информации.

Кое-кто опасается, что конечным аттрактором социокультурной эволюции будет не глобальная деревня или всемирный *полис*, а гигантский Левиафан, который подавит человечество эффективностью современных высокотехнологичных действий. В компьютеризованном мире виртуальных реальностей все человеческие средства выражения будут оцифрованы, так что не останется никакой ниши для личной интимной жизни. Однако сложность социокультурной эволюции может допустить существование нескольких аттракторов. Их нельзя предвидеть или определить человеческими решениями, но на них могут повлиять условия и ограничения, которых люди способны добиться. Каковы шансы на сохранение человеческой свободы в мире высокой сложности? Какова степень индивидуальной ответственности в сложном мире коллективных действий с высокой нелинейностью? Эти вопросы подводят нас к эпилогу книги об этике в сложном и нелинейном мире.

7.6. Сложные мобильные сети и вездесущие компьютеры

Сложность построения глобальной сети не ограничивается растущим числом ПК, рабочих станций, серверов и суперкомпьютеров, взаимодействующих путем передачи данных в Интернете. В повседневном мире окружающая нас интеллектуальная среда заполнена более простыми, чем ПК, дешевыми и умными маломощными устройствами [7.74]. Примерами служат клавиатуры, планшеты и пульты управления: устройства размером в несколько сантиметров, имитирующие активные записи на самоклеющихся листочках бумаги, устройства размером в несколько десятков сантиметров, ведущие себя как лист бумаги, книга или журнал, и дисплеи размером несколько метров, эквивалентные школьной доске или доске объявлений. Клавиатуры, планшеты и пульты — всего лишь начало вездесущей компьютеризации. Умные устройства — это разумные микропроцессоры, помещенные в будильник, микроволновую печь, пульт дистанционного управления ТВ, стерео и ТВ-систему, детские игрушки и т. д. Вездесущие компьютеры делают «вещи, которые думают» [7.75], не только высокоинтелектуальные суперкомпьютеры, но и разумный суперорганизм с «роевым интеллектом». Службы беспроводной связи третьего поколения включают пакетные сети и взаимосвязность компьютеризованных устройств — телефонов, факсов, принтеров, программного радио и т. д. Запускаемые в работу технологии требуют более быстрых конвертеров данных, более мощных процессоров, языка Java и других форм загружаемых программ. Техническое развитие связей третьего поколения представля-

ет междисциплинарную задачу для системных инженеров.

Наподобие GPS (Системы глобального позиционирования) в движении автомобилей, вещи в повседневной жизни могут дистанционно телематически взаимодействовать с «разумными» датчиками. GPS — хороший пример сложной информационной системы, реализующей понятие *локальной активности*. Водитель автомобиля с помощью GPS телематически управляется сетью близлежащих станций GPS. В будущем процессоры, микросхемы и дисплеи этих умных устройств будут нуждаться не в интерфейсе пользователя — мыши или клавиатуре, а лишь в приятном и удобном месте для выполнения задач. Беспроводные компьютерные устройства всех масштабов становятся все более и более невидимыми для пользователя [7.76]. Вездесущие компьютеры позволяют людям жить, работать, пользоваться вещами и радоваться им, даже не подозревая *об их компьютерном* устройстве.

С технической точки зрения, вездесущая компьютеризация — это вызов глобальной сети, использующей беспроводной доступ к медиа, широкополосный диапазон, возможности передачи мультимедиа в реальном времени по стандартным сетям и маршрутизацию пакетов данных. В Интернете взаимодействуют не только миллионы ПК, но и миллиарды разумных устройств. Это реальные физические устройства разных размеров, но с отражением в Интернете виртуальных данных, управление которыми требует мощного, сознающего сложность задачи регулирования передачи данных. Ошеломляющий поток данных и информации вынуждает нас работать на грани хаоса.

Создание глобальной сети становится одним из волнующих вызовов в исследовании сложности. Понимание сложных систем в природе и обществе предполагает эффективное управление коммуникационными сетями. В XXI в. информация, связь и биотехнология растут вместе. Поэтому обработка информации требует обучения у природы. Информация может порождаться, передаваться, сохраняться, обрабатываться и представляться в природе органами чувств, первой системой и мозгом. Познавательные процессы, обучение и размышление, язык, движение, восприятие и связи технологически имитируются физическими, химическими и биологическими датчиками, оптоволоконными линиями, электроникой, оптическими запоминающими устройствами, микропроцессорами, нейросетями, роботами, виртуальной реальностью, вездесущей компьютеризацией, искусственными жизнью и интеллектом. Все вместе они служат созданию и развитию обучающих, адаптирующихся и самоорганизующихся эволюционирующих сложных систем.

Захватывающий пример современного исследования — эволюционная архитектура будущих автомобилей, объединяющая все аспекты сложности и самоорганизации. Автомобильная промышленность все еще остается одним из ведущих и доминирующих двигателей глобальной экономики. Таким образом, исследование сложности нашло реалистическое приложение к производству будущих автомобилей как обучающихся, адаптирующихся и самоорганизующихся эволюционирующих сложных систем. Вызовом автомобильной промышленности является растущая сложность систем электроники. Если мы рассмотрим систему электропроводов в автомобилях от начала их выпуска до сегодняшних дней, мы обнаружим удивительное сходство с нейронными се-

тями организмов, усложняющихся в процессе эволюции. В противоположность биологической эволюции, электронные системы в наши дни жестки, компактны и негибки. Поэтому маленькие повреждения могут привести к разрушению всей системы. В *эволюционной архитектуре* (ЭвоАрх) нервная система автомобиля делится на автономные элементы (карлеты), которые могут придавать себе форму для выполнения совместных функций, с тем чтобы решать разумные задачи. Примерами могут служить сложные функции мотора, тормозов, освещения, беспроводные системы вождения на основе GPS, умные устройства для обработки информации и электронная инфраструктура видео- и аудиооборудования.

В случае ранений или несчастных случаев живые организмы обладают поразительной способностью к самоисцелению и гибкому изменению элементов, с тем чтобы поддержать жизненные функции за счет различных органических взаимодействий. Например, если люди в результате инсульта теряют способность говорить, то иногда поврежденные части мозга заменяются новыми конфигурациями и соединениями нейронных областей. Если в автомобиле ломается, например, автономный элемент «лампа», то связанные с поврежденным другие элементы будут искать замены за счет самоорганизации. Они скомпонуют себя вместе с другими элементами так, чтобы гарантировать жизненные функции автомобиля. В эволюционной электронной архитектуре [7.77] имеется несколько само-... свойств, весьма напоминающих самоорганизующиеся органические системы в биологической эволюции. Самоизлечение требует самоконфигурации и самодиагностики. Самодиагностика означает распознавание ошибок и саморефлексию. В автомобиле самоконфигурация состоит из саморефлексии, механизма обновления и расширения. Самоконсультация означает саморефлексию, распознавание ситуации и базу знаний. Самоадаптация основана на распознавании ситуации и самоконфигурации. Связи между само-... свойствами систематизированы на рис. 7.27.

Согласно подходу, основанному на теории сложных систем, функции ав-

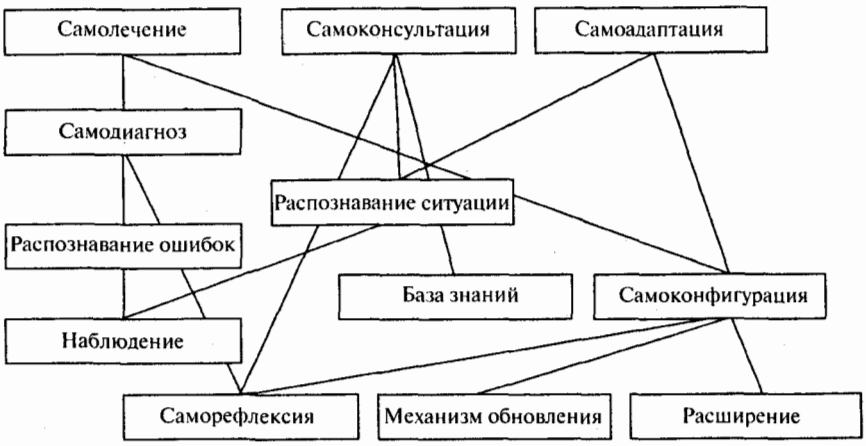


Рис. 7.27

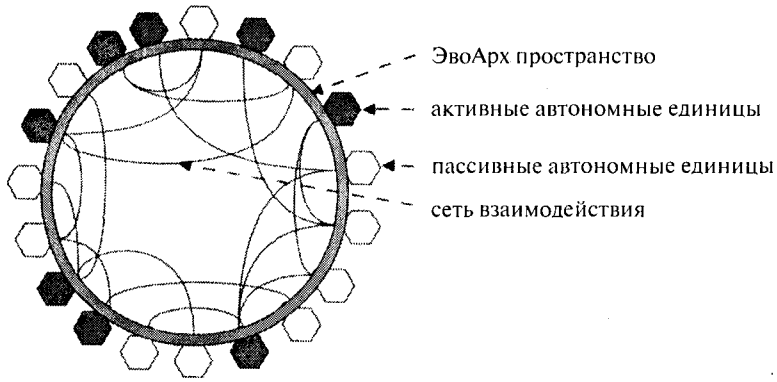


Рис. 7.28. Типичная схема системы в парадигме эволюционной архитектуры

томобиля рассматриваются как макросвойства, возникающие из самоорганизующихся взаимодействий и кооперации автономных единиц на микроуровне. Примерами автономных единиц автомобиля (карлетов) служат, например, выключатели, лампы, тюнеры, блоки управления, регуляторы, сигнал. Такие функции автомобиля, как «кондиционирование салона», «указатель поворота» или «предупреждение об опасности» требуют одного или более выключателей, которые должны быть выбраны среди более чем сотни кандидатов. Действительно, одна только функция автомобиля вроде «указателя поворота» требует карлетов для выключателя указателя поворота, оконечного выключателя, мигания указателя и нескольких ламп указателей поворота. В эволюционной архитектуре взаимодействие реализуется на арене ЭвоАрх (рис. 7.28), на которой активные автономные элементы запрашивают взаимодействия с пассивными автономными элементами, имеющими необходимые для выполнения функции автомобиля свойства. Каждый элемент (карлет) имеет идентификационный номер для самоидентификации. Этот номер может объявлять свойство элемента (например, индикация поворота) и его намерение (например, поиск выключателя). Взаимодействие элементов (карлетов) становится возможным благодаря системе коммуникаций (*carCom*) с процедурами восстановления информации, протоколами и соглашениями о кооперации, хорошо известными в Интернете, типа протоколов RMI [13] и RPC [14]. Как и в Интернете, управление сетью основано на межплатформенном программном обеспечении процессов маршрутизации с маршрутными протоколами и маршрутными таблицами.

После запроса о взаимодействии активный автономный элемент получает список возможных пассивных кандидатов на замену, например, поврежденного карлета. На следующем

[13] RMI ([Java] Remote Method Invocation) — протокол RMI, средство для создания объектов, допускающих вызов своих методов из другой виртуальной Java-машины. Аналог протокола RPC, используемый в распределенных объектных Java-приложениях. — *Прим. пер.*

[14] RPC (Remote Procedure Call) — удаленный вызов процедуры, средство передачи сообщений, которое позволяет распределенному приложению вызывать сервис различных компьютеров в сети, обеспечивает процедурно-ориентированный подход в работе с сетью. — *Прим. пер.*

шаге, для того чтобы реализовать функцию автомобиля через взаимодействие, должен быть отобран ровно один кандидат. В случае повреждения элементов и неспособности исполнять функции, гибкость автомобиля и потенциальные возможности его само-... свойств увеличиваются с ростом числа возможных кандидатов. Однако, с другой стороны, время вычислений, необходимое для отбора, нелинейно увеличивается с увеличением списка кандидатов. В современном движущемся автомобиле примерно 30 функций требуют одного или более выключателей, которые должны быть выбраны среди 100 кандидатов. В общем случае, если n есть число активных автономных элементов, m — число требуемых пассивных элементов и M — число возможных пассивных элементов с $M - m > mn$, тогда число $\mathrm{Con}(m, n)$ возможных конфигураций партнеров дается формулой

$$\mathrm{Con}(m, n) = n! \sum_i \binom{M - m(n - i)}{m}.$$

Причина в том, что $n!$ комбинаций необходимы для определения последовательности активных автономных элементов, занимающихся поиском пассивных элементов. Не принимая во внимание последовательности, получаем $\binom{M}{m}$ возможных комбинаций. Выбор между M возможными элементами уменьшается после каждого шага по m, т. е. на втором шаге имеется только $\binom{M-m}{m}$ возможных комбинаций, на третьем шаге — только $\binom{M-2m}{m}$ комбинаций и т. д. Для $n = 30$ активных автономных элементов, $m = 2$ необходимых пассивных элементов для функции автомобиля и $M = 100$ возможных пассивных элементов получаем $2{,}09 \times 10^{17}$ комбинаций. Если каждая комбинация соответствует одной вычислительной команде, то процессору, выполняющему 10^2 миллионов команд в секунду, для проверки всех возможных комбинаций потребуется $2{,}42 \times 10^{24}$ дней. Очевидно, что для уменьшения сложности необходим информационный поиск.

Как и в Интернете, качество информационного поиска зависит от точности запросов необходимых партнеров. Неточный запрос вроде «поиска выключателя» приводит к слишком большому списку возможных кандидатов. Более точный запрос «поиск выключателя для левого окна в левой двери» ограничивает возможности. Нам нужны процедуры взвешивания и расстановки приоритетов, хорошо известные в создании программного обеспечения и искусственном интеллекте. В программном обеспечении свойства не являются ни существенными, ни несущественными, как в булевой логике. Они более или менее существенны в соответствии со степенью их сходства. В систематике свойства и функции автомобиля можно классифицировать по категориям сходства. На нижнем уровне иерархия состоит из карлетов, например, ламп и выключателей. На следующем уровне карлет типа лампы может принадлежать категории «лампы сзади» или «желтые лампы», которые, в свою очередь, могут принадлежать более абстрактным категориям «функции на внешней части автомобиля» или «функции на передней части автомобиля» следующего уровня, вплоть до абстрактных категорий типа «положение», «индикация», «ввод», «вывод» и т. д. на самом верхнем уровне. В духе объектно-ориентированных языков программирования (например, Java или C++) эти категории можно рассматривать как классы с атрибутами и методами, представленными на диаграмме узлов и

граней. Стрелки на гранях указывают на связи наследуемых свойств, которые реализованы в вычислительной модели эволюционной архитектуры. Если карлет ищет возможного партнера для реализации функции автомобиля, его свойства должны быть ограничены согласно атрибутам его запроса на взаимодействие, локализующего положение карлета как партнера на диаграмме таксономии. Таксономический отбор уменьшает число возможностей и допускает возникновение в нужное время свойств само-..., таких как самоизлечение или самоадаптация.

Самоизлечение и самоадаптация означают не только замену поврежденных элементов «железа» или расширение архитектуры путем добавления новых элементов «железа». В биологической эволюции организм может разработать новые физиологические меры для гарантирования жизненных функций или получения новых способностей. В эволюционной архитектуре вычислительная система автомобиля позволяет создавать виртуальные элементы для замены поврежденных карлетов «железа» или введения требуемых водителем новых функций. Этот невероятный прогресс основан на мобильных сетях и вездесущей компьютеризации. В технологии *Bluetooth* сложные сети проводов между карлетами заменяются на беспроводную связь. Каждый элемент с подходящим интерфейсом может участвовать в беспроводном взаимодействии. Новые электронные связи, например, для мобильных телефонов, GPS или множества развлекательных установок, могут быть внедрены в конкретные коммуникационные протоколы (профайлы). Но можно и контролировать функции автомобиля снаружи с помощью мобильных умных устройств, например персонального цифрового секретаря (ПЦС). Водители и инженеры могут влиять на все типы автономных элементов точно так же, как врачи влияют на органы живого тела. Таким образом, с помощью мобильных и умных устройств вездесущей компьютеризации вводится автомобильный межсетевой переход как автономный элемент для реализации интерфейса между миром информационно-телекоммуникационных технологий внутри и снаружи автомобиля.

Технология *Bluetooth* открывает совершенно новые пути для приложений. В эволюционной архитектуре (ЭвоАрх) новые функции могут быть адаптированы или даже созданы в соответствии с желаниями пользователя. Если, например, ломается ручка радиопанели, автомобильный шлюз *Bluetooth* может создать виртуальную модель ручки с помощью тех же логических процедур, как для настоящей ручки, сделанной в «железе». Виртуальная ручка представляется на сенсорном экране ПЦС, и водитель может использовать его для прослушивания радио. Функция «работа радио» с карлетами типа «дисплей» или «громкоговоритель» дополняется новым автономным элементом «виртуальная ручка» с беспроводной связью с ПЦС. В ЭвоАрх автомобиль превращается в самоорганизующуюся систему обработки информации, встроенную в мир беспроводных мобильных сетей и вездесущих компьютеров.

В традиционной автомобильной промышленности архитектура автомобиля остается неизменной в течение всего «времени жизни» автомобиля после производства. Будущая архитектура должна быть открытой и гибкой, как эволюционирующие организмы. Имеются настоятельные требования со стороны мировых рынков, также требующие гибкости автомобиль-

ной архитектуры. Автомобильные компании не могут в течение нескольких лет ограничиваться выпуском одного единственного модельного ряда автомобилей. Темпы внедрения инноваций и конкуренция с другими компаниями все больше и больше ускоряются. Если компании решают сотрудничать друг с другом на мировых рынках, то автономные элементы автомобильной серии должны быть неизменными. Затем компании должны принять во внимание политические, экономические и экологические условия рынков. Требования потребителей, мода и направления развития меняются быстро. Поэтому автономные элементы должны быть заменены или дополнены за время жизни автомобиля как воспроизводящиеся клетки в живых организмах. Самоадаптация, самоконфигурация и самообъяснение являются свойствами само-... при производстве автомобилей, связанными со всем временем жизни серии, как биологическая эволюция популяции. По аналогии с живыми организмами, эволюционная архитектура автомобилей есть пример информационной динамики сложных систем, самоорганизующейся за счет обработки информации и взаимодействия клеточных элементов.

Динамика информации в природе и обществе была проанализирована в рамках теорий информации, вычислимости и нелинейной динамики. Мы рассмотрели динамику природных систем (например, атомные, молекулярные, генетические, нейронные системы), вычислительных систем (например, квантовые, молекулярные, ДНК, биологические и нейрокомпьютерные системы), глобальные системы (например, Интернет, маршрутизация, информационный поиск, многоагентные системы) и вездесущую компьютеризацию (например, мобильные телефоны, GPS, ПЦС, умные устройства, интеллектуальные системы развлечений).

Создание глобальных сетей уже не является только вызовом техническому развитию. Вездесущая компьютеризация может исправить взаимодействие человека с информационными системами, но она не должна ошеломлять людей разнообразием технического оборудования. Создание глобальных сетей должно развиваться как мирная и невидимая технология. Мирная и невидимая компьютеризация пытается интегрировать создание глобальных сетей и обработку информации в окружающую человека среду и повседневную жизнь, не порабощая людей техническими сценариями. Создание глобальных сетей должно развиваться как технический сервис для человечества, не больше и не меньше. Отсюда, обработка информации в глобальных сетях не может подталкиваться только техническими науками. Это должна быть междисциплинарная задача микроэлектроники, компьютерной науки, информатики, а также вызов науке о мышлении, социологии и гуманитарным наукам.

В процессе эволюции были развиты новые формы хранения информации от генетической вплоть до нейронной и, наконец, экстрасоматической информации. У людей объем генетической информации, равный примерно 10^{10} бит, много меньше примерно 10^{14} бит информации, которую несут нейроны в мозге, что грубо соответствует возможному числу синаптических связей. За последние 10^3 лет человечество развило экстрасоматическую форму хранения информации (например, библиотеки, базы данных, Интернет). Информационная емкость этих хранилищ превысила емкость отдельного мозга. В начале XXI в.

экспоненциальная динамика ключевых технологий определяется миниатюризацией компьютеров, генной технологией и ростом Интернета. Согласно Дж. Шумпетеру (1883–1950), экономический рост подгоняется основными изобретениями в науке и технике, инициирующими долговременные циклы Кондратьева в бизнесе и предпринимательстве. После четырех циклов индустриального общества, которые зависели главным образом от природных ресурсов, пятый цикл Кондратьева породил информационное общество, создающее в основном нематериальные продукты информационных служб.

Экономики индустриальных обществ характеризовались мерами по производству, материально-техническому обеспечению, распределению, маркетингу и продаже материальных товаров. В информационных обществах имеется предложение и спрос виртуальных информационных продуктов и услуг с мерами по сбору информации, ее систематизации, поиску информации, производству и торговле системами, основанными на информации. Поэтому экономисты отличают материальные цепочки стоимости в индустриальных обществах от виртуальных цепочек стоимости в информационных обществах. Согласно Шеннону, содержимое информационных товаров измеряется степенью их новизны для получателя. Но для того чтобы устроить нашу жизнь, недостаточно быть хорошо информированным. На следующем шаге важная информация должна быть оценена и применена к решению задач. Информация должна быть превращена в знания и технологии, пригодные для решения проблем.

Кроме материи и жизни главными составными частями человечества XXI в. являются информация и знание. В обществе знания наука является производительной силой экономического и социального роста, требующей новых стратегий взаимодействия с экономикой и политикой [7.78]. «Благосостояние наций» (А. Смит) есть знание их народов. Поэтому в процессе глобализации с конкурирующими нациями и обществами образование должно сохранить устойчивое развитие общества знаний. Техническая эволюция информации и знания является фундаментальным вызовом человечеству XXI в. Люди не будут больше только продуктами слепой эволюции, а будут пытаться влиять на свое развитие с помощью информации и знания.

Однако обладание знанием недостаточно для того, чтобы решить, какие цели ставит решение нашей задачи. Опыт с наукой и технологией последнего века несомненно подчеркивает угрозу этическим оценкам наших технических достижений. Таким образом, будущее общества информации и знания неотделимо от этики и политики. В традициях философии связь знания с этикой называлась мудростью. Переход от фактов к информации, знанию и мудрости бросает междисциплинарный вызов обществу знания [7.79].

Глава 8

Эпилог о будущем, науке и этике

Теория сложных систем предполагает, что физический, общественный и духовный миры нелинейны, сложны и случайны. Этот глубокий эпистемологический подход имеет важные следствия для нашего теперешнего и будущего поведения. Наука и технология будут оказывать решающее влияние на грядущие события. Поэтому мы завершаем эту книгу обзором перспектив будущего, науки и этики в нелинейном, сложном и случайном мире. Что мы можем узнать о том, что ждет такой мир? Что мы должны делать?

8.1. Сложность, прогнозы и будущее

В древние времена считалось, что способность предвидеть будущее — это загадочная сила, которой обладают пророки, священники и астрологи. Например, в храме оракула в Дельфах предсказательницы пифии (VI в. до н. э.) в состоянии транса предсказывали судьбу царей и героев (рис. 8.1). В новое время люди пришли к вере в неограниченные возможности демона Лапласа: в линейном и консервативном мире без трения и необратимости прогнозы будут точными. Нужно лишь точно знать начальные условия и уравнения движения, чтобы рассчитать будущие события, решая эти уравнения. Философы науки пытались проанализировать логические основания прогнозирования в естественных и общественных науках [8.1].

Вера в предсказательную силу человека была поколеблена несколькими научными открытиями минувшего века. Квантовая теория учит, что в общем случае мы можем делать предсказания только на языке вероятностей (см. разд. 2.3). Широкий класс явлений связан с детерминированным хаосом: хотя движения подчиняются законам ньютоновской физики, траектории весьма чувствительны к начальным условиям и поэтому исключают возможность долговременных прогнозов. В диссипативных системах, та-



Рис. 8.1. Афинский царь Эгей спрашивает дельфийского оракула о своем будущем (греческая ваза, 440–430 гг. до н. э.)

ких как слой жидкости в эксперименте Бенара (рис. 2.20), возникновение порядка зависит от микроскопически малых начальных флуктуаций. Ничтожное событие, вроде взмаха крыла бабочки, может, в принципе, повлиять на глобальную динамику погоды. В хаотических системах возможность предсказания будущих событий ограничена, так как информационный поток из прошлого в будущее уменьшается: энтропия Колмогорова–Синая имеет конечное значение. Однако при наличии случайности и шума все корреляции между прошлым и будущим разрушаются и энтропия Колмогорова–Синая стремится к бесконечности: никакие предсказания невозможны.

Очевидно, что случайность человеческой судьбы бросала вызов древним пророкам, священникам и астрологам. В гл. 7 мы узнали, что структуры и связи в экономике, бизнесе и обществе иногда поразительно изменяются. Если отвлечься от естественных наук, то можно сказать, что действия людей, изучаемые гуманитарными науками, могут влиять и действительно влияют на будущие события. Поэтому прогноз может стать самосбывающимся или обреченным на провал прорицанием, которое само меняет установившиеся структуры или связи прошлого. Не есть ли прорицание не более чем взгляд в магический кристалл?

Однако почти все наши решения связаны с предстоящими событиями и требуют прогнозов будущей обстановки. Это верно и для личного выбора, — когда и на ком жениться, когда и как вкладывать сбережения и прочее, и для сложных решений, затрагивающих целую организацию, фирму, общество или глобальное состояние Земли. В последние годы особое значение придавалось улучшению прогнозирования и принятия решений в экономике и экологии, менеджменте и политике. Экономические крахи, экологические катастрофы, политические потрясения, но и успехи, такие как новые рынки, технологические направления и новые общественные структуры, — все это не должно более быть случайными и роковыми событиями, которые ниспосланы богами. Люди хотят быть подготовленными, и поэтому они разработали множество качественных методов прогноза для различных ситуаций, например, в бизнесе и менеджменте. С методологической точки зрения, каждый качественный прогнозирующий инструмент можно охарактеризовать конкретным *горизонтом предсказуемости*, ограничивающим его достоверное приложение. Посмотрим на достоинства и недостатки некоторых прогнозирующих инструментов.

Самыми общими качественными методами прогноза являются процедуры анализа временны́х рядов [8.2]. В них предполагается, что определенная структура в ряде данных периодически повторяется со временем и может быть экстраполирована на будущие периоды. Таким образом, процедура исследования временны́х рядов может подойти для прогнозирования относящихся к окружению факторов, например, уровня занятости или структуры еженедельных продаж в супермаркете, когда индивидуальные решения оказывают малое влияние. Однако изучение временны́х рядов не может объяснить причины, обусловившие такие структуры данных. В древности схожий метод использовали вавилонские астрономы, которые экстраполировали структуру данных о восходе луны в будущее безо всяких объяснений, основанных на моделях движения планет. В XVIII в. физики мало знали о причинах возникновения пятен на Солнце. Однако

при наблюдении солнечных пятен была выявлена повторяющаяся по частоте и размеру структура, так что стали возможными предсказания путем продолжения этой структуры методом анализа временных рядов. В бизнесе и экономике также обнаружены различные фундаментальные закономерности в рядах данных. Когда в данных нет никакого тренда (например, стабильные продажи продукции), возникает горизонтальная структура. Когда ряды флуктуируют из-за определенного сезонного фактора, например, когда продажа товара зависит от погоды, возникает сезонная структура. Циклическая структура, например, цена металлов или валовой национальный продукт, не обязательно повторяет себя через постоянные промежутки времени. Когда имеется общий рост или уменьшение величины переменной со временем, то говорят о характере тренда. Когда в ряде данных обнаруживается лежащая в их основе структура, ее необходимо отличить от случайности путем усреднения и взвешивания («сглаживания») данных за предыдущие периоды времени. Математически метод линейного сглаживания можно эффективно использовать для данных, проявляющих характер тренда. Однако в методах сглаживания не делается попыток отождествить индивидуальные компоненты с лежащими в основе базовыми структурами. Это могут быть субструктуры тренда, цикла и сезонные факторы, которые при анализе общей структуры ряда данных должны быть разделены и разложены на составные части.

В то время как в методах анализа временных рядов некоторые структуры данных из прошлого просто экстраполируются в будущее, объясняющая модель предполагает связь между (<«зависимой»>) переменной y, которую мы хотим спрогнозировать, и другой (<«независимой»>) переменной x. Например, зависимая переменная y есть затраты на производство единицы товара, а независимая переменная x, определяющая затраты на производство, есть число произведенных единиц товара. В этом случае мы можем смоделировать связь переменных x и y в двумерной системе координат и нарисовать прямую линию, которая, в определенном смысле, будет давать для этой связи наилучшее линейное приближение.

Регрессионный анализ использует метод наименьших квадратов, с тем чтобы минимизировать расстояние между реальными наблюдениями y и соответствующими точками $\hat{y}$ на прямой линейного приближения. Очевидно, во многих ситуациях такое приближение будет неверным. Примером может служить прогноз объема месячных продаж, нелинейно меняющийся в соответствии с временами года. Кроме того, каждый менеджер знает, что на объем продаж влияет не только время года, но и множество других факторов, таких как валовой национальный продукт, цены, конкуренция, стоимость производства, налоги и т. п. Линейное взаимодействие всего двух факторов — это такое же упрощение в экономике, как задача двух тел в консервативном мире классической физики.

Конечно, более аккуратная сложная модель требует большего количества усилий, большей квалификации и большего компьютерного времени. Во многих ситуациях для принятия решений для объяснения или прогноза определенной зависимой переменной можно использовать более одной переменной. Типичный пример — менеджер по маркетингу, желающий спро-

гнозировать общефирменные продажи в наступающем году и лучше понять те факторы, которые на них влияют. Так как в его руках более одной независимой переменной, такой анализ известен как множественный регрессионный анализ. Тем не менее зависимая переменная, которую он хочет спрогнозировать, выражается в виде линейной функции независимых переменных. Вычисление коэффициентов уравнения регрессии основано на использовании выборки прошлых наблюдений. Следовательно, достоверность прогнозов, основанных на этом уравнении регрессии, в большой степени зависит от использованной конкретной выборки наблюдений. Поэтому степени достоверности должны измеряться тестами на статистическую значимость. В то время как множественная регрессия включает одно уравнение, эконометрические модели могут включать любое число рассматриваемых одновременно уравнений множественной регрессии [8.3]. В случае линейных уравнений методы их решения основаны на линейной алгебре и алгоритмах линейной оптимизации (например, симплексный метод). Несмотря на их линейность, эконометрические модели в случае большого числа переменных могут быть очень сложными, и с ними могут справиться только компьютерные программы и машины. Стратегия решения в нелинейном программировании в экономике часто состоит в разложении сложных проблем на подпроблемы, которые можно приближенно рассматривать как линейные.

Неявное предположение, которое делается при использовании этих методов, состоит в том, что модель, лучше всего описывающая доступные исторические данные, будет также лучшей моделью для предсказания будущего за пределами этих данных. Однако для большинства реальных ситуаций в мире это предположение оказывается неверным. Кроме того, длина большинства рядов данных, используемых в экономике и бизнесе, очень мала, ошибки измерений велики и контрольные эксперименты невозможны. Поэтому необходимо понять, каким образом различные методы прогноза оказываются успешными, даже если имеют место изменения установленных в прошлом структур. Предсказания отличаются друг от друга на различных горизонтах прогнозирования, характеризующих каждый метод. Очевидно, не существует единственного метода, который мог бы дать наилучший прогноз для всех рядов и горизонтов прогнозирования. Иногда в прошлых данных не находится ничего, что бы указывало на приближающееся изменение. Иными словами, невозможно предвидеть изменение структуры, не владея сокровенным знанием. Сдвиги структур или «изменение парадигм» никоим образом не являются выдающейся способностью тех философов науки, которые придерживаются традиций Куна и его последователей, а есть повседневное занятие бизнесменов и менеджеров.

Известны ли количественные методы определения того, когда изменяется структура или связь в ряде данных? Действительно, такие методы существуют и они используют подходящий сигнал для установления момента, когда изменения в ошибках прогноза указывают на возникновение неслучайного сдвига. Например, на графике контроля качества производства серии автомобилей периодически берутся показатели работы оборудования на выходе. До тех пор

пока выборочное среднее находится в контрольных пределах, оборудование работает правильно. В противоположном случае производство останавливается, и предпринимаются соответствующие действия, чтобы восстановить нормальную работу. В общем случае автоматический мониторинг количественных методов прогнозирования следует концепции графика контроля качества. Каждый раз, когда делается прогноз, его ошибка (т. е. разность между реальным и предсказанным значениями) проверяется на попадание в интервал между верхним и нижним контрольными пределами. Если ошибка попадает в допустимый интервал, экстраполированная структура не изменяется. Если ошибка прогнозирования выходит за контрольные пределы, это означает, что в установленной структуре, вероятно, имеется какое-то систематическое изменение. Автоматический мониторинг по возникающим в ходе работы сигналам пригоден в случае, когда делается большое количество прогнозов. Но в случае одного или нескольких рядов приходится все равно использовать политику выжидания, чтобы обнаружить, возникли ли изменения в трендах деловой информации.

Прогнозирование будущего технологических трендов и рынков, прибыльность новых продуктов или услуг и связанные с этим тенденции занятости и безработицы — одна из самых трудных, но и самых необходимых задач, стоящих перед менеджерами и политиками. Их решения зависят от большого числа технологических, экономических, конкурентных, социальных и политических факторов. С момента появления в 1950-х гг. коммерческих компьютеров возникла надежда, что удастся справиться с этими сложными проблемами, увеличивая скорость вычислений и объем памяти компьютеров. Действительно, любой количественный метод прогнозирования может быть запрограммирован для расчета на компьютере. Так как не существует какого-то одного метода прогнозирования, подходящего для всех ситуаций, были разработаны основанные на использовании компьютеров различные прогнозирующие системы, с тем чтобы иметь возможность дать менеджеру меню альтернативных методов. Примером может служить прогнозирующая система SIBYL, названная по имени древнегреческой прорицательницы Сивиллы. История гласит, что Сивилла из города Кумы продала римскому царю Тарквинию Гордому знаменитые Сивиллины книги.

Действительно, SIBYL — это основанная на знаниях система (см. разд. 5.3) для компьютеризованного пакета прогнозирующих методов [8.4]. Эта система предлагает программы для подготовки и обработки данных, выбора доступных методов прогнозирования, применения этих методов, и, наконец, сравнения, отбора и комбинации прогнозов. При отборе альтернативных прогнозирующих приемов управляющий логическим выводом компонент основанной на знаниях системы предлагает те методы, которые более всего подходят к конкретной ситуации и ее характеристикам, основанным на широком наборе прогнозирующих приложений и правил принятия решений. Завершающая функция SIBYL заключается в тестировании и вычислении, какой метод обеспечивает наилучшие результаты. Интерфейс пользователя и системы максимально дружелюбен, эффективен и удобен как эксперту по прогнозированию, так и новичку. Тем не менее не следует забывать, что SIBYL может *только* оптимизировать при-

менение хранящихся в памяти машины методов прогноза. В принципе, горизонт предсказуемости методов прогноза не может быть увеличен за счет применения компьютеров. В противоположность обучающей способности эксперта-человека, прогнозирующие системы типа SIBYL остаются программно управляемыми и имеют типичные ограничения, свойственные системам, основанным на знаниях.

В общем случае основанная на использовании компьютеров автоматизация прогнозов следует курсу линейного мышления. С другой стороны, растущие возможности современных компьютеров вдохновляют исследователей на анализ нелинейных задач. В середине 1950-х гг. метеорологи предпочли статистические методы прогноза, основанные на понятии линейной регрессии. Это достижение было подкреплено успешным предсказанием стационарных случайных процессов, сделанным Норбертом Винером. Эдвард Лоренц со скептицизмом отнесся к идее статистического прогноза и решил экспериментально проверить его применимость на примере нелинейной динамической модели (см. разд. 2.4). Погода и климат являются примером открытой системы с диссипацией энергии. Состояние такой системы моделируется точкой в фазовом пространстве, а поведение системы — фазовой траекторией. После ряда переходных процессов траектория достигает притягивающего множества («аттрактора»), которое может быть устойчивой особой точкой системы (рис. 2.14 *а* или 3.11 *в*), предельным циклом (рис. 3.11 *г*) или странным аттрактором (рис. 2.21). Если кто-то желает предсказать поведение системы, содержащей устойчивую особую точку или предельный цикл, следует убедиться, что расходимость близких траекторий выглядит не растущей, а скорее уменьшающейся (рис. 8.2). В этом случае целый класс состояний с определенными начальными условиями будет достигать стационарного состояния, и соответствующие системы будут предсказуемы. Примером является экологическая система с периодическими траекториями для популяции хищников и жертв, моделируемая нелинейными уравнениями Лотки—Вольтерры. Расходимость или сходимость близких траекторий может быть численно измерена так называемым показателем Ляпунова.

Рассмотрим две соседние траектории $\mathbf{x}(t)$ и $\mathbf{x}'(t)$ с начальными состояниями $\mathbf{x}(0)$ и $\mathbf{x}'(0)$ в момент времени $t = 0$ и длиной

$$\mathbf{d}(t) = (\mathbf{x}'(t) - \mathbf{x}(t)).$$

Если траектории сходятся, то

$$\mathbf{d}(t) \approx e^{\Lambda t} \quad \text{и} \quad \Lambda < 0.$$

Величина Λ называется показателем Ляпунова. Он определяется как

$$\Lambda(\mathbf{x}(0), \mathbf{d}(0)) =$$

$$= \lim_{t\to\infty} \lim_{\mathbf{d}(0)\to 0} \left[\left(\frac{1}{t}\right) \ln\left(\frac{\mathbf{d}(t)}{\mathbf{d}(0)}\right)\right].$$

Если показатель Ляпунова положителен, то он характеризует скорость расходимости. На рис. 8.2 модельный

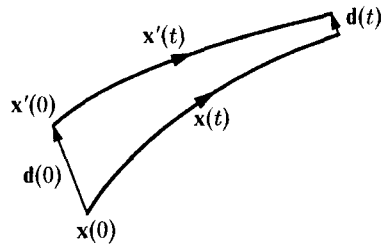


Рис. 8.2. Предсказуемая система с аттрактором, являющимся устойчивой особой точкой или предельным циклом, имеет сходящиеся друг к другу близкие траектории [8.5]

процесс $\mathbf{x}'(t)$ дает разумные предсказания реального процесса $\mathbf{x}(t)$, так как система имеет сходящиеся траектории, не зависящие на больших временах от начальных условий.

Фазовый портрет нелинейной системы может иметь ряд аттракторов с разными областями притяжения сходящихся траекторий, разделенных сепаратрисами (см. рис. 2.10). Для прогноза будущего эволюционирующей системы недостаточно знать все возможные аттракторы и начальное состояние $\mathbf{x}(0)$. Нам нужно дополнительно знать, в области притяжения какого аттрактора находятся начальные данные. Если окажется, что начальное состояние системы находится далеко от области притяжения известных аттракторов, то конечное состояние соответствующей траектории предсказать нельзя.

На рис. 2.22 *а–в* представлен переход от порядка к хаосу для логистического отображения при возрастании управляющего параметра. На рис. 2.23 *а*, *б* показана соответствующая последовательность бифуркаций с хаотическим режимом, возникающим за критическим порогом. Если показатель Ляпунова положителен, поведение системы хаотично. Если он равен нулю, система имеет тенденцию к бифуркации. Если показатель Ляпунова отрицателен, система находится в устойчивом состоянии или на ветви бифуркационной диаграммы. В этом случае система предсказуема. В других случаях начинает играть роль чувствительность к начальным условиям. Примечательно, что нелинейная система в хаотическом режиме является, тем не менее, не полностью непредсказуемой. Белые полосы или «окна» на серой вуали хаотического будущего (рис. 2.23 *б*) указывают на локальные состояния порядка с отрицательными показателями Ляпунова. Таким образом, в океане хаоса можно найти предсказуемые острова порядка. В этом случае система предсказуема, по крайней мере, в течение характерных промежутков изменения параметров системы [1].

В общем случае степень предсказуемости измеряется статистической корреляцией между наблюдаемым процессом и моделью в определенное время с момента начала наблюдения. Удовлетворительному прогнозу соответствуют значения, близкие к единице, а малые значения указывают на расхождение между наблюдением и предсказанием. Каждая прогнозирующая модель имеет определенное время предсказуемого поведения, по завершении которого степень предсказуемости более или менее быстро стремится к нулю. После уточнения модели время предсказуемого поведения может быть несколько увеличено. Но область предсказуемости зависит от параметров флуктуаций. Слабые микроскопические возмущения локально неустойчивых хаотических систем за короткое время могут до-

[1] Видимо, надо уточнить, что для хаотических аттракторов типична чувствительность по отношению к начальным данным. Для логистического отображения и многих других систем характерна и чувствительность по отношению к изменению управляющего параметра. Иногда последний можно интерпретировать как «медленное время» («быстрое время» связано с итерациями отображения). Иными словами, $x_{n+1} = \lambda(n)x_n(1 - x_n)$, но $\lambda(n)$ очень медленно меняется с n. В последних трех фразах имеются в виду «острова порядка» в пространстве параметров. О предсказуемости можно тоже говорить в двух смыслах. Во-первых, полагая, что $\lambda(n) = \text{const}$, по одной части траектории можно предсказывать подобные ей. Во-вторых, в «медленном времени», зная аттрактор при данном значении λ, можно предсказывать свойства аттрактора при $\lambda + \Delta\lambda$. – *Прим. ред.*

стигать макроскопических размеров. Таким образом, локальные неустойчивости резко уменьшают возможность улучшения предсказуемого поведения. Горизонт предсказуемости системы прогнозирования означает конечную временну́ю протяженность предсказуемого поведения, которое не может быть повышено ни улучшением измерительных инструментов, ни уточнением модели предсказания. Если мы вспомним, что атмосфера моделируется, согласно Лоренцу, нелинейными системами с локальными и глобальными неустойчивостями, то поймем те трудности, с которыми сталкиваются метеорологи при попытках построения долгосрочных и даже среднесрочных прогнозов. Вера в неуклонный прогресс предсказания погоды за счет увеличения вычислительных мощностей была иллюзией 1950-х гг.

Так как нелинейные модели применяются в самых разных областях исследований, мы глубже проникаем в предсказуемые горизонты колебательных химических реакций, флуктуаций видов, популяций, турбулентности в жидкости и экономических процессов. Например, появление солнечных пятен, которое раньше анализировалось статистическими методами, является, вне всякого сомнения, случайной активностью. Оно может быть промоделировано нелинейной хаотической системой с несколькими характерными периодами и странным аттрактором, позволяющим получить только ограниченные прогнозы вариаций числа пятен. В нелинейных моделях формирования общественного мнения можно различать, например, предсказуемое стабильное состояние перед публичным голосованием («бифуркация»), когда ни одно из двух возможных мнений не является предпочтительным, короткий период бифуркации, когда крохотные непредсказуемые флуктуации могут вызвать резкие изменения, и переход к устойчивому большинству. Ситуация напоминает рост воздушных пузырьков в турбулентно кипящей воде: когда пузырек становится достаточно большим, его постоянный рост при подъеме к поверхности воды становится предсказуемым. Однако зарождение пузырька и рост на ранней стадии — это вопрос случайной флуктуации. Очевидно, что нелинейное моделирование объясняет трудности современных пифий и сивилл.

В наши дни нелинейные прогнозирующие модели не всегда обеспечивают более точные и эффективные предсказания, чем стандартные линейные процедуры. Их главное преимущество заключается в объяснении фактической нелинейной динамики в реальных процессах, в идентификации и улучшении локальных горизонтов с помощью краткосрочных предсказаний. Но, прежде всего, должны быть предъявлены соответствующие динамические уравнения, описывающие наблюдение в момент времени t, с тем чтобы предсказать будущее поведение путем решения этого уравнения. Даже в естественных науках до сих пор неясно, могут ли быть выведены соответствующие уравнения, например, в такой области, как математическая геофизика, в частности, занимающаяся прогнозом землетрясений. Мы можем надеяться занести в память компьютера список типичных нелинейных уравнений, коэффициенты которых могут автоматически подстраиваться к наблюдаемому процессу. Вместо этого для осуществления исчерпывающего поиска всех возможных подходящих параметров может быть запущена обучающая стратегия, когда на сравнительно малых

временах действует грубая модель, а затем уточняется меньшее количество параметров, заключенных в более узком интервале значений. Улучшение краткосрочного прогнозирования было реализовано обучающими стратегиями нейронных сетей. Основываясь на выученных данных, нейронные сети могут взвесить входные данные и минимизировать ошибки прогнозирования краткосрочных изменений курсов акций с помощью самоорганизующихся процедур (рис. 6.4 *а*, *б*). До тех пор пока этой технической поддержкой пользуются только немногие биржевые консультанты, они могут действовать успешно. Но если все участники рынка будут использовать одну и ту же обучающую стратегию, прогнозирование превратится в саморазрушающее прорицание.

Причина состоит в том, что человеческие сообщества — это не сложные системы молекул или муравьев, а результат преднамеренных действий существ, обладающих в большей или меньшей степени свободной волей [8.6]. Конкретным типом самоисполняющегося прорицания является *эффект Эдипа*, когда люди, подобно легендарному греческому царю, тщетно пытаются изменить то будущее, которое им предсказано. С макроскопической точки зрения, мы, конечно, можем наблюдать отдельных индивидуумов, вносящих свой вклад в коллективное макросостояние общества, представляющее культурный, политический и экономический уклад («параметры порядка»). Однако макросостояния общества, конечно, не просто усредняются по его частям. Параметры порядка общества сильно влияют на индивидуумов, ориентируя («подчиняя») их деятельность и активируя или дезактивируя их позиции и возможности. Такой вид обратной связи типичен для сложных динамических систем. Если благодаря внутренним или внешним взаимодействиям управляющие параметры окружающей среды достигают определенных критических значений, то макропеременные могут двигаться в сторону неустойчивой области, вне которой возможны сильно расходящиеся альтернативные пути. Крохотные непредсказуемые флуктуации (например, действия небольшого числа влиятельных личностей, научные открытия, новые технологии) могут определить, какой из расходящихся путей в неустойчивом состоянии бифуркации выберет общество.

Одним из глубочайших проникновений в мир сложных систем является понимание того, что даже полное знание микроскопических взаимодействий не гарантирует предсказания будущего. В этой книге мы узнали, что простые правила физической, генетической, нейронной или социальной динамики могут порождать очень сложные и даже случайные структуры материи, органического роста, ментального распознавания и социального поведения. Случайность, в практическом смысле, означает только, что будущее формирование или поведение нельзя определить знакомыми и хорошо известными структурами или программами. В этом случае вычислимость будущего не сводится к определенным структурам и программам. Случайность в принципе требует *вычислительной неприводимости*. Иными словами, не существует конечного метода предсказания того, как будет вести себя система, кроме повторения почти всех шагов реального развития. Когда речь идет о случайности, не существует более короткого пути к эволюции. Математические системы типа клеточных автоматов (КА) или технические системы типа клеточных нейронных/нелинейных

сетей (КНС) могут достигать точно такого же уровня сложности и случайности, как в природе и обществе. Таким образом, традиционная научная точка зрения, утверждающая, что точное знание законов позволяет делать точный прогноз, в случае нелинейной и случайной динамики оказывается неверной.

8.2. Сложность, наука и техника

Несмотря на описанные выше трудности, нам нужна заслуживающая доверия поддержка в вопросах краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозов нашего локального и глобального будущего. Недавним заказом от политиков стало моделирование будущего развития науки и техники, которое становится критическим фактором современной цивилизации. Действительно, этот тип развития управляется, по-видимому, сложной динамикой научных идей и исследовательских групп, погруженных в сложную сеть человеческого общества. Общие темы исследовательских групп на более или менее длительные периоды времени привлекают интерес и способности исследователей. Такие исследовательские «аттракторы» определяют активность ученых, подобно аттракторам и вихрям в динамике жидкости. Когда состояния исследований становятся неустойчивыми, исследовательские группы могут разделиться на подгруппы, занятые конкретными направлениями, которые могут завершиться решением проблемы или снова испытать бифуркацию, и т. д. Создается впечатление, что динамика науки реализуется фазовыми переходами на бифуркационной диаграмме с возрастающей сложностью. Иногда научные проблемы хорошо определены и приводят к четким решениям. Однако существуют и «странные» и «расплывчатые» состояния типа странных аттракторов в теории хаоса.

Исторически количественные исследования научного роста начались со статистических подходов, подобных работе Райнова «Волноподобные флуктуации креативности в развитии западноевропейской физики XVIII и XIX вв.» (1929). С социологической точки зрения Роберт Мертон обсуждал «Меняющиеся центры интереса в науке и технике», в то время как Питирим Сорокин анализировал экспоненциальный рост научных открытий и технических изобретений, начиная с XV в. Он доказывал, что важность изобретения или открытия зависит не от субъективного фактора, а от числа последующих научных работ, порожденных основной инновацией. Уже в 1912 г. Альфред Лотка рассматривал идею описания чисто эпидемических процессов вроде распространения малярии и химических колебаний с помощью дифференциальных уравнений. Позднее специалист по информатике Уильям Гоффман применил эпидемическую модель к распространению научных идей. Существует начальный фокус «заразных идей», квази-эпидемическим образом заражающих все больше людей. Таким образом, с точки зрения эпидемиологии, накопление и концентрация в научной области моделируется так называемыми распределениями Лотки и Бредфорда, начинающимися с нескольких статей ряда авторов, которые являются ядрами группы публикаций [8.7]. Эпидемическая модель применялась также к распространению технических инноваций. Во всех этих примерах мы обнаруживаем хорошо известную S-образную кривую, характерную для логистиче-

ского отображения (рис. 2.22 *а*), с медленным ростом в начале, за которым следует экспоненциальный участок, переходящий в медленный рост до насыщения. Очевидно, что процесс обучения также описывается тремя фазами S-образной кривой с медленным успехом в обучении индивидуума в начале, затем быстрым экспоненциальным ростом и заключительной медленной фазой, переходящей в насыщение.

Переход от статистического анализа к динамическим моделям имеет большое методологическое преимущество, заключающееся в том, что малопонятные явления, подобные странным флуктуациям или статистическим корреляциям научной активности, могут быть проиллюстрированы в компьютеризованных экспериментах с меняющимися динамическими сценариями. Эпидемическая модель и уравнение Лотки—Вольтерры были лишь первой попыткой имитации связанных процессов роста научных сообществ. Однако важные свойства эволюционных процессов типа рождения новых структурных элементов (мутация, инновация и т. п.) не могли получить в них своего отражения. Эволюционные процессы в социальных системах должны изображаться неустойчивыми переходами, с помощью которых новые идеи, области исследования и технологии (например, новые продукты в экономических моделях) заменяют уже существующие и таким образом изменяют структуру научной системы.

В обобщении уравнения Эйгена для добиологической эволюции (см. разд. 3.3) научная система описывается счетным количеством областей (т. е. направлений всей области научного исследования), каждая из которых характеризуется числом занятых элементов (т. е. числом ученых, работающих в конкретном направлении). Элементарные процессы самовоспроизведения, спада, обмена и вклада от внешних источников или спонтанной генерации должны моделироваться. Каждый процесс саморепликации или смерти изменяет только занятость в одной области. В случае простых линейных процессов самовоспроизведения без обмена разность между скоростями «рождения» и «смерти» данной области определяет величину *отбора области*. Когда новая область впервые заселяется, именно ее величина отбора определяет, является ли система устойчивой или неустойчивой по отношению к инновации. Если ее величина отбора больше, чем любая величина отбора для существующих областей, новая область опередит в росте другие, и система может стать неустойчивой. Эволюция новых областей с более высокими величинами отбора характеризует простой процесс отбора согласно дарвиновскому «выживанию наиболее приспособленных».

Однако не следует забывать, что подобные математические модели не предполагают сведéния научной деятельности к биологическим механизмам. Переменные и константы в уравнении эволюции относятся не к биохимическим величинам и измерениям, а к статистическим таблицам наукометрии. Самовоспроизведение соответствует молодым ученым, которые присоединяются к той области исследований, в которой они хотят работать. На их выбор влияют процессы образования, социальные потребности, личный интерес, научные школы и т. п. Спад означает, что ученые активны в науке лишь ограниченное число лет. Ученые могут покидать научную систему по разным причинам (например, по возрасту).

Мобильность области означает процесс обмена учеными между областями исследований в соответствии с моделью миграции. Ученые могут предпочесть переход к более привлекательной области, выражаемой более высокой скоростью самовоспроизведения. Когда процессы включают обмен между областями с нелинейными функциями роста, самовоспроизведения и спада, то вычисление величин отбора инновации становится довольно сложной математической задачей. В общем случае новое поле с более высокой величиной отбора указывает на неустойчивость системы по отношению к соответствующему возмущению.

На самом деле научный рост является стохастическим процессом. Например, на начальной стадии развития новой области, когда в ней работает только несколько первопроходцев, типичными являются стохастические флуктуации. Стохастическая динамика вероятной плотности занятости в научных направлениях моделируется основным уравнением с оператором перехода, определяемым вероятностями перехода для самовоспроизводства, спада и мобильности области. Стохастическая модель обеспечивает основу ряда компьютеризованных моделей процессов научного роста. Для анализа трендов рассматриваются также соответствующие детерминистические кривые, являющиеся средними по большому числу тождественных стохастических систем. В результате для научных сообществ в ряде расчетов был установлен общий закон роста в виде S-образной кривой в подобластях с замедленной начальной фазой, фазой быстрого роста и фазой насыщения. В ряде моделей (рис. 8.3) предполагалось, что в данной области исследований принимают участие 120–160 ученых. Для пяти областей в качестве начального условия были выбраны 100 ученых, причем область насыщения находилась вблизи начальных условий. Шестая область еще не установилась (количество ученых в начальный момент равно нулю). В первом примере для нескольких случаев было имитировано влияние процесса самовоспроизводства на кривую роста новой области. С ростом скоростей самовоспроизводства новая область растет еще быстрее за счет соседних областей.

Возникновение новой области может иметь тенденцию к большему сосуществованию или отбору. Рост начальной фазы может быть более или менее быстрым, а также может быть задержан. Знаменитым примером задержанного роста в истории науки является сама теория хаоса, которая на первой стадии изучалась всего несколькими учеными (например, Пуанкаре). Хотя математические принципы новой области были совершенно ясны, ее экспоненциальный рост начался только несколько десятилетий назад, когда вычислительные технологии сумели справиться с нелинейными уравнениями. Иногда возникшая область не может расшириться до реального раздела науки, поскольку она имеет не слишком большое преимущество, по сравнению с могущественными окружающими областями. Очень жаль, что некоторые области технологии, например альтернативные источники энергии (ветер, солнечная энергия), все еще находятся в жалком состоянии и окружены мощными энергетическими отраслями, связанными с производством традиционной или ядерной энергии. Если возникает новая привлекательная область, сразу можно наблюдать сильный отток ученых из смежных направлений. Эти люди приспосабливаются к стилю и характеру решения

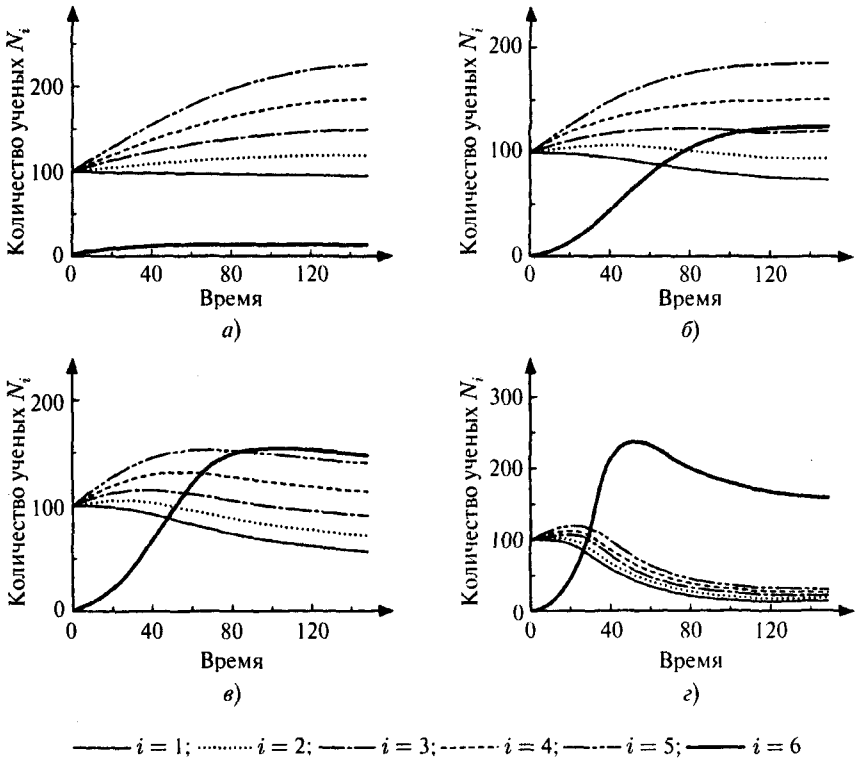


Рис. 8.3. Влияние скорости самовоспроизводства новой научной области на рост кривых соседних научных направлений [8.8]

проблем в новой области. Такой вид направленной подвижности областей иногда приводит к возникновению моды в науке.

Хорошо известно, что если соответствующие управляющие параметры возрастают выше определенных критических значений, то имеющее S-образную форму нелинейное логистическое отображение порождает разнообразное сложное динамическое поведение, например, неподвижные точки, циклы и детерминированный хаос (рис. 2.22). Очевидно, что как стохастическая, так и детерминированная модели отражают некоторые типичные свойства научного роста. Это структурная дифференциация, разрушение, рождение, расширение новых областей с задержкой, исчезновение, быстрый рост, переходящая границы разумного экспансия и регресс. Соответствующие графики, построенные по результатам расчетов, можно сравнить с наукометрическими данными. Чтобы предсказать вехи и рамки будущих исследований, можно моделировать возможные сценарии инновационного развития при меняющихся условиях.

Однако до сих пор эволюция областей научных исследований рассматривалась в модели только в терминах изменения числа исследователей в избранных областях. Более адекватное представление научного роста должно учитывать процессы принятия решений в научных устремлениях. Од-

нако поиск адекватного пространства состояний, представляющего развитие принятия решений в научной области, является трудной методологической проблемой. В математической теории биологической эволюции виды могут быть представлены точками в многомерном пространстве биологических признаков (рис. 3.4). Эволюция видов соответствует движению точки по пространству признаков фенотипа. Аналогично, в научной системе должно быть установлено многомерное пространство признаков научных проблем. Формы научных статей, анализируемых с помощью техники многомерного шкалирования в совместно цитируемых группах, могут быть представлены точками в двух или трех измерениях. Иногда исследовательские задачи отмечаются последовательностью ключевых слов («макротерминов»), которые регистрируются в соответствии с частотой их появления или совместного появления в научном тексте.

В непрерывной модели эволюции каждая точка в пространстве проблем описывается вектором, соответствующим исследовательской задаче (рис. 8.4 *а*). Пространство проблем состоит из всех научных задач данной области науки, некоторые из которых, вероятно, до сих пор неизвестны и не исследуются. Это пространство метрическое, так как расстояние между двумя точками соответствует степени тематической связи между представленными задачами. Ученые, работающие над задачей q в момент времени t, распределяются по пространству проблем с плотность $x(q,t)$. В непрерывной модели $x(q,t)\,dq$ означает число ученых, работающих в момент времени t в «элементе пространства проблем» dq (рис. 8.4 *б*).

Таким образом, области исследований могут соответствовать более или менее тесно связанным точечным облакам в пространстве проблем. Отдельные точки между этими областями большей плотности соответствуют ученым, работающим над изолированными научными задачами, которые могут представлять возможные ядра новых областей исследования.

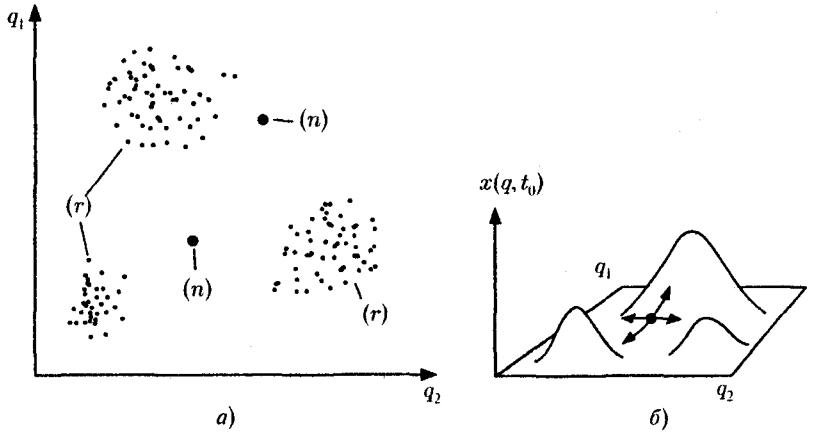


Рис. 8.4. Двумерное пространство проблем с областями исследований (r) в виде облаков связанных задач и возможным ядром (n) новых областей исследований (*а*); потенциальный ландшафт исследовательских усилий $x(q,t)$ в задаче $q = (q_1, q_2)$ пространства проблем в момент времени t (*б*) [8.9]

История науки показывает, что могут пройти десятилетия, прежде чем группа задач перерастет в область исследований. В непрерывной модели процессы мобильности областей отражаются изменением плотности: если ученый переходит от проблемы q к проблеме q', то плотность $x(q,t)$ станет меньше, а плотность $x(q',t)$ увеличится. Движение ученых в этом пространстве моделируется определенным уравнением переноса с источником и стоком. Функция $a(q)$ описывает скорость, с которой число ученых в области q растет за счет воспроизводства научных кадров и спада. Следовательно, это функция с большим числом максимумов и минимумов в пространстве проблем, выражающая увеличивающуюся или уменьшающуюся притягательность научных задач. По аналогии с физической потенциальной энергией (например, рис. 4.10), функцию $a(q)$ можно интерпретировать как потенциальный ландшафт привлекательности с холмами и долинами, представляющими аттракторы и тупиковые области исследований (рис. 8.4 *б*).

Динамические модели роста знаний можно проверять с помощью наукометрии. Таким образом, эти модели могут проложить мост между философией науки с ее концептуальными идеями о научном росте и историей науки с ее оценкой научных документов. В *когнитивной наукометрии* недавно была сделана попытка количественно описать понятие исследовательских программ и представить их в соответствующих пространствах проблем с помощью библиометрических, познавательных и социальных характеристик. Возможно, что упрощенные схемы истории науки, предложенные Поппером, Куном и другими философами и историками науки, заменятся проверяемыми гипотезами. Очевидно, что описанная Куном дискретная последовательность с фазами «нормальной» и «революционной» науки не может описать рост знаний. С другой стороны, наивная вера некоторых историков в то, что рост науки является непрерывным накоплением вечных истин, ни с какой стороны не подходит для описания сложной динамики исследований. Даже изощренная поздняя философия Поппера, согласно которой наука растет не благодаря монотонному увеличению числа бесспорно установленных законов, а за счет обучающих стратегий, гипотез и критики, требует уточнения и разъяснения со ссылками на меняющиеся исторические стандарты методологии, институционализации [2] и организации. Растущие вычислительные возможности современных компьютеров позволяют развить новый количественный подход с вычислительными экспериментами в общественных науках. Большое достижение динамических моделей состоит в их компьютеризованной графической иллюстрации различных сценариев с меняющимися параметрами. Эти сценарии могут подтверждать, ограничивать или отвергать выбранную модель на основе сравнения с реальными данными. Последнее, но не менее важное замечание: *нам нужна надежная поддержка для решений в научной политике*. Различные сценарии будущего развития могут помочь решить, куда вкладывать наши ограниченные средства исследовательского бюджета и как реализовать желаемые будущие состояния общества.

[2] Превращение какой-либо деятельности в регулируемую, общепринятую социальную практику. — *Прим. пер.*

Таким образом, нелинейное моделирование и вычислительный эксперимент могут позволить нам вывести многие варианты будущего, но не предлагают никакого алгоритма для выбора между ними. Чтобы реализовать желаемые будущие состояния общества, нужно включить в рассмотрение нормативные цели. Начиная с 1960-х гг. отчеты Римского клуба, поддержанные количественными долгосрочными прогнозами, пытались инициировать международные дебаты о целях и альтернативных вариантах будущего для человечества. В разд. 7.1 мы обсуждали ограниченность количественных долгосрочных прогнозов в нелинейном мире. Следовательно, научные идеи и технологические инновации не могут быть насильственно внедрены политическими решениями. Но они не должны больше быть пророческими случайными событиями, которые то ли могут, то ли не могут случиться. Нам нужны инструменты для оценки желаемых целей и их шансов на реализацию.

Неколичественный подход — это так называемый «метод Дельфи», используемый группой экспертов для подготовки решений и прогнозов научных и технологических трендов. Имя «Дельфи» связано с легендарной пифией, которая, как говорили, готовила свои прорицания, собирая информацию о клиентах. Сегодня метод Дельфи использует оценки научных экспертов. Отдельные эксперты разделены между собой, так что на их мнения не влияют общественное давление или групповое поведение. В письме экспертов просят назвать и оценить изобретения и научные прорывы, которые возможны и/или желательны в определенный период времени. Иногда их спрашивают не только о вероятности каждого достижения; дополнительно их просят оценить вероятность того, что осуществление любого из потенциальных открытий повлияет на вероятность воплощения других. Таким образом, получается скоррелированная сеть будущих разработок, которая может быть представлена матрицей субъективных условных вероятностей. На следующем этапе экспертам сообщают о вопросах, по которым достигнут консенсус большинства. Когда их просят назвать причины своего несогласия с мнением большинства, некоторые эксперты заново оценивают свои временные прогнозы, так что для каждого прорыва может возникнуть более узкий временной интервал.

Конечно, метод Дельфи не может дать единственного ответа. Однако разброс мнений экспертов дает существенную информацию о потенциальных главных прорывах. Средние отклонения от большинства могут быть сужены без оказания на экспертов давления резкими ответами. Но поэтому метод Дельфи не может предсказать неожиданное. Иногда, для того чтобы отобрать лучшие из альтернативных действий путем построения деревьев решений[3)], метод Дельфи подкрепляется методом деревьев относительной важности целей. Этот метод использует идеи теории решений, чтобы оценить желательность определенного будущего и отобрать те области науки и техники, развитие которых необходимо для достижения поставленных целей.

Очевидно, что в сложном нелинейном мире не существует единственного метода прогнозирования и принятия решений. Нам нужна интегрированная («гибридная») сеть количественных и качественных методов.

[3)] Графическое изображение альтернативных действий и их последствий. — *Прим. пер.*

Наконец, нам нужны этические вехи, которые руководили бы нами при применении этих инструментов и овладении будущим.

8.3. Сложность, ответственность и свобода

В последние годы этика стала главной темой, привлекающей все больший интерес широкого круга профессионалов, включая инженеров, врачей, ученых, менеджеров и политиков. Причины такого интереса — это серьезные проблемы с окружающей средой, экономикой и современными технологиями, вопросы ответственности, растущая тревога и уменьшающееся признание критических последствий существования в высокоиндустриализованном мире. Однако мы должны отдавать себе отчет в том, что наши стандарты этического поведения не свалились с небес на Землю и не были выявлены каким-то загадочным высшим авторитетом. Они изменялись и будут продолжать изменяться, так как они включены в эволюцию нашего социокультурного мира.

Строя модели человеческого общества, мы не должны забывать высоко нелинейную самоотносимость сложной системы с намеренно действующими существами. В социальных науках существует конкретная проблема измерения, возникающая из того факта, что ученые, наблюдающие и фиксирующие поведение общества, сами являются членами той социальной системы, которую они наблюдают. Хорошо известными примерами являются эффекты опросов общественного мнения во время политических выборов. Кроме того, теоретические модели общества могут иметь нормативные функции, влияющие на будущее поведение его членов. Хорошо известным примером в XIX в. был социал-дарвинизм, который пытался объяснить социальное развитие человечества как линейное продолжение биологической эволюции. В действительности, эта социальная теория породила бесчеловечную идеологию, легализующую жестокий отбор социальных, экономических и расовых победителей. В наши дни иногда модно легитимизировать политические идеи базовой демократии и экологической экономики биологическими моделями самоорганизации [8.10]. Однако природа не является ни плохой, ни хорошей, ни мирной, ни воинственной. Это человеческие оценки. Биологические стратегии в течение миллионов лет действовали за счет огромного числа популяций и видов с дефектами генов, раком и т. п., и, с точки зрения человека, совершили много других жестокостей. Они не могут обеспечить этические стандарты для нашего политического, экономического и общественного развития.

Мы видели в этой книге, что модели жизни, разума и общества часто зависят от философских концепций природы и исторических стандартов технологии. Особенно линейный и механистический взгляд на причинность был доминирующей парадигмой в истории естественных, социальных и технических наук. Он также повлиял на этические нормы и ценности, которые нельзя понять без эпистемологических[4] понятий тех исторических эпох, в которые они возникли. Складывавшаяся в ходе развития взаимозависимость эпистемологии и этики не означает какого-то типа релятивизма или натурализма. Как и в случае научных теорий и гипотез, мы должны отличать обстоя-

[4] Эпистемология — раздел философии, изучающий основания знания. — *Прим. пер.*

тельства их возникновения, изобретения и открытия от обстоятельств подтверждения и обоснования. Даже понятие прав человека имело историческое развитие с меняющимся смыслом [8.11]. Гегель однажды заметил, что историю человечества можно понимать как «развитие к свободе». Таким образом, прежде чем мы обсудим возможные этические последствия развития сложного, нелинейного и случайного мира, мы должны бросить взгляд на историческое развитие этических норм.

Этика — это раздел философии, такой же по статусу, как логика, эпистемология, философия науки, языка, права, религии и пр. [8.12]. Исторически слово «этика» восходит к греческому слову ἦθος, означающему привычку и обычай. Первоначально этика понималась как доктрина моральных обычаев и установлений, обучающих людей тому, как надо жить. Центральной проблемой этики стал поиск хорошего морального кодекса, в котором содержались бы советы о том, как надо правильно жить, как действовать по справедливости и как принимать разумные решения. Ряд существенных понятий этики уже обсуждались греческими философами — последователями Сократа. Ученик Сократа Платон обобщил сократовский поиск добродетельной жизни до универсальной идеи о величайшем благе, которое вечно и не зависит от исторической жизни в эфемерном и быстро меняющемся мире вещей [8.13].

Аристотель критиковал доктрину своего учителя о вечных ценностях за игнорирование реальной человеческой жизни. Для Аристотеля ценность блага, справедливости и разума относится к политическому обществу (*polis*), семье и взаимодействию отдельных личностей [8.14]. Справедливость в полисе осуществляется пропорциональностью или равновесием естественных интересов свободных людей. Величайшее благо человека — счастье, которое реализуется успешной жизнью согласно естественным обычаям и действиям в полисе и семье. Очевидно, что понятие этики Аристотеля соответствует его органическим взглядам на природу, заполненную растущими и зрелыми организмами — растениями, животными и людьми.

После распада греческого полиса этике потребовалась новая структура стандартов. В этике Эпикура подчеркивалось внутреннее равноправие жизни, действия и чувства личности, в то время как этика стоиков подчеркивала внешнее равноправие всех людей, достигаемое природой. В христианстве Средних веков иерархия вечных ценностей гарантировалась божественным порядком в мире. В начале современной эпохи теологическая структура, как универсально принятая основа этики, созрела для распада.

Декарт не только предложил механистическую модель природы, но и потребовал введения системы морали, основанной на научных доводах. Барух Спиноза вывел аксиоматическую систему рациональной морали, соответствующей детерминированной и механистической модели природы. Так как законы природы считались идентичными с законами рациональности, свобода человека могла означать только действия согласно детерминистическим рациональным законам. Величайшее благо означало господство рациональности над эмоциями материального человеческого тела. Гоббс защищал механистический взгляд на природу и общество, но он сомневался в человеческой рациональ-

ности. Политические законы и обычаи могли быть гарантированы только централизованной мощью «Левиафана». Величайшее благо — это мир как фиксированное и конечное равновесие абсолютистского государства.

Либеральное общество Локка, Юма и Смита понималось по аналогии с ньютоновской моделью разделяемых сил и взаимодействующих небесных тел. В эпоху американской и французской революций индивидуальная свобода была провозглашена естественным правом [8.15]. Но как объяснить индивидуальную свободу в механистическом мире с помощью детерминистической причинности? Каждое естественное событие есть результат линейной цепочки причин, которые, в принципе, могут быть выведены с помощью механического уравнения движения. Предполагается, что только люди способны к спонтанным и свободным решениям, инициирующим причинные цепи действий без влияния извне. Кант назвал это свойство человека «причинностью свободы».

Так как ничьи мнения и желания не являются привилегированными, только приемлемый для каждого совет может рассматриваться как разумный. Словами Канта, в качестве универсальных моральных законов могут приниматься только общепринятые «максимы». Этот формальный принцип моральной универсальности представляет собой знаменитый кантовский категорический императив разума: мы должны действовать согласно императивам, которые могут быть оправданы как общие законы морали. Свобода личности ограничена свободой ее соседа. В другой знаменитой формулировке Кант говорил, что люди, как свободные существа, не должны быть неправильно использованы, как инструменты, в интересах других людей. Таким образом, помимо механистического мира природы, управляемого детерминистическими законами, существует внутренний мир разума с законами свободы и морали. Кантовская этика свободы была включена в формальные принципы каждого современного конституционного государства [8.16].

Но как можно реализовать законы свободы в реальном мире политики и экономики? В эпоху начальной индустриализации этика англо-американского утилитаризма (согласно Бентаму и Миллю) требовала оценки личного счастья. Для большинства людей счастье было объявлено величайшим благом этики. В то время как Кант предложил формальный принцип личной свободы, утилитарный принцип счастья можно интерпретировать как его материальное дополнение. В американской конституции он был явно затребован как естественное право человека. Утилитаристские философы и экономисты определили требование счастья как утилитарную функцию, которую следует оптимизировать с наименьшими затратами с целью реализовать наибольшее благосостояние для большинства людей. Принципы утилитаризма стали этической основой экономики благосостояния [8.17].

Современные философы, например Джон Роулз, доказывают, что утилитарные принципы в комбинации с кантовским требованием этической универсальности могут помочь реализовать требование справедливого распределения благ в современной политике социального обеспечения [8.18]. С методологической точки зрения, этическая, политическая и экономическая модель утилитаризма соответствует самоорганизующейся сложной

системе с единственной неподвижной точкой равновесия, которая реализуется оптимизацией функции полезности общества и связана со справедливым распределением благ между большинством людей.

Очевидно, что кантовская этика, как и англо-американский утилитаризм, являются нормативными требованиями для оценки наших действий. Они могут быть как приняты, так и отвергнуты отдельными личностями. Гегель доказывал, что субъективные этические стандарты индивидов были продуктами объективных процессов в истории, реализованных общественными институтами. Так, он различал субъективную мораль и субъективный разум индивида и объективную мораль и объективный разум общественных институтов. Исторически гегелевская основа этики в реальных обычаях и морали гражданского общества напоминает читателю аристотелевскую реалистическую этику греческого полиса. Однако аристотелевский порядок в обществе был статичным, а Гегель предполагал историческую эволюцию государств и их институтов.

С методологической точки зрения, примечательно, что Гегель уже различал микроуровень индивидов от макроуровня обществ и их институтов, которые являются не просто суммой своих граждан. Кроме того, он описывал эволюцию общества, которая определяется не намерениями и субъективными причинами отдельных личностей, а самоорганизующимся процессом коллективного разума. Тем не менее Гегель верил в довольно простую модель эволюции с последовательными состояниями равновесия, приводящими к конечной неподвижной точке, реализуемой аттрактором справедливого гражданского общества. Реальная история после Гегеля показала, что его вера в рациональные силы истории, ведущие человеческое общество за счет самоорганизации к финальному состоянию справедливости, была опасной иллюзией. Хорошо известно, что его модель была модифицирована и неправильно применена тоталитарными политиками как левого, так и правого толка.

Фридрих Ницше атаковал веру в объективный разум, а также в вечные этические ценности как идеалистические идеологии, противоположные реальным жизненным силам. На философию жизни Ницше оказала влияние дарвиновская биология эволюции, ставшая популярной философией в конце XIX в. Хотя в своих работах Ницше критиковал национализм и расизм, его прославление жизни и победителей в жизненной борьбе было чудовищно извращено политиками XX в. Тем не менее он представляет другой пример, показывающий, что понятия из естественных наук оказали влияние на политические и этические идеи [8.19].

Нигилизм Ницше и его критика современной цивилизации были продолжены в XX в. Мартином Хайдеггером. По взглядам Хайдеггера, техническая эволюция человечества представляет собой автоматизм без ориентации, забывший существенные основы человека и гуманности. Такой философ, как Хайдеггер, не может и не хочет изменять эту эволюцию или влиять на нее. Он обладает лишь свободой спокойно переносить свою судьбу. Но в какой степени хайдеггеровская позиция против технологии и цивилизации является больше, чем смирением, фатализмом и бегством в идиллическую свободную от технологии утопию, которой никогда в истории не существовало? Представля-

ется, что это крайняя степень отрицания лапласовской веры во всемогущую планирующую и управляющую силу в природе и обществе [8.20].

Каковы этические последствия подхода, основанного на теории сложности, который мы обсуждали в этой книге? Во-первых, мы должны быть уверены, что теория сложных систем не является онтологией метафизического процесса. Это не эпистемологическая доктрина в традиционном философском смысле. Принципы этой методологии обеспечивают эвристическую схему построения моделей нелинейных сложных систем в естественных и социальных науках. Если эти модели могут быть математизированы, а их свойства измерены, мы получаем эмпирические модели, которые могут удовлетворять данным или противоречить им. Кроме того, такая методология пытается использовать минимум гипотез в смысле бритвы Оккама. Таким образом, это *математическая, эмпирическая, проверяемая и эвристически экономная методология*. Кроме того, это *междисциплинарная исследовательская программа*, в которую вовлечены некоторые естественные и социальные науки. Однако это не этическая доктрина в традиционном философском смысле.

Тем не менее наши модели сложных, нелинейных и случайных процессов в природе и обществе имеют важные следствия для нашего поведения. В общем случае в сложной нелинейной реальности линейное мышление может быть опасным. Мы видели, что традиционные понятия свободы были основаны на линейных моделях поведения. В этих рамках каждое событие есть результат хорошо определенной начальной причины. Поэтому, если мы предположим линейную модель поведения, ответственность за событие или явление окажется однозначно предсказуемой.

Но как быть с глобальным экологическим ущербом, вызванным локальными нелинейными взаимодействиями миллиардов эгоистичных людей? Вспомним лишь один пример: требование хорошо сбалансированной сложной системы экологии и экономики. Так как экологический хаос может быть глобальным и неконтролируемым, некоторые философы, например Ханс Йонас, предложили прекратить всякую деятельность, которая могла бы иметь какие-то неизвестные последствия [8.21]. Но мы никогда не сможем в долгосрочной перспективе предсказать все события, которые произойдут в сложной системе. Должны ли мы поэтому уйти на покой, заняв, как Хайдеггер, позицию смирения? Проблема состоит в том, что, если не делать ничего, это не обязательно стабилизирует равновесие в сложной системе и может привести ее в другое метастабильное состояние. В ситуациях хаоса в сложных системах возможно краткосрочное прогнозирование, и делались попытки улучшить его, например, в экономике. Но в ситуации случайности и информационного шума не годится любой вид прогнозов, даже если мы полностью информированы о локальных правилах взаимодействия в сложной системе.

В линейной модели считается, что масштаб эффекта пропорционален величине, вызвавшей его причины. Так, судебное наказание за наказуемое деяние может быть пропорционально степени вызванного ущерба. Но что тогда сказать об эффекте бабочки — крохотных флуктуациях, которые инициированы отдельными людьми, группами или фирмами и которые могут привести к глобальному

кризису в политике и экономике? Рассмотрим, например, ответственность администраторов и политиков, ошибочные действия которых могут стать причиной нищеты тысяч и миллионов людей [8.22]. Но как быть с ответственностью, когда речь идет о случайных событиях? Например, информационный шум в Интернете должен быть предотвращен заранее. Если случай происходит, уже слишком поздно.

Так как экологические, экономические и политические проблемы человечества стали глобальными, сложными, нелинейными и случайными, ставится под вопрос традиционное понятие личной ответственности. Нам нужны новые модели коллективного поведения, зависящего от разных степеней наших индивидуальных возможностей и понимания. Индивидуальная свобода принятия решений не отвергается, но ограничивается коллективными эффектами сложных систем в природе и обществе, которые невозможно спрогнозировать и проконтролировать в долгосрочной перспективе. Таким образом, недостаточно иметь добрые личные намерения. Мы должны рассматривать их нелинейные последствия. Возможные сценарии при определенных обстоятельствах предоставляют глобальные динамические фазовые портреты. Они могут помочь в достижении подходящих условий для стимулирования желаемых и предотвращения вредных событий.

Безусловно, динамика глобализации является самым важным политическим вызовом сложности для будущего человечества. После падения Берлинской стены политики поверили в линейное предположение, что сочетание динамики свободных рынков и демократии автоматически приведет к сообществу модернизированных, миролюбивых наций с законопослушными гражданами и потребителями. В сложном мире это было ужасной ошибкой! С нашей точки зрения, сложность ведома многокомпонентной динамикой. Политики и экономисты забыли, что существуют также этнические и религиозные, психологические и социальные силы, которые могут определять всю динамику нации в критической точке неустойчивости. Как мы все знаем из теории сложных динамических систем, следует принимать во внимание начальные и граничные условия. Неустойчивость возникает в случае, когда свободный рынок и выборы реализуются в условиях недоразвитости.

Недавние исследования [8.23] показали, что во многих странах Юго-Восточной Азии, Южной Америки, Африки, Юго-Восточной Европы и Среднего Востока сочетание свободной от влияния правительства экономики и электоральной свободы не приводит автоматически к росту справедливости, благосостояния и мира, а склоняет баланс в этих регионах в сторону распада и раздоров. Одна из причин состоит в том, что в этих странах в основном отсутствует влиятельное большинство хорошо образованных людей. Таким образом, меньшинство умных этнических групп, племен и кланов приходят к власти и определяют динамику рынков и политики. В терминах сложной динамики, они являются параметрами порядка, определяющими («подчиняющими») всю динамику нации. И снова, недостаточно иметь хорошие намерения демократии и свободного рынка. Мы должны рассматривать локальные условия в странах и регионах.

В классической философии переход от задуманного развития к развитию вопреки духу философии стал

знаменитым под названием диалектического противоречия (например, эту проблему глубоко анализировал Гегель). Хорошие намерения могут привести к плохим последствиям. Но иногда история приводит отдельных личностей к хорошим результатам без их субъективных намерений. Гегель называл это «хитростью разума» (*List der Vernunft*). На самом деле это хорошо известный эффект нелинейной динамики. Поэтому доминирующие на рынке меньшинства не являются априори злом. Эти меньшинства одновременно являются движущей силой деятельности. Если они объективны и гибки, то они могут предотвратить предвзятое «подчинение», которое может быть успешным только в краткосрочной перспективе. В своих собственных интересах они должны пытаться стабилизировать всю систему в долгосрочной перспективе. Поэтому в процессе фазового перехода к демократии и благосостоянию большинства людей они должны помогать смягчить социальные последствия свободных рынков, сглаживать социальное расслоение и преодолевать классовое расслоение. Однако подобные фазовые переходы могут различаться от региона к региону в мире. В свете эффекта бабочки ответственные решения требуют гибкого учета местных условий.

В регионах и странах имеются не только местные меньшинства. В процессе глобализации меньшинство наций, институтов и компаний может прийти к власти и определять всю динамику глобальной экономики и политики. Недавние дискуссии по поводу глобализации показали, что значительное число людей недовольны результатами глобализации. Но необходимо понять, что глобализация означает не более, чем глобальную динамику политических и экономических систем в мире. Поэтому, на первый взгляд, она ни хороша, ни ужасна и сходна с динамикой погоды. Но в противоположность погоде, динамика глобализации порождается взаимодействиями людей и их институтов. Поэтому, если мы учтем динамические законы сложности и нелинейности, может появиться шанс повлиять на глобализацию.

Глобализация означает критический фазовый переход к глобальному управлению в мире. Нам нужны новые глобальные структуры для руководства политической, экономической, военной и технологической мощью в мире в соответствии с интересами большинства людей на Земле. Глобальные структуры возникают из нелинейных взаимодействий людей, наций и систем. В конце XVIII в. Кант уже потребовал принять закон для наций, ведущий «К вечному миру» (1795) [8.24]. После Первой мировой войны президент США Вильсон оказал сильное влияние на основание Лиги Наций. После Второй мировой войны Организация Объединенных Наций (ООН) предоставила новые возможности предотвращения международных конфликтов, однако часто эти попытки проваливались из-за недостатка силы. Дилемма международного права состоит в том, что право нуждается в силе, чтобы заставить соблюдать законы и этические нормы. Поэтому нации должны поделиться частью своего суверенитета, чтобы подчиняться общепринятым «параметрам порядка». После 11 сентября 2001 г. глобальная сеть терроризма угрожает ведущим политическим и экономическим нациям мира. В этом состоит причина того, что США, которые исторически помогали основать Лигу Наций, а также ООН, сейчас не решаются ограничить свой национальный суверенитет и предпочи-

тают организовать собственную национальную безопасность за счет глобальной военной защиты.

Ясно, что предстоит долгий путь к глобальному управлению среди суверенных наций. С другой стороны, не следует забывать прогресс, достигнутый новыми общественными и гуманитарными институтами ООН. Возникли новые экономические, технологические и культурные сети кооперации, позволившие людям медленно развиваться вместе, несмотря на реакции и трения в политической реальности. На пути к «вечному миру» Кант описывал федеральное (многокомпонентное) сообщество автономных наций, организующих свои политические, экономические и культурные дела без военных конфликтов. Но самое замечательное рабочее условие его модели заключается в требовании, чтобы государства организовали свои внутренние дела в соответствии с гражданскими законами свободы. Неоспоримым фактом исторического опыта является то, что гражданское мышление и гуманизация иногда не только защищались, но и вводились военной силой. До тех пор пока потребность в гражданских законах свободы не будет удовлетворена во всем мире, организация военной силы является неотложным вызовом глобализации.

Глобализация и международное сотрудничество ускоряются ростом глобальных информационных и компьютерных сетей, Интернетом и беспроводными мобильными системами связи. С другой стороны, электронная наблюдаемость всей жизни глобальной деревни означает серьезную угрозу личной свободе. Если информация о гражданах может быть легко собрана и оценена в больших коммуникационных сетях, то опасность злоупотребления ею заинтересованными ведомствами надо воспринимать очень серьезно. Как в традиционной экономике товаров, могут возникнуть информационные монополии, действующие как доминирующие меньшинства, наносящие ущерб другим людям, классам и странам. Например, рассмотрим бывший «Третий мир» или «Юг» с их менее развитыми системами информационных услуг, которые не имеют никаких честных шансов против «Севера» в глобальной коммуникационной деревне.

Наши врачи и психологи должны научиться рассматривать людей как сложные нелинейные единства разума и тела. Линейное мышление может помешать постановке правильного диагноза. Локальное, изолированное и «линейное» терапевтическое лечение может привести к отрицательным синергетическим эффектам. Поэтому примечательно, что математическое моделирование сложных медицинских и психологических ситуаций требует большой чувствительности и внимательности, с тем чтобы вылечить больных людей и оказать им помощь. Подход, основанный на теории сложности, не может объяснить нам, *что такое* жизнь. Но он может показать нам, *насколько* сложна и чувствительна жизнь. Поэтому такой подход может помочь нам получить уверенность в ценности нашей жизни.

Но что можно сказать о ценности нашей жизни, если ее можно вычислить? Одна из самых существенных идей этой книги состоит в том, что динамика природы и общества характеризуется не только нелинейностью и хаосом, но и случайностью. Только в случайности человеческая свободная воля может обрести реальный шанс [8.25]. В полностью детерми-

нированном и вычислимом мире механической природы Кант вынужден был постулировать трансцендентальный мир, чтобы сделать возможными свободную волю, этические обязанности и ответственность. В случайных состояниях природы и общества поведение системы не может быть определено. Случайная динамика может порождаться даже в случае, когда известны все правила взаимодействия элементов в динамической системе. В этом случае динамика системы соответствует неприводимому вычислению, означающему отсутствие шансов на прогнозирование. Единственный способ узнать что-нибудь о будущем системы заключается в том, чтобы проследить ее динамику. Например, макроповедение мозга может соответствовать неприводимому вычислению, хотя мы знаем все правила синаптических взаимодействий. В этом случае не существует короткого пути или конечной программы для нашей жизни. Чтобы испытать нашу жизнь, нам нужно ее прожить. Создается поразительное впечатление, что свободная воля человека поддерживается лишь математической теорией вычислимости.

Очевидно, теория сложных систем имеет глубокие следствия для этики в политике, экономике, экологии, медицине и биологических, вычислительных и информационных науках. Эти этические следствия сильно зависят от нашего знания сложной нелинейной динамики в природе и обществе, но они не выводятся из основных принципов теории сложных систем. Таким образом, мы не защищаем этический натурализм или редукционизм любого вида. Динамические модели городского развития, глобальная экология, человеческие органы или информационные сети только предлагают некоторые сценарии с различными аттракторами. Перед нами возникает вопрос оценки того, какой из аттракторов мы должны предпочесть этически, и помощи в реализации этого аттрактора путем достижения подходящих условий. Иммануил Кант суммировал философские проблемы в трех знаменитых вопросах:



Что я могу знать?
Что я должен делать?
На что я могу надеяться?

Первый вопрос касается эпистемологии с учетом возможностей и ограничений нашего познания. Теория сложных систем объясняет, что мы можем и что не можем узнать о нелинейной динамике в природе и обществе. В общем, вопрос требует научного исследования, чтобы улучшить наше знание о сложности и эволюции.

Второй вопрос касается этики и оценки наших действий. В общем, он требует чувства меры при взаимодействии с высокочувствительными сложными системами в природе и обществе. Мы не должны ни перегрывать, ни отступать, так как перегрывание, равно как и отступление, могут столкнуть систему из одного хаотического состояния в другое. Мы должны быть осторожными и смелыми, согласно условиям нелинейности и сложности в эволюции. В политике мы должны быть уверены, что любой вид монопричинности может привести к догматизму, нетерпимости и фанатизму.

Последний вопрос Канта «На что мы можем надеяться?» касается Вели-

чайшего Блага, которое традиционно обсуждалось как *summum bonum* философии религии. На первый взгляд кажется, что вопрос находится за пределами теории сложных систем, которая только позволяет вывести глобальные сценарии в долгосрочной перспективе и дать краткосрочные прогнозы при определенных условиях. Но когда мы рассматриваем долгую социокультурную эволюцию человечества, становится ясно, что величайшим благом, за которое боролись люди, было достоинство их личной жизни. Это не зависит от индивидуальных возможностей, уровня интеллекта или социальных преимуществ, приобретенных за счет случайных обстоятельств рождения. Это был свободный акт самоопределения человека в историческом потоке нелинейности и случайности. Нам нужен план Величайшего Блага для непрерывной эволюции растущей сложности.

Примечания

Глава 1

1.1. *Mainzer K., Schirmacher W. (eds.).* Quanten, Chaos und Dämonen. Erkenntnistheoretische Aspekte der modernen Physik. B. I. Wissenschaftsverlag: Mannheim (1994).

1.2. *Stein D. L. (ed.).* Lectures in the Sciences of Complexity, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Vol. 1. Addison-Wesley: Redwood City, CA, (1989); *Jen E. (ed.).* Lectures in Complex Systems, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Vol. 2 (1990); *Stein D. L. (ed.).* Lectures in Complex Systems, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Vol. 3 (1991); *Kurdyumov S. P.* Evolution and self-organization laws in complex systems, Intern. J. Modern Physics C. Vol. 1, no. 4 (1990) 299–327. Подход научной школы С. П. Курдюмова представлен в работах: *Капица С. П., Курдюмов С. П.* Синергетика и прогнозы будущего. 3-е изд. М.: URSS, 2003; *Малинецкий Г. Г. (ред.).* Режимы с обострениями: эволюция идеи. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.

1.3. *Nicolis G., Prigogine I.* Exploring Complexity. An Introduction. W. H. Freeman: New York (1989) (*Пригожин И., Николис Г.* Познание сложного. Введение. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2008).

1.4. *Haken H.* Synergetics. An Introduction, 3rd Edn. Springer: Berlin (1983). Перевод предыдущего издания: *Хакен Г.* Синергетика. М.: Мир. 1980.

1.5. *Mainzer K.* Symmetries in Nature. De Gruyter: New York (1995) (German original: Symmetrien der Natur 1988).

1.6. *Chua L. O.* CNN: A Paradigm for Complexity. World Scientific: Singapore (1998).

Глава 2

2.1. Исторические источники, разд. 2.1 ср.: *Mainzer K.* Symmetries in Nature. De Gruyter: New York (1994) (German original 1988) Chapter 1.

2.2. *Diels H.* Die Fragmente der Vorsokratiker, 6th ed., revised by W. Kranz. 3 vol. Berlin (1960/1961) (сокр.: Diels-Kranz), 12 A 10 (Pseudo-Plutarch).

2.3. Diels-Kranz 13 A 5, B 1.

2.4. Diels-Kranz 22 B 64, B 30.

2.5. *Heisenberg W.* Physik und Philosophie. Ullstein: Frankfurt (1970) 44.

2.6. Diels-Kranz 22 B8.

2.7. Diels-Kranz 31 B8.

2.8. *Heisenberg W.* Die Plancksche Entdeckung und die philosophischen Grundlagen der Atomlehre. In: *Heisenberg W.* Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaften. S. Hirzel: Stuttgart (1959) 163.

2.9. Ср. также: *Hanson N. R.* Constellations and Conjectures. Boston (1973) 101.

2.10. *Hanson N. R.* (см. примеч. 9, 113) carried out corresponding calculations.

2.11. *Bohr H.* Fastperiodische Funktionen. Berlin (1932).

2.12. *Forke A.* Geschichte der alten chinesischen Philosophie. Hamburg (1927) 486; *Fêng Yu-Lan* A History of Chinese Philosophy. Vol. 2: The Period of Classical Learning. Princeton NJ (1953) 120.

2.13. *Mainzer K.* Geschichte der Geometrie. B. I. Wissenschaftsverlag: Mannheim/Wien/Zürich (1980) 83; *Edwards C. H.* The Historical Development of the Calculus. Springer: Berlin (1979) 89.

2.14. *Mainzer K.* Geschichte der Geometrie (см. примеч. 13) 100; *Abraham R. H., Shaw C.D.* Dynamics – The Geometry of Behavior Part 1. Aerial Press: Santa Cruz (1984) 20.

2.15. *Audretsch J., Mainzer K. (eds.).* Philosophie und Physik der Raum-Zeit. B. I. Wissenschaftsverlag: Mannheim (1988) 30.

2.16. *Audretsch J., Mainzer K. (eds.).* Philosophie und Physik der Raum-Zeit (см. примеч. 15) 40; *Weyl H.* Raum, Zeit, Materie. Vorlesung über Allgemeine Relativitätstheorie. Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt (1961) (Reprint of the 5th Edition (1923)) 141.

2.17. *Mach E.* Die Mechanik. Historisch-kritisch dargestellt. Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt (1976) (Reprint of the 9th Edition (1933)) 149; *Abraham R. H., Shaw C. D.* Dynamics – The Geometry of Behavior (см. примеч. 14) 57.

2.18. *Ruelle D.* Small random pertubations of dynamical systems and the definition of attractors. Commun. Math. Phys. 82 (1981) 137–151; *Abraham R. H., Shaw C. D.* Dynamics – The Geometry of Behavior (см. примеч. 14) 45.

2.19. Для аналитических уточнений см.: *Stauffer D., Stanley H. E.* From Newton to Mandelbrot. A Primer in Theoretical Physics. Springer: Berlin (1990) 26.

2.20. *Nicolis G., Prigogine I.* Die Erforschung des Komplexen (см. гл. 1, прим. 3) 132; *Abraham R. H., Shaw C. D.* Dynamics – The Geometry of Behavior (см. примеч. 14) 168, 174.

2.21. Для аналитических уточнений см.: *Mainzer K.* Symmetries in Nature (см. примеч. 1) Chapter 3.31; *Stauffer D., Stanley H. E.* From Newton to Mandelbrot (см. примеч. 19) 24.

2.22. *Arnold V. I.* Mathematical Methods of Classical Mechanics. Springer: Berlin (1978) (рус. пер.: *Арнольд В. И.* Математические методы классической механики. М.: URSS, 2003); *Davies P. C. W.* The Physics of Time Asymmetry. Surrey University Press: London (1974); *Penrose R.* The Emperor's New Mind. Oxford University Press: Oxford (1989) 181 (рус. пер.: *Пенроуз Р.* Новый ум короля. 3-е изд. М.: URSS, 2008).

2.23. *Lichtenberg A. J., Liebermann M. A.* Regular and Stochastic Motion. Springer: Berlin (1982) (рус. пер.: *Лихтенберг А., Либерман М.* Регулярная и стохастическая динамика. М.: Мир, 1984); *Schuster H. G.* Deterministic Chaos. An Introduction. Physik-Verlag: Weinheim (1984) 137 (рус. пер.: *Шустер Г.* Детерминированный хаос : введение. М.: Мир, 1988).

2.24. *Poincaré, H.* Les Méthodes Nouvelles de la Méchanique Céleste. Gauthier-Villars: Paris (1892) (рус. пер.: *Пуанкаре А.* Избранные труды. Новые методы небесной механики. М.: Наука, 1971).

2.25. *Arnold V. I.* Small Denominators II, Proof of a theorem of A. N. Kolmogorov on the preservation of conditionally-periodic motions under a small perturbation of the Hamiltonian, Russ. Math. Surveys **18** (1963) 5 (*Арнольд В. И.* Доказательство теоремы А. Н. Колмогорова о сохранении условно-периодических движений при малом изменении функции Гамильтона // УМН. 1963. Т.18, вып. 5(113). С. 13–40); *Kolmogorov A. N.* On Conservation of Conditionally-Periodic Motions for a Small Change in Hamilton's Function, Dokl. Akad. Nauk. USSR **98** (1954) 525 (*Колмогоров А. Н.* О сохранении условно периодических движений при малом изменении функции Гамильтона // ДАН СССР. 1954. Т. 98. № 4. 527–530); *Moser J.* Convergent series expansions of quasi-periodic motions, Math. Anm. **169** (1967) 163.

2.26. Ср.: *Arnold V. I.* Mathematical Methods of Classical Mechanics (см. примеч. 22); *Schuster H. G.* Deterministic Chaos (см. примеч. 23), 141.

2.27. *Hénon M., Heiles C.* The applicability of the third integral of the motion: Some numerical experiments, Astron. J. **69** (1964) pp. 73; *Schuster H. G.* Deterministic Chaos (см. примеч. 23), 150; рис. 2.16 a–d из: M. V. Berry in S. Jorna (ed.), Topics in nonlinear dynamics. Am. Inst. Phys. Conf. Proc. Vol. 46 (1978).

2.28. For mathematical details compare, e. g. *Staufer D., Stanley H. E.* From Newton to Mandelbrot (см. примеч. 19), 83.

2.29. *Mainzer K.* Symmetrien der Natur (см. примеч. 1), 423; *Primas H., Müller-Herold U.* Elementare Quantenchemie. Teubner: Stuttgart (1984) с элементарным введением в квантовую механику, инвариантную относительно преобразований Галилея (Chapter 3).

2.30. *Audretsch J., Mainzer K. (eds.).* Wieviele Leben hat Schrödingers Katze? B. I. Wissenschaftsverlag: Mannheim (1990).

2.31. *Gutzwiller M. C.* Chaos in Classical and Quantum Mechanics. Springer: Berlin (1990).

2.32. *Friedrich H.* Chaos in Atomen. In: *Mainzer K., Schirmacher W. (eds.).* Quanten, Chaos und Dämonen (см. примеч. 1 гл. 1); *Friedrich H., Wintgen D.* The hydrogen atom in a uniform magnetic field, Physics Reports **183** (1989) 37–79.

2.33. *Birkhoff G. D.* Nouvelles recherches sur les systèmes dynamiques, Mem. Pont. Acad. Sci. Novi Lyncaei **1** (1935) 85.

2.34. *Enz C.P.* Beschreibung nicht-konservativer nicht-linearer Systeme I–II, Physik in unserer Zeit **4** (1979) 119–126, **5** (1979) 141–144 (II).

2.35. *Lorenz E. N.* Deterministic nonperiodic flow, J. Atoms. Sci. **20** (1963) 130 (рус. пер.: *Лоренц Э.* Детерминированное непериодическое течение // Синай Я. Г., Шильников Л. П. (ред.) Странные аттракторы. Мир, 1981); *Schuster H. G.* Deterministic Chaos (см. примеч. 23) 9.

2.36. *Eckmann J. P.* Roads to turbulence in dissipative dynamical systems, Rev. Mod. Phys. **53** (1981) 643; компьютерный расчет представлен на рис. 2.21 из: *Lanford O. E.* Turbulence Seminar. In: *Bernard P., Rativ T. (eds.).* Lecture Notes in Mathematics 615, Springer: Berlin (1977) 114.

2.37. *Mandelbrot B. B.* The Fractal Geometry of Nature, Freeman: San Fransisco (1982); *Grassberger P.* On the Hausdorff dimension of fractal attractors, J. Stat. Phys. **19** (1981) 25; *Lichtenberg A. J., Liebermann M. A.* Regular and Stochastic Motions (см. примеч. 23).

2.38. *Collet P., Eckmann J. P.* Iterated Maps of the Interval as Dynamical Systems, Birkhäuser: Boston (1980) (см. рис. 2.22–24).

2.39. *Großmann S., Thomae E.* Invariant distributions and stationary correlation functions of one-dimensional discrete processes, Z. Naturforsch. **32 A** (1977) 353; *Feigenbaum M. J.* Quantitative universality for a class of nonlinear transformations, J. Stat. Phys. **19** (1978) 25.

2.40. *Mainzer K.* Symmetrien der Natur (см. примеч. 1).

2.41. Ср.: *Nicolis G., Prigogine I.* Die Erforschung des Komplexen (см. примеч. 3 гл. 1) 205.

2.42. Ср.: *Prigogine I.* From Being to Becoming – Time and Complexity in Physical Sciences, Freemann: San Fransisco (1980) (рус. пер.: *Пригожин И.* От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках. 3-е изд. М.: КомКнига/URSS, 2006. 296 с.); Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes, Wiley: New York (1961) (рус. пер.: *Пригожин И.* Введение в термодинамику необратимых процессов. Ижевск: Издательство РХД, 2001).

2.43. Рис. 2.26 из: *Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M.* The Feynman Lectures of Physics. Vol. II., Addison-Wesley (1965) (рус. пер.: Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 1: Современная наука о природе. Законы механики. Т.2: Пространство. Время. Движение. М.: URSS, 2007).

2.44. *Haken H.* Synergetics (см. примеч. 4, Chapter 1) 5.

2.45. *Haken H.* Synergetics (см. примеч. 4, гл. 1) 202; *Haken H.* Advanced Synergetics. Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices. Springer: Berlin (1983) 187; *Weinberg S.* Gravitation and Cosmology. Principles and Applications of the General Theory of Relativity. Wiley: New York (1972).

2.46. Ср.: *Mainzer K.* Symmetrien der Natur (см. примеч. 1) Chapter 4.

2.47. *Curie P.* Sur la Symétrie dans les Phénomenes Physiques, Journal de Physique **3** (1894) 3.

2.48. *Audretsch J., Mainzer K. (eds.).* Vom Anfang der Welt. C. H. Beck: München (^{2}1990); *Mainzer K.* Symmetrien der Natur (см. примеч. 1) 515; *Fritzsch H.* Vom Urknall zum Zerfall. Die Welt zwischen Anfang und Ende. Piper: München (1983) 278.

2.49. *Hawking S.* A Brief History of Time. From the Big Bang to Black Holes. Bantam Press: London (1988) (рус. пер.: *Хокинг С.* Краткая история времени: От большого взрыва до черных дыр. СПб.: Амфора, 2001); *Hoyle F., Burbridge G., Narlikar J. V.* A quasi-steady state cosmological model with creation of matter. Astrophys. Journal **410** (1993) 437–457.

2.50. *Hartle J. B., Hawking S. W.* Wave function in the universe. Physical Review D 28 (1983) 2960–2975; *Mainzer K.* Hawking. Herder: Freiburg (2000).

2.51. *Audretsch J., Mainzer K. (eds.).* Vom Anfang der Welt (см. примеч. 48) 165.

2.52. *Greene B.* The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory. W. W. Norton & Co: New York (1999) (рус. пер.: *Грин Б.* Элегантная Вселенная: Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. 4-е изд. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2008); *Hawking S. W.* The Universe in a Nutshell. Bantam Books: New York (2001); *Mainzer K.* The Little Book of Time. Copernicus Books: New York (2002).

2.53. *Whitesides G. M., Mathias J. P., Seto C. T.* Molecular self-assembly and nanochemistry: A chemical strategy for the synthesis of nanostructures. Science **254** (1991) 1312–1319.

2.54. *Feynman R.* There's plenty of room at the bottom. Miniaturization 282 (1961) 295–296.

2.55. *Drexler K. E.* Nanotechnology summary. Encyclopedia Britannica Science and the Future Yearbook 162 (1990); ср. также: *Drexler K. E.* Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation. John Wiley & Sons: New York (1992).

2.56. *Whitesides G. M.* The once and future nanomachine. Scientific American 9 (2001) 78–83.

2.57. *Newkome G. R. (ed.).* Advances in Dendritic Macromolecules. JAI Press: Greenwich, Conn. (1994).

2.58. *Curl R. F., Smalley R. E.* Probing C_{60}. Science **242** (1988) 1017–1022; *Smalley R. W.* Great balls of carbon: The story of Buckminsterfullerene. The Sciences **31** (1991) 22–28.

2.59. *Müller A.* Supramolecular inorganic species: An expedition into a fascinating rather unknown land mesoscopia with interdisciplinary expectations and discoveries, J. Molecular Structure **325** (1994) 24; Angewandte Chemie (International Edition in English) **34** (1995) 2122–2124; *Müller A., Mainzer K.* From molecular systems to more complex ones. In: *Müller A., Dress A., Vögtle F. (eds.).* From Simplicity to Complexity in Chemistry – and Beyond. Vieweg: Wiesbaden (1995) 1–11.

2.60. Рис. 2.32 с рис. Брайана Кристи: Spektrum der Wissenschaft, Spezial 2 (2001) 22.

2.61. *Dry C. M.* Passive smart materials for sensing and actuation. Journal of Intelligent Materials Systems and Structures 4 (1993) 415.

2.62. *Amato I.* Animating the material world. Science **255** (1992) 284–286.

2.63. *Joy, B.* Why the future doesn't need us. Wired 4 (2000).

2.64. *Smalley R. E.* Of chemistry, love and nanobots. Scientific American 9 (2001) 76–77.

2.65. *Abarbanel H. D. I.* Analysis of Observed Data. Springer: New York (1996); *Kanz H., Schreiber T.* Nonlinear Time Series Analysis. Cambridge University Press: Cambridge (1997).

2.66. *Takens F.* Detecting strange attractors in turbulence. In: *Rand D. A., Young L. S. (eds.).* Dynamical Systems and Turbulence. Springer: Berlin (1981) 336–381.

2.67. *Kaplan D., Glass L.* Understanding Nonlinear Dynamics. Springer: New York (1995) 310 (рис. 6.20).

2.68. *Kaplan D., Glass L.* Understanding Nonlinear Dynamics (см. примеч. 67) 310 (рис. 6.21), 311 (рис. 6.22).

2.69. *Kaplan D., Glass L.* Understanding Nonlinear Dynamics (см. примеч. 67) 316 (рис. 6.26), 317 (рис. 6.28).

2.70. *Grassberger P., Procaccia I.* Characterization of strange attractors. Physical Review Letters 50 (1983) 346–349.

2.71. *Deco G., Schürmann, B.* Information Dynamics: Foundations and Applications. Springer: New York (2001) 17 (рис. 2.6).

2.72. *Chen G., Moiola J. L.* An overview of bifurcation, chaos and nonlinear dynamics in control systems. In: *Chua L. O. (ed.).* Journal of the Franklin Institute Engineering and Applied Mathematics: Philadelphia (1995) 838.

Глава 3

3.1. Исторические источники, разд. 3.1 ср.: *Mainzer K.* Die Philosophen und das Leben. In: *Fischer E. P., Mainzer K. (eds.).* Die Frage nach dem Leben. Piper: München (1990) 11–44.

3.2. Diels-Kranz (см. примеч. 2, Chapter 2) 12 A 30.

3.3. *Aristotle.* Historia animalium 588 b 4 (рус. пер.: *Аристотель.* История животных. М.: Изда. центр РГГУ, 1996).

3.4. *Aristotle.* De generatione animalium II 736 b 12–15. a 35–b2 (рус. пер.: *Аристотель.* О возникновении животных. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940).

3.5. *Descartes R.* Discours de la méthode. Leipzig (1919/20) 39 (рус. пер.: *Декарт Р.* Рассуждение о методе, чтобы верно направлять свой разум и отыскивать истину в науках // Декарт Р. Сочинения: В 2 т. Т.1. М., 1989. С. 250–296).

3.6. *Borelli G. A.* De motu animalium. Leipzig (1927) 1.

3.7. *Leibniz G. W.* Monadology § 64 (рус. пер.: Лейбниц Г. В. Монадология // Сочинения: В 4-х т. М.: Мысль, 1982).

3.8. *Bonnet C.* Contemplation de la nature (1764). Oeuvres VII, 45.

3.9. *Kant I.* Kritik der Urteilskraft. Ed. G. Lehmann, Reclam: Stuttgart (1971) 340 (рус. пер.: *Кант И.* Критика чистого разума. М.: Мысль, 1994).

3.10. *Goethe J. W.* Dichtung und Wahrheit. In: Werke (Hamburger Ausgabe) Bd. IX 490 (рус. пер.: *Гёте И. В.* Поэзия и правда. М.: Захаров, 2003).

3.11. *Schelling F. W. J.* Sämtliche Werke Bd. II (ed. *Schröter M.*), München (1927) 206.

3.12. *Darwin C.* On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life. London (1859) (рус. пер.: *Дарвин Ч.* Происхождение видов путем естественного отбора или сохранение благоприятных рас в борьбе за жизнь. М.: Наука, 1991); The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex. London (1871); *Spencer H.* Structure, Function and Evolution (ed. Andrenski S.), London (1971); о современном развитии учения Дарвина см.: *Richards R.* The Meaning of Evolution. University of Chicago Press: Chicago (1992).

3.13. *Boltzmann L.* Der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. In: *Boltzmann L. (ed.).* Populäre Schriften. Leipzig (1905) 24–46.

3.14. Ср.: *Schneider I.* Rudolph Clausius' Beitrag zur Einführung wahrscheinlichkeitstheoretischer Methoden in die Physik der Gase nach 1856. Archive for the History of Exact Sciences **14** (1974/75) 237–261.

3.15. *Prigogine I.* Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes (см. примеч. 43 гл. 2).

3.16. Ср.: *Boltzmann L.* Über die mechanische Bedeutung des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie (1866). In: *Boltzmann L.* Wissenschaftliche Abhandlungen (ed. Hasenöhrl F.). Vol. 1. Leipzig (1909), repr. New York (1968) 9–33; Analytischer Beweis des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie aus den Sätzen über das Gleichgewicht der lebendigen Kraft (1871) 288–308.

3.17. Ср. со знаменитой эйнштейновской статьей 'Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen'. Annalen der Physik **17** (1905) 549–560.

3.18. *Poincaré H.* Sur les tentatives d'explication méchanique des principes de la thermodynamique. Comptes rendus de l'Académie des Sciences **108** (1889) 550–553; *Zermelo E.* Über einen Satz der Dynamik und die mechanische Wärmetheorie. Annalen der Physik 57 (1896) 485.

3.19. Ср.: *Popper, K. R.* Irreversible processes in physical theory. Nature **181** (1958) 402–403; *Reichenbach H.* The Direction of Time. Berkeley (1956) (рус. пер.: *Рейхенбах Г.* Направление времени. М.: URSS, 2003); *Grünbaum A.* Philosophical Problems of Space and Time. Dordrecht (1973) (рус. пер.: *Грюнбаум А.* Философские проблемы пространства и времени. М.: URSS, 2003); *Hintikka J., Gruender D., Agazzi E. (eds.).* Probabilistic Thinking, Thermodynamics and the Interaction of the History and Philosophy of Science II. Dordrecht/Boston/London (1978).

3.20. *Boltzmann L.* Der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. In: *Boltzmann L.* Populäre Schriften (см. примеч. 13) 26–46.

3.21. *Boltzmann L.* Über die Frage nach der objektiven Existenz der Vorgänge in der unbelebten Natur. In: *Boltzmann L.* Populäre Schriften (см. примеч. 13) 94–119.

3.22. *Monod J.* Le Hasard et la Nécessité. Editions du Seuil: Paris (1970).

3.23. *Primas H.* Kann Chemie auf Physik reduziert werden? Chemie in unserer Zeit **19** (1985) 109–119, 160–166.

3.24. *Bergson H. L.* L'évolution créative. Paris (1907); *Heitler W. H.* Über die Komplementarität von lebloser und lebender Materie. Abhandlungen der Math.-Naturw. Klasse d. Ak. d. Wiss. u. Lit. *Mainz Nr.* **1** (1976) 3–21; *Driesch A.* Philosophie des Organischen. Leipzig (1909); *Whitehead A. N.* Process and Reality. An Essay in Cosmology. New York (1978).

3.25. *Schrödinger E.* Was ist Leben? Piper: München (1987) 133 (рус. пер.: *Шредингер Э.* Что такое жизнь? С точки зрения физика. М.: Атомиздат, 1972).

3.26. *Schrödinger E.* Was ist Leben? (см. примеч. 25) 147.

3.27. *Thompson W.* The Sorting Demon of Maxwell (1879). In: *Thompson W.* Physical Papers I–VI, Cambridge (1882–1911), V, 21–23.

3.28. *Prigogine I.* Time, irreversibility and structure. In: *Mehra J. (ed.).* The Physicist's Conception of Nature. D. Reidel: Dordrecht/Boston (1973) 589.

3.29. *Eigen M.* The origin of biological information. In: *Mehra J. (ed.).* The Physicist's Conception of Nature (см. примеч. 28) 607; рис. 3.2 показывает так называемый оболочечный ген, полученный действием нуклеазы на РНК фага MS2 (*Min Jou W., Haegemann G., Ysebaert M., Fiers, W.* Nature. **237** (1972) 82). Этот ген кодирует последовательность 129 аминокислот. Структура далее складывается в пространстве. Ср. также: *Perelson A. S., Kauffman S. A. (eds.).* Molecular Evolution on Ragged Landscapes: Proteins, RNA, and the Immune System. Santa Fé Institute Studies in the Sciences of Complexity, Proceedings. Vol. 9. Addison-Wesley: Redwood City (1990).

3.30. Обзор дан в: *Depew D. J., Weber B. H.* Evolution at a Crossroads. The New Biology and the New Philosophy of Science. MIT Press: Cambridge, MA (1985); *Ebeling W., Feistel R.* Physik der Selbstorganisation und Evolution. Akademie-Verlag: Berlin (1982);

Haken H., Haken-Krell M. Entstehung von biologischer Information und Ordnung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt (1989); *Hofbauer L.* Evolutionstheorie und dynamische Systeme. Mathematische Aspekte der Selektion. Springer: Berlin (1984).

3.31. *Eigen M.* Homunculus im Zeitalter der Biotechnologie — Physikochemische Grundlagen der Lebensvorgange. In: *Gross R. (ed.).* Geistige Grundlagen der Medizin. Springer: Berlin (1985) 26, 36 для рис. 3.4 *a–d*; *Maynard Smith J.* Optimization theory in evolution. Annual Review of Ecological Systems **9** (1978) 31–56; *Mainzer K.* Metaphysics of nature and mathematics in the philosophy of Leibniz. In: *Rescher N. (ed.).* Leibnizian Inquiries. University Press of America: Lanham/New York/London (1989) 105–130.

3.32. *Dyson F.* Origins of Life. Cambridge University Press: Cambridge (1985).

3.33. *Kauffman S.* Autocatalytic sets of proteins. Journal of Theoretical Biology **119** (1986) 1–24.

3.34. Обзор дан в: *Kauffmann A. S.* Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution. Oxford University Press: Oxford (1992).

3.35. *Haken H.* Synergetics (см. примеч. 4 гл. 1) 310 (рус. пер.: *Хакен Г.* Синергетика. М.: Мир, 1980).

3.36. *Hess, B., Mikhailov A.* Self-organization in living cells. In: Science **264** (1994) 223–224; Ber. Bunsenges. Phys. Chem. **98** (1994) 1198–1201 (расширенная версия).

3.37. *Susman M.* Growth and Development. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ (1964); *Prigogine I.* Order through fluctuation. In: *Jantsch E., Waddington C. H. (eds.).* Evolution and Consciousness. Human Systems in Transition. Addison-Wesley: London (1976) 108.

3.38. *Gerisch G., Hess, B.* Cyclic-AMP-controlled oscillations in suspended dictyostelium cells: Their relation to morphogenetic cell interactions. Proc. Natl. Acad. Sci. **71** (1974) 2118.

3.39. *Rosen R.* Dynamical System Theory in Biology. Wiley-Interscience: New York (1970); *Abraham R. H., Shaw C.D.* Dynamics — The Geometry of Behavior (см. примеч. 14 гл. 2) 110 для рис. 3.6.

3.40. *Meinhardt H., Gierer A.* Applications of a theory of biological pattern formation based on lateral inhibition. J. Cell. Sci. **15** (1974) 321 (рис. 3.7–8); *Meinhardt M.* Models of Biological Pattern Formation. Academic Press: London (1982).

3.41. Обзор дан в: *Gerok W. (ed.).* Ordnung und Chaos in der belebten und unbelebten Natur. Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte. 115. Versammlung (1988), Stuttgart (1989); *Mainzer K.* Chaos und Selbstorganisation als medizinische Paradigmen. In: *Deppert W., Kliemt H., Lohff B., Schaefer J. (eds.).* Wissenschaftstheorien in der Medizin. De Gruyter: Berlin/New York (1992) 225–258.

3.42. *Bassingthwaighte J. B., van Beek J. H. G. M.* Lightning and the heart: Fractal behavior in cardiac function. Proceedings of the IEEE **76** (1988) 696.

3.43. *Goldberger A. L., Bhargava V., West B. J.* Nonlinear dynamics of the heartbeat. Physica **17D** (1985) 207–214; Nonlinear dynamics in heart failure: Implications of long-wavelength cardiopulmonary oscillations. American Heart Journal **107** (1984) 612–615; *Ree Chay T., Rinzel J.* Bursting, beating, and chaos in an excitable membrance model. Biophysical Journal **47** (1985) 357–366; *Winfree, A. T.* When Time Breaks Down: The Three-Dimensional Dynamics of Electrochemical Waves and Cardiac Arrhythmias. Princeton (1987); *Guevara M. R., Glass L., Schrier A.* Phase locking, period-doubling bifurcations, and irregular dynamics in periodically stimulated cardiac cells. Science **214** (1981) 1350.

3.44. Ср.: *Johnson L.* The thermodynamic origin of ecosystems: a tale of broken symmetry. In: *Weber B. H., Depew D. J., Smith J. D. (eds.).* Entropy, Information, and Evolution. New Perspectives on Physical and Biological Evolution. MIT Press. Cambridge, MA (1988) 75–105; *Schneider E. D.* Thermodynamics, ecological succession, and natural selection: a common thread. In: *Weber B. H., Depew D. J., Smith J. D. (eds.).* Entropy, Information, and Evolution (см. примеч. 44) 107–138.

3.45. *Odum E. P.* The strategy of ecosystem development. Science **164** (1969) 262–270; *Margalef R.* Perspectives in Ecological Theory. University of Chicago Press: Chicago (1968).

3.46. *Lovelock J. E.* The Ages of Gaia. Bantam (1990); *Schneider S. H., Boston P. J. (eds.).* Scientists on Gaia. MIT Press: Cambridge, MA (1991); *Pimm S.* The Balance of Nature, University of Chicago Press: Chicago (1991).

3.47. Ср.: *Rosen R.* Dynamical System Theory in Biology (см. примеч. 37); *Freedmann H. I.* Deterministic Mathematical Models in Population Ecology. Decker: New York (1980); *Abraham R. H., Shaw C. D.* Dynamics – The Geometry of Behavior (см. примеч. 14 гл. 2) 85.

3.48. *Lotka A. J.* Elements of Mathematical Biology. Dover: New York (1925); *Volterra V.* Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie. Paris (1931); *Haken H.* Synergetics (см. примеч. 4 гл. 1) 130, 308.

3.49. *Rettenmeyer C. W.* Behavioral studies of army ants. Kansas Univ. Bull. **44** (1963) 281; *Prigogine I.* Order through Fluctuation: Self-Organization and Social System. In: *Jantsch E., Waddington C. H. (eds.).* Evolution and Consciousness (см. примеч. 37) 111.

3.50. *Prigogine I., Allen P. M.* The challenge of complexity. In: *Schieve W. C., Allen P. M.* Self-Organization and Dissipative Structures. Applications in the Physical and Social Sciences. University of Texas Press: Austin (1982) 28; *Wicken J. S.* Thermodynamics, evolution, and emergence: Ingredients of a new synthesis. In: *Weber B. H., Depew D. J., Smith J. D. (eds.).* Entropy, Information, and Evolution (см. примеч. 44) 139–169

Глава 4

4.1. Diels-Kranz. B 36.

4.2. Ср.: *Guthrie, W. K. C.* A History of Greek Philosophy. Vol. I: The Earlier Presocratics and the Pythagoreans. Cambridge University Press: Cambridge (1962) 349; *Popper K. R., Eccles J. C.* The Self and its Brain. Springer: Berlin (1977) 161.

4.3. *Aristotle.* De anima 403 b 31 (рус. пер.: *Аристотель.* О душе. М.: Мир книги, 2007).

4.4. *Платон.* Менон. Собр. соч. Т. 1. М.: Мысль, 1990.

4.5. Ср.: *Galen* Galen on Anatomical Procedures. Translation of the Surviving Books with Introduction and Notes. Oxford University Press: London (1956).

4.6. *Wickens G. M.* Avicenna. Scientist and Philosopher. A Millenary Symposium: London (1952).

4.7. *Descartes R.* Meditations (1641). Eds. E. Haldane, G. Ross. Cambridge University Press: Cambridge (1968) 153.

4.8. *Descartes R.* Treatise on Man (1664). Harvard University Press: Cambridge, Mass. (1972).

4.9. *Spinoza B.* Ethics (рус. пер.: *Спиноза Б.* Этика. М.: Азбука, 2001).

4.10. *Leibniz G. W.* Monadology; *Rescher N.* Leibniz: An Introduction to his Philosophy. Basil Blackwell: Oxford (1979).

4.11. *Hume D.* A Treatise of Human Nature (1739). Penguin: Harmondsworth (1969) 82 (рус. пер.: *Юм Д.* Трактат о человеческой природе. М.: Директмедиа Паблишинг, 2006).

4.12. *Mainzer K.* Kants Begründung der Mathematik und die Entwicklung von Gauß bis Hilbert. In: Akten des V. Intern. Kant-Kongresses in Mainz 1981 (ed. Funke G). Bouvier: Bonn (1981) 120–129.

4.13. *Brazier M. A. B.* A History of Neurophysiology in the 17th and 18th Centuries. Raven: New York (1984); ср.: *Clarke, E. O'Malley, C. D.* The Human Brain and Spinal Cord: A Historical Study illustrated by Writings from Antiquity to the Twentieth Century. University of California Press: Berkeley (1968).

4.14. *Helmholtz H. v.* Schriften zur Erkenntnistheorie (eds. Hertz P., Schlick M.). Berlin (1921); *Mainzer K.* Geschichte der Geometrie (см. примеч. 13 гл. 2) 172.

4.15. *Müller J.* Handbuch der Physiologie des Menschen. Koblenz (1835).

4.16. *Helmholtz H., u* Vorläufiger Bericht über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Nervenreizung. Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medizin (1850) 71–73.

4.17. *James W.* Psychology (Briefer Course). Holt: New York (1890) 3.

4.18. *James W.* Psychology (см. примеч. 17) 254.

4.19. *James W.* Psychology (см. примеч. 17) рис. 57.

4.20. Ср.: *Baron R. J.* The Cerebral Computer. An Introduction to the Computa tional Structure of the Human Brain. Lawrence Erlbaum: Hillsdale N. J. (1987); *Braitenberg V.* Gehirngespinste. Neuroanatomie für kybernetisch Interessierte. Springer: Berlin (1973).

4.21. *Churchland P. S., Sejnowski T. J.* Perspectives in cognitive neuroscience. Science **242** (1988) 741–745. Подмножество зрительной коры адаптировано из: *Van Essen D., Maunsell J. H. R.* Two-dimensional maps of the cerebral cortex. Journal of Comparative Neurology **191** (1980) 255–281. Сетевая модель ганглиозных клеток дана в: *Hubel D. H., Wiesel T. N.* Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. Journal of Physiology **160** (1962) 106–154. Пример химического синапса показан в: *Kand E. R., Schwartz J.* Principles of Neural Science. Elsevier: New York (1985).

4.22. Ср.: *Churchland P. M.* A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science. MIT Press: Cambridge, Mass./London (1989) 99.

4.23. *Pellionisz A. J.* Vistas from tensor network theory: A horizon from reductionalist neurophilosophy to the geometry of multi-unit recordings. In: *Cotterill R. M. J. (ed.).* Computer Simulation in Brain Science. Cambridge University Press: Cambridge/New York/Sydney (1988) 44–73; *Churchland P. M.* A Neurocomputational Perspective (см. примеч. 22) 83, 89.

4.24. Ср.: *Schwartz E. L. (ed.).* Computational Neuroscience. MIT Press: Cambridge, Mass. (1990).

4.25. Ср. *Churchland, P. S., Sejnowski T. J.* The Computational Brain. MIT Press: Cambridge, Mass. (1992) 169.

4.26. *Hebb D. O.* The Organization of Behavior. Wiley: New York (1949) 50.

4.27. *Kohonen T.* Self-Organization and Associative Memory. Springer: Berlin (1989) 105; *Churchland P. S., Sejnowski T. J.* The Computational Brain (см. примеч. 25) 54; *Ritter H., Martinetz T., Schulten K.* Neuronale Netze. Eine Einführung in die Neuroinformatik selbstorganisierender Netzwerke. Addison-Wesley: Reading, Mass. (1991) 35.

4.28. *Hopfield J. J.* Neural Network and physical systems with emergent collective computational abilities. Proceedings of the National Academy of Sciences **79** (1982) 2554–2558.

4.29. *Hertz J., Krogh A., Palmer R. G.* Introduction to the Theory of Neural Computation. Addison-Wesley: Redwood City (1991).

4.30. *Serra R., Zanarini G.* Complex Systems and Cognitive Processes. Springer: Berlin (1990) 78.

4.31. *Hertz J., Krogh A., Palmer R. G.* Introduction to the Theory of Neural Computation (см. примеч. 29); *Hopfield J. J., Tank D. W. Computing with neural circuits:* A model. Science **233** (1986) 625–633.

4.32. *Ackley D. H., Hinton G. E., Sejnowski T. J.* A learning algorithm for Boltzmann machines. Cognitive Science **9** (1985) 147–169.

4.33. Математическая разработка обучающего алгоритма для Больцмановской машины дана в: *Serra R., Zanarini G.* Complex Systems and Cognitive Processes (см. примеч. 30) 137. Иллюстрация показана в: *Churchland P. S., Sejnowski T. J.* The Computational Brain (см. примеч. 25) 101.

4.34. *Rumelhart D. E., Zipser D.* Feature discovery by competitive learning. In: *McClelland J. L., Rumelhart D. E. (eds.).* Parallel Distributed Processing. MIT Press: Cambridge, Mass. (1986).

4.35. *Kohonen T.* Self-Organization and Associative Memory (см. примеч. 27) 123.

4.36. *Kohonen T.* Self-Organization and Associative Memory (см. примеч. 27) 125.

4.37. *Ritter H., Martinetz T., Schulten K.* Neuronale Netze (см. примеч. 27) 75.

4.38. *Suga N., O'Neill W. E.* Neural axis representing target range in the auditory cortex of the mustache Bat. Science **206** (1979) 351–353; *Ritter H., Martinetz T., Schulten K.* Neuronale Netze (см. примеч. 27) 88.

4.39. *Widrow B., Hoff M. E.* Adaptive switching circuits. 1960 IRE WESCON Convention Record. IRE: New York (1960) 36–104.

4.40. Ср.: *Churchland P. S., Sejnowski T. J.* The Computational Brain (см. примеч. 25) 106.

4.41. *Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J.* Learning representations by backpropagating errors. Nature **323** (1986) 533–536; *Arbib M. A.* Brains, Machines, and Mathematics. Springer: New York (1987) 117.

4.42. *Köhler W.* Die physischen Gestalten in Ruhe und im stationären Zustand. Vieweg: Braunschweig (1920); Jahresberichte für die ges. Physiol. und exp. Pharmakol. **3** (1925) 512–539; *Stadler M., Kruse P.* The self-organization perspective in cognitive research: Historical remarks and new experimental approaches. In: *Haken H., Stadler M. (eds.).* Synergetics of Cognition. Springer: Berlin (1990) 33.

4.43. Ср.: *Churchland P. M.* A Neurocomputational Perspective (см. примеч. 22) 209.

4.44. Ср.: *Churchland P. M.* A Neurocomputational Perspective (см. примеч. 22) 211.

4.45. Ср.: *Feigl H., Scriven M., Maxwell G. (eds.).* Concepts, Theories and the Mind-Body Problem. University of Minnesota Press: Minneapolis (1958); *Marcel A. J., Bisiach E. (eds.).* Consciousness in Contemporary Science. Clarendon Press: Oxford (1988); *Bieri P.* Pain: A case study for the mind-body problem. Acta Neurochirurgica **38** (1987) 157–164; *Lycan W. G.* Consciousness. MIT Press: Cambridge, Mass. (1987).

4.46. *Flohr H.* Brain processes and phenomenal consciousness. A new and specific hypothesis. Theory & Psychology **1**(2) (1991) 248.

4.47. *Malsburg C. von der* Self-organization of orientation sensitive cells in the striate cortex. Kybernetik **14** (1973) 85–100; *Wilshaw D. J., von der Malsburg C.* How patterned neural connections can be set up by self-organization. Proceedings of the Royal Society Series B **194** (1976) 431-45.

4.48. *Barlow H. B.* Single units and sensatioperceptual psychology. Perception 1 (1972) 371.

4.49. *Singer W.* The role of synchrony in neocortical processing and synaptic plasticity. In: *Domany E., Van Hemmen L., Schulten K. (eds.).* Model of Neural Networks II. Springer: Berlin (1994).

4.50. *Deco G., Schurmann B.* Information Dynamics: Foundations and Applications (см. примеч. 2.71) 229 (рис. 10.1).

4.51. Ср.: *Poppel E. (ed.).* Gehirn und Bewußtsein. VCH Verlagsgesellschaft: Weinheim (1989); *Singer W. (ed.).* Gehirn und Kognition. Spektrum der Wissenschaft: Heidelberg (1990).

4.52. *Haken H., Stadler M. (eds.).* Synergetics of Cognition (см. примеч. 42) 206.

4.53. *Haken H., Stadler M. (eds.).* Synergetics of Cognition (см. примеч. 42) 204.

4.54. *Pöppel E.* Die neurophysiologische Definition des Zustands «bewußt». In: *Pöppel E. (ed.).* Gehirn und Bewußtsein (см. примеч. 51) 18.

4.55. *Searle J. R.* Intentionality. An Essay in the Philosophy of Mind. Cambridge University Press: Cambridge (1983); *Dennett D.* The Intentional Stance, MIT Press: Cambridge, Mass. (1987).

4.56. *Shaw R. E., Kinsella-Shaw J. M.* Ecological mechanics: A physical geometry for intentional constraints. Hum. Mov. Sci. 7 (1988) 155.

4.57. Рис. 4.23 *a–d*, 4.23: *Kugler P. N., Shaw R. E.* Symmetry and symmetry breaking in thermodynamic and epistemic engines: A coupling of first and second laws. In: *Haken H., Stadler M. (eds.).* Synergetics of Cognition (см. примеч. 42) 317, 318, 319,328.

4.58. *Kelso J. A. S., Mandell A. J., Shlesinger M. F. (eds.).* Dynamic Patterns in Complex Systems. World Scientific: Singapore (1988); рис. 4.24 *a–b*, 4.25 ср.: *Haken H., Haken-Krell M.* Erfolgsgeheimnisse der Wahrnehmung. Deutsche Verlags-Anstalt: Stuttgart (1992) 36, 38.

4.59. *Kelso J. A. S.* Phase transitions: Foundations of behavior. In: *Haken H., Stadler M. (eds.).* Synergetics of Cognition (см. примеч. 42) 260.

4.60. *Searle J. R.* Mind, brains and programs. Behavioral and Brain Science **3** (1980) 417–424; Intrinsic intentionality. Behavioral and Brain Science **3** (1980) 450–456; Analytic philosophy and mental phenomena. Midwest Studies in Philosophy **5** (1980) 405 23. Для критики концепции Сёрла ср.: *Putnam H.* Representation and Reality. MIT Press: Cambridge, Mass. (1988) 26.

4.61. *Eccles J. C.* The Neurophysiological Basis of Mind. Clarendon Press: Oxford (1953); Facing Reality. Springer: New York (1970); *Eccles J. C. (ed.).* Mind and Brain, Paragon: Washington. D. C. (1982).

4.62. *Palm G.* Assoziatives Gedächtnis und Gehirn. In: *Singer W. (ed.).* Gehirn und Kognition (см. примеч. 51) 172; *Palm G. (ed.).* Neural Assemblies: An Alternative Approach to Artificial Intelligence. Springer: Berlin (1984)

Глава 5

5.1. Ср. эту главу с *Mainzer K.* Computer – Neue Flügel des Geistes? De Gruyter: Berlin/New York (1993); *Mainzer K.* Die Evolution intelligenter Systeme. Zeitschrift für Semiotik **12** (1990) 81–104.

5.2. *Feigenbaum E. A., McCorduck P.* The Fifth Generation. Artificial Intelligence and Japan's Computer Challenge to the World. Michael Joseph: London (1984).

5.3. Ср.: *Williams M. R.* A History of Computing Technology. Prentice-Hall: Englewood Cliffs (1985).

5.4. *Cohors-Fresenborg E.* Mathematik mit Kalkülen und Maschinen. Vieweg: Braunschweig (1977) 7.

5.5. Herrn von Leibniz' Rechnung mit Null und Eins. Siemens AG: Berlin (1966); *Mackensen L. von* Leibniz als Ahnherr der Kybernetik – ein bisher unbekannter Leibnizscher Vorschlag einer «Machina arithmetica dyadicae». In: Akten des II. Internationalen Leibniz-Kongresses 1972 Bd. 2. Steiner: Wiesbaden (1974) 255–268.

5.6. *Scholz H.* Mathesis Universalis. Schwabe: Basel (1961).

5.7. *Babbage C.* Passages from the Life of a Philosopher. Longman and Co.: London (1864); *Bromley A. G.* Charles Babbage's Analytical Engine 1838. Annals of the History of Computing **4** (1982) 196–219.

5.8. Ср.: *Minsky M.* Recursive unsolvability of Post's problem of «tag» and other topics in the theory of Turing machines. Annals of Math. **74** 437–454; *Sheperdson J. C., Sturgis H. E.* Computability of recursive functions. J. Assoc. Comp. Mach. **10** (1963) 217–255. Последующее описание регистровой машины ср.: *Rödding D.* Klassen rekursiver Funktionen. In: *Löb M. H. (ed.).* Proceedings of the Summer School in Logic. Springer: Berlin (1968) 159–222; *Cohors-Fresenborg E.* Mathematik mit Kalkülen und Maschinen (см. примеч. 4).

5.9. *Turing A. M.* On computable numbers, with an application to the «Entscheidungsproblem». Proc. London Math. Soc, Ser. **2 42** (1936) 230–265; *Post E. L.* Finite combinatory processes – Formulation I. Symbolic Logic I (1936) 103–105; *Davis M.* Computability & Unsolvability. McGraw-Hill: New York (1958) 3.

5.10. *Arbib M. A.* Brains, Machines, and Mathematics. Springer: New York (1987) 131.

5.11. *Mainzer K.* Der Konstruktionsbegriff in der Mathematik. Philosophia Naturalis **12** (1970) 367 12.

5.12. Ср.: *Knuth D. M.* The Art of Computer Programming. Vol. 2. Addison-Wesley: Reading, MA (1981) (рус. пер.: *Кнут Д.* Искусство программирования. М.: Вильямс, 2005); *Börger E.* Berechenbarkeit, Komplexität, Logik. Vieweg: Braunschweig (1985).

5.13. *Grötschel M., Lovász L., Schryver A.* Geometric Algorithms and Combinato rial Optimization. Springer: Berlin (1988).

5.14. *Gardner A.* Penrose Tiles to Trapdoor Ciphers. W. H. Freeman: New York (1989).

5.15. Ср.: *Arbib M. A.* Speed-up theorems and incompleteness theorem. In: *Caianiello E. R. (ed.).* Automata Theory. Academic Press (1966) 6–24; *Mostowski A.* Sentences Undecidable in Formalized Arithmetic. North-Holland: Amsterdam (1957); *Beth E. W.* The Foundations of Mathematics. North-Holland: Amsterdam (1959); *Kleene S. C.* Introduction to Metamathematics. North-Holland: Amsterdam (1967).

5.16. *Gödel K.* On formally undecidable propositions of Principia Mathematica and related systems I. Monatshefte für Mathematik und Physik 38 (1931) 173–198.

5.17. *Turing A.* On computable numbers, with an application to the entscheidungsproblem. London Mathematical Society Series 2 42 (1936–1937) 230–265; Уточнение. Ibid. 43 (1937) 544–546; ср.: *Chaitin G. J.* The Limits of Mathematics: A Course on Information Theory and the Limits of Formal Reasoning. Springer: New York (1998).

5.18. *Chaitin G. J.* On the length of programs for computing finite binary sequences. Journal of the ACM 13 (1966) 547–569; On the length of programs for computing finite binary sequences: statistical considerations. Journal of the ACM 16 (1969) 145–159.

5.19. *Chaitin G. J.* The Limits of Mathematics: A Course on Information Theory and the Limits of Formal Reasoning (см. примеч. 17) 60.

5.20. *Shannon C. E., Weaver W.* The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press: Chicago (1949); ср. также: *Cover T., Thomas J.* Elements of Information Theory. John Wiley & Sons: New York (1991).

5.21. *Bennett C. H.* Quantum Information and Computation. Physics Today 10 (1995).

5.22. *Deco G., Schlittenkopf C., Schürmann B.* Determining the information flow of dynamical systems from continuous probability distributions. Physical Review Letters 78 (1997) 2345.

5.23. *Deco G., Schürmann B.* Information Dynamics: Foundations and Applications (см. примеч. 2.71) 111 (рис. 5.2).

5.24. *Mainzer K.* Rationale Heuristik und Problem Solving. In: *Burrichter C., Inhetveen R., Kötter R. (eds.).* Technische Rationalität und rationale Heuristik. Schöningh: Paderborn (1986) 83–97.

5.25. *Mainzer K.* Knowledge-based systems. Remarks on the philosophy of technology and Artificial Intelligence. Journal for General Philosophy of Science **21** (1990) 47–74.

5.26. *Bibel W., Siekmann J.* Künstliche Intelligenz. Springer: Berlin (1982); *Nilson N. J.* Principles of Artificial Intelligence. Springer: Berlin (1982); *Kredel L.* Künstliche Intelligenz und Expertensysteme. Droemer Knaur: München (1988).

5.27. *Puppe F.* Expertensysteme. Informatik-Spektrum **9** (1986) 1–13.

5.28. К примеру, одна из версий моделей DENDRAL и MYCIN представлена в диссертации «Научные открытия», выполненной под руководством Джеральда Массея (сегодня Центр философии науки, Питтсбург). Также см.: *Glymour C.* AI is philosophy. In: *Fetzer J. H. (ed.).* Aspects in Artificial Intelligence. Kluwer Academic Publisher: Boston (1988) 195–207.

5.29. *Buchanan B. G., Sutherland G. L., Feigenbaum E. A.* Heuristic DENDRAL: A program for generating processes in organic chemistry. In: *Meltzer B., Michie D. (eds.).* Machine Intelligence **4**. Edinburgh (1969); *Buchanan B. G., Feigenbaum E. A.* DENDRAL and META-DENDRAL: Their applications dimension. In: Artificial Intelligence **11** (1978) 5–24.

5.30. *McCarthy J.* LISP Programmer's Manual (Rep. MIT Press). Cambridge, MA (1962); *Stoyan H., Goerz G.* LISP – Eine Einführung in die Programmierung. Springer: Berlin (1984).

5.31. *Randall D., Buchanan B. G., Shortliffe E. H.* Production rules as a representation for a knowledge-based consultation program. Artificial Intelligence **8** (1977); *Shortliffe E. H.* MYCIN: A rule-based computer program for advising physicians regarding antimicrobial therapy selection. AI Laboratory, Memo 251, STANCS-74-465, Stanford University; *Winston P. H.* Artificial Intelligence. Addison-Wesley: Reading, MA (1977) Chap. 9.

5.32. *Doyle I.* A truth maintenance system. Artificial Intelligence **12** (1979) 231–272.

5.33. *Lenat D. B., Harris G.* Designing a rule system that searches for scientific discoveries. In: *Waterman D. A., Hayes-Roth F. (eds.).* Pattern Directed Inference Systems. New York (1978) 26; *Lenat D. B.* AM: Discovery in mathematics as heuristic search. In: *Davis R., Lenat D. B. (eds.).* Knowledge-Based Systems in Artificial Intelligence. New York (1982) 1–225.

5.34. *Langley P.* Data-driven discovery on physical laws. Cognitive Science **5** (1981) 31–54.

5.35. *Langley P., Simon H. A., Bradshaw G. L., Zytkow J. M.* Scientific Discovery: Computational Explorations of the Creative Processes. Cambridge, MA (1987).

5.36. *Kulkarni D., Simon H. A.* The process of scientific discovery: The strategy of experimentation. Cognitive Science **12** (1988) 139–175.

5.37. Ср.: *Winston P. H.* Artificial Intelligence (см. примеч. 31).

5.38. *Audretsch J., Mainzer K. (eds.).* Wieviele Leben hat Schrödingers Katze? B. I. Wissenschaftsverlag: Mannheim (1990) 273 (рис. 5.16 *a*), 274 (рис. 5.16 *b*), 276 (рис. 5.16 *c*).

5.39. *Penrose R.* Newton, quantum theory and reality. In: *Hawking S. W., Israel W.* 300 Years of Gravity. Cambridge University Press: Cambridge (1987).

5.40. *Deutsch D.* Quantum theory, the Church–Turing principle and the universal quantum computer. Proc. Roy. Soc. **A400** (1985) 97–117.

5.41. For this chapter compare *Mainzer K.* Computer – Neue Flügel des Geistes? De Gruyter: Berlin (1993); *Mainzer K.* Philosophical concepts of computational neuroscience. In: *Eckmiller R., Hartmann G., Hauske G. (eds.).* Parallel Processing in Neural Systems and Computers. North-Holland: Amsterdam (1990) 9–12.

5.42. *McCullock W. S., Pitts W.* A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. In: Bulletin of Mathematical Biophysics **5** (1943) 115–133; *Arbib M. A.* Brains, Machines and Mathematics (см. примеч. 10) 18.

5.43. *Neumann J. von* The Computer and the Brain. Yale University Press: New Haven (1958).

5.44. Ср.: *Burks A. W. (ed.).* Essays on Cellular Automata. University of Illinois Press (1970); *Myhill J.* The abstract theory of self-reproduction. In: *Mesarovic M. D. (ed.).* Views on General Systems Theory. John Wiley (1964) 106–118.

5.45. *Wolfram S.* Universality and complexity in cellular automata. In: *Farmer D., Toffoli T., Wolfram S. (eds.).* Cellular Automata. Proceedings of an Interdisciplinary Workshop. North-Holland: Amsterdam (1984) 1–35; *Wolfram S.* The ory and Applications of Cellular Automata. World Scientific: Singapore (1986); *Demongeot J., Golés E., Tchuente M. (eds.).* Dynamical Systems and Cellular Automata. Academic Press: London (1985); *Poundstone W.* The Recursive Universe. Cosmic Complexity and the Limits of Scientific Knowledge. Oxford University Press: Oxford (1985).

5.46. *Mainzer K.* Komplexität in der Natur. In: Nova Acta Leopoldina NF 76 Nr. 303 (1997) 165–189.

5.47. *Wolfram S.* A New Kind of Science. Wolfram Media, Inc.: Champaign, Ill. (2002) 443.

5.48. *Wolfram S.* A New Kind of Science (см. примеч. 47) 737.

Глава 6

6.1. *Rosenblatt F.* The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psychological Review **65** (1958) 386–408.

6.2. *Minsky M., Papert S. A.* Perceptrons. MIT Press: Cambridge MA (1969) (expanded edition 1988) (рус. пер.: *Минский М., Пейперт С.* Персептроны. М.: Мир, 1971).

6.3. *Gorman R. P., Sejnowski T. J.* Analysis of hidden units in a layered network trained to classify sonar targets. Neural Networks **1** (1988) 75–89; *Churchland P. M.* A Neurocomputational Perspective. The Nature of Mind and the Structure of Science. MIT Press: Cambridge MA (1989).

6.4. *Sejnowski T. J., Rosenberg C. R.* NETtalk: A parallel network that learns to read aloud. The Johns Hopkins University Electrical Engineering and Computer Science Technical Report IHU/EECS-86/01 (1986) 32; ср.: *Kinzel W. Deker U.* Der ganz andere Computer: Denken nach Menschenart. Bild der Wissenschaft **1** (1988) 43.

6.5. *Schöneburg E., Hansen N., Gawelczyk* Neuronale Netzwerke. Markt & Technik: München (1990) 176, 177.

6.6. *Rumelhart D. E., Smolensky P., McClelland J. L., Hinton G. E.* Schemata and sequential thought processes. In: *McClelland J. L., Rumelhart D. E. (eds.).* Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 2: Applications. MIT Press: Cambridge MA (1986); *Churchland P. S.* Neurophilosophy. Toward a Unified Science of the Mind-Brain. MIT Press: Cambridge MA (1988) 465.

6.7. *Haken H. (ed.).* Neural and Synergetic Computers. Springer: Berlin (1988) 5–7.

6.8. *Haken H.* Synergetics as a tool for the conceptualization and mathematization of cognition and behaviour — How far can we go? In: *Haken H., Stadler M. (eds.).* Synergetics of Cognition. Springer: Berlin (1990) 23–24.

6.9. *Chua L. O.* CNN: A Paradigm for Complexity. World Scientific: Singapore (1998); *Huertas J. L., Chen W. K., Madan R. N. (eds.).* Visions of Nonlinear Science in the 21st Century. Festschrift Dedicated to Leon O. Chua on the Occasion of his 60th Birthday. World Scientific: Singapore (1999); *Mainzer K.* CNN and the evolution of complex information systems in nature and society. In: *Tetzlaff R. (ed.).* Cellular Neural Networks and their Applications. Proc. 7th IEEE International CNN Workshop. World Scientific: Singapore (2002) 483–497.

6.10. *Chua L. O., Yang L.* Cellular neural networks: Theory. IEEE Transactions on Circuits and Systems 35 (1988) 1257–1272; Cellular neural networks: applications. IEEE Transactions on Circuits and Systems 35 (1988) 1273–1290.

6.11. *Chua L. O., Gulak G., Pierzchala E., Rodriguez-Vázquez (eds.).* Cellular neural networks and analog VLSI. Analog Integrated Circuits and Signal Processing: An International Journal 15 No 3. (1998).

6.12. *Chua L. O., Roska T.* Cellular Neural Networks and Visual Computing: Foundations and Applications. Cambridge University Press: Cambridge (2002) 7 (рис. 2.1), 8 (рис. 2.2); ср. также: *Mainzer K.* Cellular neural networks and visual computing: foundations and applications according to the book of *Leon O. Chua* and *Tamas Roska.* International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering 13 (2003).

6.13. *Chua L. O., Roska T.* Cellular Neural Networks and Visual Computing (см. примеч. 12) 36 (рис. 3.1).

6.14. *Chua L. O.* CNN: A Paradigm for Complexity (см. примеч. 9) 48 (рис. 2.6.1).

6.15. *Chua L. O., Roska T.* Cellular Neural Networks and Visual Computing (см. примеч. 12) 119–120 (Пример 5.1).

6.16. *Chua L. O., Roska T.* Cellular Neural Networks and Visual Computing (см. примеч. 12) 121 (Пример 5.2).

6.17. *Chua L. O., Roska T.* Cellular Neural Networks and Visual Computing (см. примеч. 12) 206 (рис. 8.1).

6.18. *Chua L. O., Roska T.* Cellular Neural Networks and Visual Computing (см. примеч. 12) 207 (Пример 8.1).

6.19. *Chua L. O., Roska T.* Cellular Neural Networks and Visual Computing (см. примеч. 12) 211 (Пример 8.2), 213 (Пример 8.4).

6.20. *Chua L. O., Roska T.* Cellular Neural Networks and Visual Computing (см. примеч. 12) 289 (рис. 12.9).

6.21. *Chua L. O., Roska T.* Cellular Neural Networks and Visual Computing (см. примеч. 12) 243 (рис. 9.2).

6.22. *Chua L. O., Roska T.* Cellular Neural Networks and Visual Computing (см. примеч. 12) 254 (рис. 9.13).

6.23. *Chua L. O.* CNN: A Paradigm for Complexity (см. примеч. 9) 159 (рис. 52).

6.24. *Chua L. O., Yoon S., Dogaru R.* A nonlinear dynamics perspective of Wolfram's new kind of science. Part I: Threshold of complexity. International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering 12 (2002) рис. 2.

6.25. *Chua L. O., Yoon S., Dogaru R.* A nonlinear dynamics perspective of Wolfram's new kind of science (см. примеч. 24) рис. 9, рис. 12, рис. 14.

6.26. *Chua L. O., Yoon S., Dogaru R.* A nonlinear dynamics perspective of Wolfram's new kind of science (см. примеч. 24) Table 2.

6.27. *Chua L. O., Yoon S., Dogaru R.* A nonlinear dynamics perspective of Wolfram's new kind of science (см. примеч. 24) рис. 3.

6.28. *Chua L. O., Yoon S., Dogaru R.* A nonlinear dynamics perspective of Wolfram's new kind of science (см. примеч. 24) рис. 22, рис. 24.

6.29. Главу 6.4 ср.: *Mainzer K.* Philosophical foundations of neurobionics. In: *Bothe H. W., Samii M., Eckmiller R. (eds.).* Neurobionics. An Interdisciplinary Approach to Substitute Impaired Functions of the Human Nervous System. North-Holland: Amsterdam (1993) 31 47.

6.30. Ср.: *Samii M. (ed.).* Peripheral Nerve Lesions. Springer: Berlin (1990).

6.31. *Eckmiller R. (ed.).* Neurotechnologie-Report. Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie: Bonn (1995); *Stein R. B., Peckham P. H. (eds.).* Neuroprostheses: Replacing Motor Function After Disease or Dis ability. Oxford University Press: New York (1991).

6.32. *Cosman E. R.* Computer-assisted technologies for neurosurgical procedures. In: *Bothe H. W., Samii M., Eckmiller R. (eds.).* Neurobionics (см. примеч. 29) 365.

6.33. *Chua L. O.* CNN: A Paradigm for Complexity (см. примеч. 9) 227 (рис. 86).

6.34. *Chua L. O., Roska, T.* Cellular Neural Networks and Visual Computing (см. примеч. 12) 321 (рис. 16.1).

6.35. *Elger C. E., Mormann F., Kreuz T., Andrzejak R. G., Rieke C., Sowa R., Florin S., David P., Lehnertz K.* Characterizing the spatio-temporal dynamics of the epileptogenic process with nonlinear EEG analyses. In: *Tetzlaff R. (ed.).* Cellular Neural Networks and Their Applications. Proc. 7th IEEE International CNN Workshop. World Scientific: Singapore (2002) 238.

6.36. *Foley J. D., Dam A. van.* Fundamentals of Interactive Computer Graphics. Addison-Wesley: Amsterdam (1982); *Foley J. D.* Neuartige Schnittstellen zwischen Mensch und Computer. Spektrum des Wissenschaft **12** (1987).

6.37. *Gibson W.* Neuromancer. Grafton: London (1986) 67.

6.38. *Putnam H.* Reason, Truth and History. Cambridge University Press: Cambridge (1981) 6.

6.39. *Langton C. G. (ed.).* Artificial Life, Addison Wesley: Redwood City (1989).

6.40. *Lindenmayer A., Rozenberg G. (eds.).* Automata, Languages, Development. North-Holland: Amsterdam (1976); *Lindenmayer A.* Models for multicellular development: Characterization, inference and complexity of L-systems. In: *Kelemenová A., Kelemen J. (eds.).* Trends, Techniques and Problems in Theoretical Computer Science, Springer: Berlin (1987) 138–168.

6.41. *Langton C. G.* Self-reproduction in cellular automata. Physica **D 10** (1984) 135–144; Artificial Life. In: Langton [5.53] Вклейки 1–8.

6.42. *Langton C. G.* Life at the edge of chaos. In: *Langton C. G., Taylor C., Farmer J. D., Rasmussen S. (eds.).* Artificial Life II, Addison-Wesley: Redwood City (1992) 41–91.

6.43. *Rechenberg I.* Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution, Frommann-Holzboog: Stuttgart (1973).

6.44. *Holland J. H.* Adaption in Natural and Artificial Systems. The MIT Press: Cambridge, MA (1992, 1st ed. 1975).

6.45. *Mitchell M., Forrest S.* Genetic Algorithms and Artificial Life. Artificial Life **1** (1994) 267–289.

6.46. *Forrest S., Javornik B., Smith R., Perelson A.* Using genetic algorithms to explore pattern recognition in the immune system. Evolutionary Computation **1** (1993) 191–211.

6.47. *Highland H. J. (ed.).* Computer Virus Handbook. Elsevier Advanced Technology: Oxford (1990); *Spafford E. H.* Computer viruses as artificial life. Artificial Life **1** (1994) 249–265.

6.48. *Taylor C., Jefferson D.* Artificial life as a tool for biology inquiry. Artificial Life **1** (1994) 1–13.

6.49. *Pfeifer R., Scheier C.* Understanding Intelligence, MIT Press: Cambridge Mass. (2001).

6.50. *Morán F., Moreno A., Merelo J. J., Chacón P. (eds.).* Advances in Artificial Life, Springer: Berlin (1995).

6.51. *Mainzer K.* Gehirn; Computer, Komplexität. Springer: Berlin 1997; *Mainzer K.* KI – Künstliche Intelligenz. Grundlagen intelligenter Systeme, Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt (2003).

Глава 7

7.1. *Ehrenberg V.* Der Staat der Griechen. Zürich (1965); *Meier C.* Die Entstehung des Politischen bei den Griechen. Frankfurt (1983).

7.2. Platonis Opera, 5 vols. Ed. J. Burnet. Oxford (1899–1906) (especially Politeia, Politikos); ср.: *Cross, R. C., Woozley A. D.* Plato's Republic. A Philosophical Commentary. London (1964).

7.3. *Aristotle.* Ethica Nicomachae, Politica (Oxford Classic al Texts) (рус. пер.: *Аристотель.* Никомахова этика. М.: ЭКСМО-пресс, 1997; *Аристотель.* Политика. М.: АСТ, 2002); Atheniesium Res Publica. Ed. F. G. Kenyon. Oxford (1920); *Höffe O.* Praktische Philosophie – Das Model des Aristoteles. München (1971); *Barker L. E.* The Political Thought of Plato and Aristotle. New York (1959).

7.4. *Hobbes T.* The Elements of Law Natural and Politic (1640). Ed. F. Tönnies. London (1889); Leviathan, or the Matter, Form and Power of a Commonwealth, Ecclesiasticial and Civil (1651). Ed. C. B. Macpherson. Harmondsworth (1968); *Gough J. W.* The Social Contract. A Critical Study of its Development. Oxford (1957); *Höffe O. (ed.).* Thomas Hobbes: Anthropologie und Staatsphilosophie. Freiburg (1981).

7.5. *Quesnay.* Oeuvres économiques et philosophiques. Francfort (1988).

7.6. Рисунок 7.3 *а* показывает «Экономические таблицы» из «Elements de la philosophie rurale» (1767) маркиза Мирабо; ср.: *Meek R. L.* The interpretation of the «Tableau economique», Economica **27** (1960) 322–347.

7.7. *Serviere G. de* Recueil d'ouvrages curieux de mathématique et de mé-chanique, ou description du cabinet de Monsieur Grollier de Serviere, avec des figures en taille-douce.

Seconde édition. Lyon (1733) (рис. 38); *Rieter H.* Quesnays Tableau Economique als Uhren-Analogie. In: *Scherf H. (ed.).* Studien zur Entwicklung der ökonomischen Theorie IX. Duncker & Humblot: Berlin (1990) 73.

7.8. *Locke J.* Two Treatises on Government (1689). Ed. P. Laslett. Cambridge (1970). Book II: Essay concerning the true original, and end of civil government (рус. пер.: *Локк Дж.* Два трактата о правлении. *Сочинения:* В 3 т. Т.3. М.: Мысль, 1988).

7.9. *Hume D.* Essays and Treatise on Several Subjects. In two Volumes. I. Containing Essays, Moral, Political, and Literary. A New Edition. London (1784).

7.10. *Smith A.* The Theory of Moral Sentiments (1759). Ed. D. D. Raphael, A. L. Macfie. Oxford (1979).

7.11. Ср.: *Skinner A. S.* Adam Smith, science and the role of imagination. In: *Todd W. B. (ed.).* Hume and the Enlightenment. Edinburgh University Press: Edinburgh (1974) 164–188.

7.12. *Smith A.* An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations. Ed. E. Cannan. The University of Chicago Press: Chicago (1976). Vol. 1, 478 (рус. пер.: *Смит А.* Исследование о природе и причинах богатства народов. М.: Наука, 1993).

7.13. *Smith A.* (см. примеч. 12). Vol. 1, 18.

7.14. *Mayr O.* Adam Smith und das Konzept der Regelung. In: *Troitzsch., Wohlauf G. (eds.)* Technikgeschichte. Frankfurt (1980) 245.

7.15. Ср.: *Marchi N. B. de* The empirical content and longevity of Ricardian economics. Economica 37 (1970) 258–259; *Sowell T.* Classical Economics Reconsidered. Princeton University Press: Princeton (1974) 118–120; *Blaug M.* The Methodology of Economics. Cambridge University Press: Cambridge (1980).

7.16. *Mill J. S.* On the definition of political economy. In: Collected Works. Essays on Economy and Society. Ed. J. M. Robson. University of Toronto Press: Toronto (1967). Vol. 4, 330; *Hicks J.* From classical to post-classical: The work of J. S. Mill. In: *Hicks J.* Classics and Moderns. Collected Essays on Economic Theory. Vol. III. Basil Blackwell: Oxford (1983) 60–70.

7.17. *Georgescu-Roegen N.* The Entropy Law and Economic Progress. Harvard University Press: Cambridge, MA (1971).

7.18. *Walras L.* Principe d'une théorie mathématique de l'echange. Journal des Economistes **33** (1874) 1–21; *Hicks J.* Léon Walras. In: *Hicks J.* (см. примеч. 16) 85–95.

7.19. *Keynes J. M.* The Collected Writings of John Maynard Keynes. Vol. XIV. The General Theory and After. Ed. D. Moggridge. Macmillan: London (1973) 296.

7.20. *Neumann J. von, Morgenstern O.* Theory of Games and Economic Behavior. Princeton University Press: Princeton, NX (1943) (рус. пер.: *Нейман фон Дж., Моргенштерн О.* Теория игр и экономическое поведение. М.: МНИТ, 1970).

7.21. Ср.: *Stegmüller W.* Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie Bd. 1. Springer: Berlin (1969) 391.

7.22. Ср.: *Shubik M. (ed.).* Game Theory and Related Approaches to Social Behavior. John Wiley: New York/London/Sidney (1964); *Nash J. F.* Equilibrium points in n-person games. Proceedings of National Academy of Science (USA) **36** (1950) 48–49.

7.23. Обзор дан в: *Anderson P. W., Arrow K. J., Pines D. (eds.).* The Economy as an Evolving Complex System. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Vol. 3. Addison-Wesley: Redwood City (1988); *Barnett W. A., Geweke J., Shell K. (eds.).* Economic Complexity. Chaos, Sunspots, Bubbles, and Nonlinearity. Cambridge University Press: Cambridge (1989).

7.24. *Kalecki M.* Theory of Economic Dynamics. Unwin University Books: London (1954); *Samuelson P.A.* Foundations of Economic Analysis. Harvard University Press: Cambridge, MA (1947).

7.25. *Goodwin R. M.* Chaotic Economic Dynamics. Clarendon Press: Oxford (1990) 19.

7.26. *Rössler O. E.* Chaos und Endophysik. In: *Mainzer K., Schirmacher W. (eds.).* Quanten, Chaos und Dämonen. Erkenntnistheoretische Aspekte der modernen Physik. B. I. Wissenschaftsverlag: Mannheim (1993).

7.27. *Goodwin R. M.* Chaotic Economic Dynamics (см. примеч. 25) 113.

7.28. *Lorenz H.-W.* Nonlinear Dynamical Economics and Chaotic Motion. Springer: Berlin (1989); *Goodwin R. W.* A growth cycle. In: *Hunt E. K., Schwartz J. G. (eds.).* A Critique of Economic Theory. Penguin: Harmondsworth (1969) 442–449.

7.29. Эта идея восходит к: *Samuelson P. A.* Generalized predator-prey oscillations in ecological and economic equilibrium. In: The Collected Scientific Papers of P. A. Samuelson. Ed. R. C. Merton. Vol III. MIT Press: Cambridge, MA (1972) 487–490.

7.30. Ср.: *Lorenz H.-W.* Nonlinear Dynamical Economics and Chaotic Motion. (См. примеч. 27) 157; *Goodwin R. M.* Chaotic Economic Dynamics. (см. примеч. 25) 117.

7.31. Ср.: *Farmer J. D., Sidorowich J. J.* Predicting Chaotic Time Series. Mineo: Los Alamos National Laboratory (1987).

7.32. В своем труде «История экономического анализа» Дж. А. Шумпетер уже обсуждал возможность многих точек равновесия. Но как Пуанкаре в физических науках, он боялся хаотических сценариев в экономике: *Schumpeter J. A.* Geschichte der ökonomischen Analyse. Vandenhoeck & Ruprecht: Göttingen (1965).

7.33. *Arthur W. B.* Positive feedbacks in the economy. Scientific American, February (1990) 92–99.

7.34. *Weidlich W.* Sociodynamics: A Systematic Approach to Mathematical Modeling in the Social Sciences. Taylor & Francis: London (2002). Chapt. 3.2.3 (рус. пер.: *Вайдлих В.* Социодинамика: системный подход к математическому моделированию в социальных науках. М.: URSS, 2005).

7.35. *Weidlich W.* Sociodynamics: A Systematic Approach to Mathematical Modeling in the Social Sciences (см. примеч. 34) 224 (рис. 7.1).

7.36. *Arthur W. B., Ermoliew J. M., Kaniowski J. M.* Path-dependent processes and the emergence of macro-structure. European Journal of Operational Research **30** (1987) 294–303; *Helpman E., Krugman P.* Market Structure and Foreign Trade. MIT Press: Cambridge, MA (1985).

7.37. *Simon H.* Administrative Behavior: A Study of Decision-Making Processes in Administrative Organizations, 2nd edn. Macmillian: New York (1957) 198.

7.38. *Sterman J. D.* Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. McGraw-Hill: Boston (2000) 597–629.

7.39. *Wolfram S.* A New Kind of Science (см. примеч. 5.47) 432.

7.40. *Flood R. L.* Complexity: A definition by construction of a conceptual framework. Systems Research **4**(3) (1987) 177–185; *Flood R. L., Carson E. R.* Dealing with Complexity. An Introduction to the Theory and Application of Systems Science. Plenum Press: New York (1988); ранее обсуждение проблем сложности в социальных науках дано в: *Hayek F. A. von* The Theory of Complex Phenomena. J. C. B. Mohr: Tübingen (1972).

7.41. Обзор дан в: *Cambel A. B., Fritsch B., Keller J. U. (eds.).* Dissipative Strukturen in integrierten Systemen. Nomos Verlagsgesellschaft: Baden-Baden (1989); *Tainter J.* The Collapse of Complex Societies. Cambridge University Press (1988); *Dumouchel P., Dupuy J.-P. (eds.).* L'Auto-Organisation de la Physique au Politique. Editions Du Seuil: Paris (1983).

7.42. *Malthus T. R.* An Essay on the Principle of Population. London (1798).

7.43. *Spencer H.* First Principles. D. Appleton & Co.: New York (1896) 527; *Carneiro R. L.* Structure, function, and equilibrium in the evolutionism of Herbert Spencer. Journal of Anthropological Research 29 (1973) 77–95.

7.44. Для обзора ср., к примеру, *Carneiro R. L.* Successive reequilibrations as the mechanism of cultural evolution. In: *Schieve W. C., Allen P. M. (eds.).* Self-Organization and

Dissipative Structures. Applications in the Physical and Social Sciences. University of Texas Press: Austin (1982) 110–115.

7.45. *Allen P. M.* Self-organization in the urban system. In: *Schieve W. C., Allen P. M. (eds.).* Self-Organization and Dissipative Structures. (см. примеч. 44) 142–146.

7.46. *Durkheim E.* De la Division du Travail Social. Paris (1893); Les Règles de la Méthode Sociologique. Paris (1895).

7.47. *Weidlich W.* Das Modellierungskonzept der Synergetik für dynamisch sozioökonomische Prozesse. In: *Mainzer K. I., Schirmacher W. (eds.).* Quanten, Chaos und Dämonen (см. примеч. 26), рис. 6.12–16; *Weidlich W.* Stability and cyclicity in social systems. In: *Cambel A. B., Fritsch B., Keller J. U. (eds.).* Dissipative Strukturen in Integrierten Systemen. (см. примеч. 41) 193–222.

7.48. Обзор дан в: *Scott W. R.* Organizations: Rational, Natural, and Open Systems. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ (1992); *Taylor M.* The Possibility of Cooperation. Cambridge University Press: Cambridge (1987).

7.49. *Bott E.* Urban families: Conjugal roles and social networks. Human Relations **8** (1955) 345–383; *Knipscheer C. P. M., Antonucci T. C. (eds.).* Social Network Research: Substantive Issues and Methodological Questions. Swets and Zeitlinger: Amsterdam (1990).

7.50. *Schelling T. C.* Micromotives and Macrobehavior. W. W. Norton & Co.: New York (1978).

7.51. *Glance N. S., Huberman B. A.;* Organizational fluidity and sustainable cooperation, dynamics of computation group: Xerox Palo Alto Research Center: March 12 (1993) (рис. 3).

7.52. См. примеч. 51, рис. 4.

7.53. *Dawkins R.* The Selfish Gene. Oxford University Press: New York (1976).

7.54. *Popper K. R.* Evolutionary epistemology. In: *Miller D. (ed.).* Popper Selections. Princeton University Press: Princeton, NJ (1985) 78–86.

7.55. *Miller M. S., Drexler K. E.* Comparative ecology: A computational perspective. In: *Huberman B. A. (ed.).* The Ecology of Computation. North-Holland: Amsterdam (1988) 51–76.

7.56. Ср.: *Luhmann N.* The self-reproduction of the law and its limits. In: *Teubner G. (ed.).* Dilemmas of Law in the Welfare State. Berlin (1986) 111–127; *Mayntz R.* Differenzierung und Verselbständigung. Zur Entwicklung gesellschaftlicher Teilsysteme. Frankfurt (1988).

7.57. *Minsky M.* The Society of Mind. Simon & Schuster: New York (1985) 314.

7.58. Обзор дан в: *Kellermayr K. H.* Lokale Computernetze LAN. Technologische Grundlagen, Architektur, Übersicht und Anwendungsbereiche. Springer: Wien (1986); *Sharp J. A.* Verteilte und parallele Computernetze. Architektur und Programmierung. VCH-Verlagsgesellschaft: Weinheim (1989); *Barz H. W.* Kommunikation und Computernetze. Konzepte, Protokolle und Standards. Carl Hanser: München (1991).

7.59. *Cerf V. G.* Netztechnik, Spektrum der Wissenschaft Nov. **11** (1991) 76.

7.60. *Halabi B.* Internet-Routing-Architekturen: Grundlagen, Design und Implementierung. Carl Hanser Verlag: München (1998) 122 (рис. 5.8); *Calvert K. M., Doar M. B., Zegura E. W.* Modeling Internet topology. IEEE Transactions Communication 1 (1997) 160.

7.61. *Fukuda K., Takayasu H., Takayasu M.* Spatial and temporal behavior of congestion in Internet traffic. Fractals 7 1 (1999) 67.

7.62. *Mainzer K., Büchs M., Kundish D., Pyrka P.* Physical and virtual mobility: analogies between traffic and virtual highways. In: *Mayinger F. (ed.).*, Mobility and Traffic in the 21st Century. Springer: Berlin (2001) 243–318.

7.63. *Takayasu M., Fukuda K., Takayasu H.* Application of statistical physics to the Internet traffics. Physica A (1999) 3 (рис. 1).

7.64. *Takayasu M., Takayasu H., Sato T.* Critical behaviors and $1/f$ noise in information traffic. Physica A 233 (1996) 825 (рис. 1).

7.65. *Wang X. F.* Complex networks: topology, dynamics and synchronization. International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering 12 5 (2002) 885–916.

7.66. *Crestani F., Pasi G. (eds.).* Soft Computing in Information Retrieval: Techniques and Applications. Physica Verlag (Springer): Heidelberg (2000); *Zadeh L. A.* From computing with numbers to computing with words – from manipulations of measurements to manipulation of perceptions. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications 45 1 (1999).

7.67. *Mainzer K.* KI – Künstliche Intelligenz. Grundlagen intelligenter Systeme. Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt (2003).

7.68. *Boughanem M., Chrisment C., Mothe J., Soule-Dupuy C., Tamine L.* Connectionist and genetic approaches for information retrieval. In: *Crestani F., Pasi G. (eds.).* Soft Computing in Information Retrieval (см. примеч. 66) 179 (рис. 1).

7.69. *Merkl D., Rauber A.* Document classification with unsupervised artificial neural networks. In: *Crestani F., Pasi G. (eds.).* Soft Computing in Information Retrieval (см. примеч. 66) 102–121.

7.70. *Cho S. B.* Artificial life technology for adaptive information processing. In: *Kasabov N. (ed.).* Future Directions for Intelligent Systems and Information Sciences. Physica-Verlag (Springer): Heidelberg (2000) 24.

7.71. *Huberman B. A., Adamic L. A.* Growth dynamics of the World Wide Web. Nature 401 (1999) 131.

7.72. *Minsky M.* The Society of Mind. (см. примеч. 57).

7.73. *Hegel G. W. F.* Phänomenologie des Geistes. (1807) In: Werke inzwanzig Bänden. Vol. 3. Suhrkamp: Frankfurt (1972).

7.74. *Weiser M.* The computer for the 21st century. Scientific American 9 (1991) 66.

7.75. *Gershenfeld N.* When Things Start to Think. Henry Holt: New York (1999).

7.76. *Norman D. A.* The Invisible Computer. Cambridge University Press: Cambridge (1998).

7.77. *Hofmann P. E. H. et al.* Evolutionare E/E-Architektur. Vision einer neuartigen Elektronik-Architektur für Fahrzeuge, DaimlerChrysler: Esslingen (2002).

7.78. *Dierkes M., Berthoin Antal A., Child J., Nonaka I. (eds.).* Handbook of Organizational Learning & Knowledge. Oxford University Press: Oxford (2001).

7.79. *Mainzer K.* Leben in der Wissensgesellschaft. In: Deutscher, Hochschulverband (ed.) Glanzlichter der Wissenschaft. Lucius und Lucius: Stuttgart (2000) 133–142; *Mainzer K.* Computernetze und Virtuelle Realität. Leben in der Wissens gesellschaft. Springer: Berlin (1999).

Глава 8

8.1. *Goodmann N.* Fact, Fiction and Forecast. London (1954); *Lenk H.* Erklärung, Prognose, Planung. Rombach: Freiburg (1972).

8.2. *Montgomery D. C., Johnson L. A.* Forecasting and Time Series Data Analysis and Theory. Holt, Rinehart and Winston: New York (1975).

8.3. *Abraham B., Ledolter J.* Statistical Methods of Forecasting. Wiley: New York (1983); *Pindyek R., Rubinfeld D.* Econometric Models and Economic Forecasts. McGraw-Hill: New York (1980).

8.4. *Makridakis S., Wheelwright S. C.* Forecasting Methods for Management. Wiley: New York (1989); *Makridakis S., Wheelwright S. C., Mc Gree V. E.* Forecasting: Methods and Applications. Wiley: New York (1989).

8.5. *Kravtsov Y. A. (ed.).* Limits of Predictability. Springer: Berlin (1993) 82; *Sarder Z., Ravetz J. R. (eds.).* Complexity: fad or future? In: *Futures J.* Forecasting, Planning, and Policy **26** 6 (1994).

8.6 *Mayntz R.* The Influence of natural science theories on contemporary social science. In: *Meinolf D., Biervert B. (eds.).* European Social Science in Transition. Assessment and Outlook. Westview Press: Boulder, Colorado (1992) 27–79.

8.7. *Merton R. K.* The Sociology of Science. Theoretical and Empirical Investigations. Chicago (1973); *Sorokin P. A.* Social and Cultural Dynamics. New York (1962); *Price D. de Solla.* Science since Babylon. New Haven (1961); *Goffman W.* An epidemic process in an open population. In: Nature **205** (1965), 831–832; Mathematical approach to the spread of scientific ideas — the history of mast cell research. In: Nature **212** (1966), 449–452; *Berg J., Wagner-Döbler, R.* A multidimensional analysis of scientific dynamics. In: Scientometrics **3** (1996), 321–346.

8.8. *Brackner E. W., Ebeling W., Scharnhorst A.* The application of evolution models in scientometrics. In: Scientometrics **18** (1990), 33.

8.9. *Small H., Sweeny, Greenlee E.* Clustering the science citation index using co-citations. II. Mapping science. In: Scientometrics **8** (1985) 321–340; *Callon M., Courtial J.-P., Turner W. A., Bauin S.* From translation to problematic networks — An introduction to co-word analyses. In: Social Science Information **22** (1983), 191–235.

8.10. *Mayntz R.* Soziale Diskontinuitäten: Erscheinungsformen und Ursachen. In: *Hierholzer K., Wittmann H.-G. (eds.).* Phasensprünge und Stetigkeit in der natürlichen und kulturellen Welt. Wiss. Verlagsgesellschaft: Stuttgart (1988) 15–37.

8.11. *Mainzer K.* Die Würde des Menschen ist unantastbar. Zur Herausforderung von Artikel II Grundgesetz durch den technisch-wissenschaftlichen Fortschritt. Jahrbuch der Universität 1989. Augsburg (1990) 211–221.

8.12. Исторический обзор представлен в: *Schwemmer O.* Ethik. In: *Mittelstraß J. (ed.).* Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie. Vol. 1. B. I. Wissenschaftsverlag: Mannheim/Wien/Zürich (1980) 592–599; *Abelson R., Nielsen K.* History of ethics. In: *Edwards (ed.).* The Encyclopedia of Philosophy. Vol. III. New York (1967) 81–117.

8.13. *Irwin T.* Plato's Moral Theory. The Early and Middle Dialogues. Oxford (1977).

8.14. *Kenny A.* The Aristotelean Ethics. A Study of the Relationship between the Eudemian and Nicomachean Ethics of Aristotle. Oxford (1978).

8.15. Ср.: *Raphael D. D. (ed.).* British Moralists (1650–1800) I–II. Oxford (1969).

8.16. *Paton H. J.* The Categorical Imperative. A Study in Kant's Moral Philosophy. London (1947); *Williams B. A. D.* The Concept of the Categorical Imperative. A Study of the Place of the Categorical Imperative in Kant's Ethical Theory. Oxford (1968).

8.17. *Mill J. S.* Utilitarianism. London (1861); *Rescher N.* Distributive Justice. A Constructive Critique of the Utilitarian Theory of Distribution. Indianapolis (1966).

8.18. *Rawls J.* A Theory of Justice. London (1972).

8.19. *Simon J.* Friedrich Nietzsche. In: *Höffe O. (ed.).* Klassiker der Philosophie II. München (1981) 203–224, 482 84.

8.20. *Heidegger M.* Die Technik und die Kehre. Pfullingen (1962); *Loscerbo J.* Being and Technology. A Study in the Philosophy of Martin Heidegger. The Hague (1981).

8.21. *Jonas H.* Das Prinzip Verantwortung. Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation. Suhrkamp: Frankfurt (1979).

8.22. *Lenk H.* Zwischen Wissenschaft und Ethik. Suhrkamp: Frankfurt (1992); *Mittelstraß J.* Leonardo Welt. Über Wissenschaft, Forschung und Verantwortung. Suhrkamp: Frankfurt (1992).

8.23. *Chua A.* World on Fire. Doubleday: New York (2003).

8.24. *Kant I.* Zum ewigen Frieden (1795). In: Kants gesammelte Schriften, ed. Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften Bd. VIII. Berlin (1912/23).

8.25. *Wolfram S.* A New Kind of Science (см. примеч. 5.47) 750.

8.26. *Kant I.* Kritik der reinen Vernunft (1787), B 833.

Предметный указатель

Автокатализ 127, 133, 134, 142
автомат 27, 34, 122, 123, 157, 208, 209, 211, 212, 252, 253
– клеточный *см.* клеточный автомат (КА)
– конечный 212, 252, 321, 322, 328
– необратимый 258
– обратимый 256–258
– самовоспроизводящийся 252, 322
автоматизированное проектирование 309
адиабатическое исключение 95, 358, 359
аксон 162, 167, 170, 183, 184, 250, 312
активатор 142–144
актуатор 109
алгоритм 11, 211
– генетический 325–327, 390
– обучающий 35, 41, 186, 265, 307, 315, 327, 390
анализ временных рядов 31, 43, 110, 111, 114–116, 313, 314, 361, 402, 403
анатомия 35, 122, 143, 154, 184, 186, 191, 279, 309
антигравитация 98
антропология 330, 334, 339
АП *см.* программа «Ассоциативная память»
апериодичность 114, 115
архитектура эволюционная (ЭвоАрх) 395, 396, 398
ассоциативная система 184
ассоциация 157, 160, 161, 170, 177
астронавтика 316
астрономия 47, 53, 55, 56, 58, 79, 183, 210, 340
атом 27, 29, 39, 40, 45, 47, 48, 79, 80, 95
атомизм 47, 49, 57, 120
аттрактор 9, 30–34, 37, 68, 76, 118, 174, 188, 199, 254
– визуальный 200, 202
– квазипериодический 30, 118, 255
– Лоренца 86, 113, 114
– периодический 118, 142
– Рёсслера 351
– странный 86, 256, 288, 350, 352, 378, 384, 389, 406, 408
– точечный *см.* неподвижная точка
– хаотический 114, 116, 174, 256, 289, 324, 348, 352, 407

Бабочки эффект 27, 116, 196, 256, 346, 347, 350, 369, 372, 421, 423
баланс в природе 32, 49
Белоусова–Жаботинского реакция 108, 143, 325
Бенара конвекция 183
– эксперимент 85, 91, 402
биогенетики законы 121
биологизм 392
биология 6, 7, 16, 21, 26, 31, 33, 39, 40, 66, 69, 93, 96, 103–105, 111, 119, 121–124, 139, 143, 152, 183, 228, 271, 273, 290, 305–308, 320, 321, 325, 328, 329, 420
биомолекулы 31, 39, 40, 133, 134, 137
бионика 305, 314
биотехнология 309, 394
биофизика 122
биохимия 33, 34, 143, 191, 195, 241, 306
биржевой прогноз *см.* прогноз курса акций
бифуркация 16, 22, 30, 89–91, 102, 105, 131, 144, 151, 255, 288, 321, 330, 355, 359, 368, 378, 407–410
благосостояние 336, 340, 346, 361, 369, 419, 422, 423
–, оптимальное по Парето 346
Бог 79, 122, 151, 153, 156, 157, 187, 200, 204, 265, 368
Болдуина эффект 326
Больцмана машина 175–177, 270

Больцмана распределение 92, 176
Большой Брат 317, 332
– взрыв 100, 101, 134
бритва Оккама 41, 206, 248, 354, 368, 421
броуновское движение 91, 126, 127
будущее 17, 400–402, 404, 407, 409, 410, 416, 417, 422
булевская сеть 32, 137
– функция *см.* функция булевская
булевский куб 297, 298, 300

Вездесущая вычислительная техника 38, 331, 393, 394, 398, 399
Веймарская республика 370
вектор касательный 43, 59
–, прототип 171, 174, 177, 188, 190, 266
– скорости 43, 60, 61, 147
– собственный 27, 81, 245
– состояний 173
– состояния 27, 30
векторное поле 60, 61, 71, 72, 74, 147, 352
Великая депрессия 348, 349, 369
веса 390
вестибоокулярный рефлекс 166
взаимодействие 28, 105, 155, 157, 309, 376, 379, 386, 392, 425
– линейное 403
– локальное 172, 183, 184, 199, 270, 309, 310, 365, 370, 421
– нейронное 153, 176, 179, 188, 196, 310
– нелинейное 26, 27, 29, 32, 34, 37–39, 177, 200, 255, 309, 310, 320, 321, 330, 364, 366, 367, 370, 372, 378, 423
визуализация в реальном времени 84, 197, 309, 310, 321
виртуальная реальность 36, 316, 317, 393, 394
витализм 121, 129, 160, 212
вихрь 30, 40, 47, 85, 93, 94, 255, 410
внимание 152, 193, 195, 291
возникновение порядка 9, 21, 25, 29–31, 33, 34, 37, 43, 44, 57, 73, 84, 91, 95, 96, 98, 107, 119, 128, 130, 132, 149, 150, 152, 183, 195, 208, 255, 273, 324, 326, 330, 331, 356, 366–368, 383, 402
– структуры *см.* возникновение порядка
волновая функция *см.* функция волновая
воображение 35, 152, 153, 157, 226, 316
восприятие 33, 155, 157–160, 164, 165, 168, 169, 193, 309
восстановление информации 396
временные ряды 30, 58, 112–116, 118, 141, 142, 227, 269, 287–289, 350, 351, 354, 364, 365, 388, 402
время вычислений 208, 217–221, 224, 367, 397
– – квадратичное 218
– – линейное 82, 218, 220
– – полиномиальное 218, 220, 221
– – экспоненциальное 218
– мнимое 100
Вселенная *см.* инфляционная Вселенная
Всемирная паутина (WWW) 388, 391
вторичное квантование 28
второе начало термодинамики *см.* термодинамика, второе начало
высокотехнологичная промышленность 38, 355
вычисления с использованием графики 260, 281, 282
вычислимость 34, 208, 212, 216, 217, 222, 228, 320, 330, 399, 409, 425
вычислительная неприводимость 258, 259, 409

Галилеевская инвариантность *см.* инвариантность галилеевская
галилеевское преобразование *см.* преобразование Галилея
Гамильтона задача *см.* задача Гамильтона
– оператор 27, 81, 83, 245
– уравнения *см.* уравнения Гамильтона
– функция *см.* функция Гамильтона
гамильтониан 82, 83
гамильтонова динамика *см.* динамика гамильтонова
– механика *см.* механика гамильтонова
– система *см.* система Гамильтона
гармония 9, 33, 45, 52, 120, 121, 154, 332
генетическая информация *см.* информация генетическая
генная инженерия 104, 307, 327
– технология 21, 280, 400
генотип 16, 315, 320, 321, 325, 326, 391

геология 40
геометрия 8, 54, 57, 58, 62, 64, 65, 120, 122, 155, 159, 165, 182
– дифференциальная 185
гештальтпсихология 271
гидродинамика 9, 39, 93
гиперплоскость 63, 78, 83
гиперцикл *см.* система, подобная гиперциклам
гипотеза 63, 100, 101, 152, 156, 160, 206, 259, 338, 348
гистерезис 197, 275, 276
глобализация 21, 330, 400, 422–424
глобальная деревня 331, 393, 424
– сеть *см.* сеть глобальная
гомеостаз 8, 136, 369
горизонт предсказуемости 402, 404, 406
– прогнозирования *см.* горизонт предсказуемости
городская система *см.* система городская
городской центр 370
гравитация 100, 184, 248
градиент ошибки 185, 186
градиентный спуск 185, 266
грамматика контекстно зависимая 321
– Хомского 321
группа симметрии 97, 98
гуманитарные науки 13, 21, 26, 27, 37, 39, 366, 402

Даосизм 56
дельфийский оракул 401
демократия 332, 338, 339, 372, 417, 422, 423
демон Лапласа 27, 57, 73, 76, 77, 371, 401
– Максвелла 130
дендример 105, 321
детерминизм 27, 62, 114, 338
диагональная процедура 222
динамика 40, 41, 59
– аристотелевская 52
– вычислительная 21, 35, 41
– Галилея и Ньютона 52, 57
– гамильтонова 74, 75
– интенциональная 199, 201, 203, 204
– информационная 41, 208, 399
– классическая 83
– линейная 28, 246–249, 355
– миграции 376, 377, 381
– нелинейная 21, 23, 25, 26, 30, 31, 34–36, 39, 41, 43, 110, 137, 146, 151, 152, 165, 198, 200, 209, 260, 278, 287–289, 292, 300, 314, 330, 348, 354–356, 360, 363, 372, 384, 392, 399, 408, 423, 425
– символическая 227
– сложная 26, 57, 58, 119, 137, 139, 170, 195, 271, 320, 324, 325, 329, 331, 346, 353, 362, 364, 384, 410, 415, 422
– случайная 137, 208, 364, 410, 425
– социальная 21, 333, 373, 374, 379–381
– хаотическая 89, 111, 114, 116, 324
диссипация *см.* самоорганизация диссипативная
дифференциальные уравнения *см.* уравнение дифференциальное
дифференциация клеток 141, 143, 144, 325
ДНК 103, 132, 225, 228, 315, 320, 328, 399
Доплера эффект 181
дополнительность 129, 300
досократики 29, 43, 44, 47, 58, 120, 153, 162
дуализм 34, 46, 156, 159
– корпускулярно-волновой 80, 129
душа 27, 34, 120–122, 152–157, 159, 207

Железо 107
животные духи 155, 156, 159
жидкости 40, 48, 85, 94, 131, 204
жизненный порыв 187
жизнь 31, 41, 105, 119–121, 124, 127, 128, 132, 136, 199, 250, 255, 325, 328, 331, 400, 417, 420, 424
– искусственная *см.* искусственная жизнь

Задача Гамильтона 219–221
– коммивояжера 220
– о реке в Кёнигсберге 219
закон наследственности Менделя 124
– сохранения энергии 27, 63, 124, 159
занятость 349, 353, 402, 405, 411, 412
знание 154, 158, 228, 230, 243

Игра «Жизнь» Конвея 259, 292
идея 26, 34, 46, 47, 92, 153, 154, 158, 169, 188, 349, 382
изменение 8, 26, 27, 30, 36, 44–46, 51, 58, 60, 91, 125, 138, 357, 381, 392, 404
иммунная система *см.* система иммунная
иммунология 327
имплантат сетчатки 308
– **улитки** 308
инвариантность 27, 64, 65, 91
– **галилеевская** 63, 65
ингибитор 142–144
инновация 39, 151, 209, 348, 349, 381, 382, 399, 410, 411, 416
институт 37, 339, 368, 369, 383, 420, 423
интеллект *см.* искусственный интеллект
интенциональность 33, 34, 198–200, 204, 206, 207
Интернет 38, 39, 41, 331, 385–388, 390, 393, 394, 396, 397, 399, 400, 422, 424
интерпретация Вигнера 248
– **Эверетта** 248
инфляционная Вселенная 98, 101
информационная перчатка 316
– **энтропия** *см.* информационное содержание
информационное общество 400
– **содержание** 118, 125, 208, 223–226
информационный поток 38, 226, 227, 330, 364, 386, 388, 390, 402
– **потоп** 38, 388
информация 5, 38, 39, 224, 226, 228, 233, 255, 362, 369, 383, 385, 392, 394, 399, 400
– **взаимная** 226, 227
– **генетическая** 225, 320, 399
– **квантовая** 208, 226, 228
инь и ян 46, 56
искусственная жизнь (ИЖ) 16, 21, 23, 35, 260, 319–321, 324, 325, 327–329, 394
– **эволюция** 110, 320, 328, 329
искусственный интеллект (ИИ) 6, 16, 34, 39, 82, 104, 165, 169, 208, 209, 216, 228–230, 235, 239, 243, 250, 262, 263, 266, 277, 278, 319, 320, 329, 331, 362, 397
история 25, 28, 31, 32, 36, 37, 40, 41, 124, 128, 151, 159, 197, 332, 368, 420, 423
исчисление 43, 59, 60, 217, 229, 343

Калибровочные группы 98
– **поля** 97
КАМ-теорема 27, 77, 78
картина эволюции 254, 255, 271, 272
категории 128, 158, 159, 164, 171, 188
категорический императив 419
квазистационарная космология 101
квант действия Планка 79
квантование *см.* первичное квантование
квантовая информация *см.* информация квантовая
– **механика** *см.* механика квантовая
– **система** *см.* система квантовая
– **теория поля** 28
– – **сложности** *см.* теория сложности
– **флуктуация** *см.* флуктуация квантовая
квантовое состояние *см.* состояние квантовое
квантовые точки 107, 108
квантовый вакуум 98
– **компьютер** *см.* компьютер квантовый
– **хаос** *см.* хаос квантовый
кейсианство 343, 353
киберпространство 36, 317, 328
киборг 313, 315
кинетика антител-антигенов 138
китайская комната 205
кластер 8, 106, 145, 177, 190, 227, 291, 317
– **супрамолекулярный** 106
клетка 24, 32, 40, 103, 104, 108, 137, 138, 140, 178, 211, 261, 293
– **глиальная** 306
– **Шванна** 306
клеточная нейронная сеть (КНС) 35, 36, 38, 39, 260, 279–288, 290–296, 298, 303, 311, 312, 314, 386, 388, 410
– – – **автономная** 289, 290, 310
– – – **неавтономная** 287
– – –, **операция AND** 282, 286, 292, 304
– – –, **операция NOT** 282, 286
– – –, **операция OR** 282, 304
– – – **EDGE** 281, 282, 284, 285

клеточная нейронная сеть THRESHOLD 283, 284
– – –, выходное уравнение 281, 286, 302
– – –, ген 288, 292
– – –, геном 281
– – –, таблица истинности 283–286, 297, 298, 301, 302
– – –, универсальная машина (УМ КНС) 36, 292–296, 304, 311, 312
– – –, уравнение состояния 281, 287, 288, 290, 300, 302, 303
– – –, шаблон 287
– нелинейная сеть *см.* клеточная нейронная сеть
клеточные ансамбли 33, 34, 160, 162, 170, 193, 194, 196, 197, 227, 259
клеточный автомат (КА) 16, 35, 36, 38, 41, 208, 250, 252–260, 279, 280, 292, 296–298, 300–303, 305, 321–325, 328, 347, 364, 365, 386, 388, 409
– – (КА) для игры «Жизнь» 259, 292
когнитивные (познавательные) схемы 158, 159
– науки 25, 159, 178, 290
Колмогоров–Синай (КС), энтропия 208, 227, 228, 256, 313, 402
коммуникационная сеть *см.* сеть коммуникационная
компьютер 38, 73, 76, 84, 110, 129, 183, 209, 214, 250, 252, 312, 318, 372, 406
– аналоговый клеточный 35, 36, 279
– детерминированный 220, 228
– квантовый 208, 228, 244, 249, 250
– недетерминированный 220
– нейронный 209, 295
– оптический параллельный 35, 260, 276
– синергетический 35, 260, 273–277
– универсальный 104, 214, 216, 252, 292, 322
– химический параллельный 108
компьютерный вирус 12, 110, 327, 328, 391
– эксперимент 21, 32, 34, 253, 254, 257, 259, 296, 321, 324, 326, 329, 350
консервативная самоорганизация *см.* самоорганизация консервативная
– структура *см.* структура консервативная
конституция 338, 369
конструкция гнезда 199
контур Гамильтона 220
– Эйлера 219
копенгагенская интерпретация 28, 129, 247
кора головного мозга 160, 162, 168, 179–181, 183, 184, 192, 207
– – – двигательная 180, 181, 197
– – – слуховая 180–182
– – – соматосенсорная 192
космическая болезнь Альцгеймера 101
космология 40, 47, 58, 101, 126
космонавтика 277
креативность 39, 197
куб Некера 271, 272
культура 16, 25, 36, 37, 198, 207, 331, 366, 382, 384
курс акций 269, 270, 409

Лава 40
лазер 26, 29, 93, 95, 108, 131, 138, 143, 276, 277, 325, 358
Левиафан 27, 331, 334, 335, 339, 393, 419
лента Мёбиуса 350
линейное разделение 263, 264
линейность 9, 28, 82, 246, 249, 334, 335, 342, 345, 347, 366, 404
Лиувилля теорема *см.* теорема Лиувилля
личность 38, 56, 104, 190, 305, 306, 309, 315, 335, 342, 343, 345, 366, 375, 378, 392, 418, 419
логика 160, 209, 221, 232, 250, 262, 293, 343, 418
– нечеткая *см.* нечеткая логика
логистическая кривая 349, 368, 381, 382
логический вентиль 249
– – И 251
– – ИЛИ 251
– – НЕ 251
логос 29, 30, 44, 45, 153
лозаннская школа 342, 343
Лотки–Вольтерры уравнение *см.* уравнение Лотки–Вольтерры

Магнито-резонансное изображение 309
макрокосмос 79
макросостояние *см.* состояние макроскопическое

макросоциология 373
макроэкономика 373
макроэффект 162, 326, 327, 340
маршрутизация 38, 331, 394, 396, 399
математика 6, 120, 122, 133, 154, 157, 239, 320, 373
– *линейная* 330, 347
– нелинейная 33
материаловедение 23, 24, 43, 92, 102, 103, 107
материалы 21, 102, 104, 105, 107–109, 329
– интеллектуальные 328
материя 21, 25, 29–33, 36, 40, 43–47, 49, 92, 96, 98, 99, 101, 110, 123, 129, 134, 153–155, 226, 255, 331, 400
матрица 106
– весов 165, 166, 168, 171, 173
– полезности 344, 345
– риска 345
машина 27, 34, 35, 103, 104, 123, 155, 209, 210, 224, 245, 318
– Лейбница 210–212, 214
– программно управляемая 212, 217
– с переменной структурой связей 384
– Тьюринга *см.* машина Тьюринга универсальная
– универсальная КНС *см.* клеточная нейронная сеть (КНС), *универсальная машина* (УМ КНС)
– – регистровая 212–214, 216, 252, 437
– – Тьюринга 34, 36, 110, 206, 214–218, 220–222, 244, 249, 250, 258, 260, 292, 298
маятник 27, 66–68, 75, 76, 165
медицина 36, 46, 107, 121, 122, 146, 190, 230, 260, 277, 296, 305, 313, 425
междисциплинарная исследовательская программа 33, 197, 305, 421
междисциплинарный подход 6, 7, 13, 33, 37
международная торговля 352, 353, 361
мексиканская шляпа 179
мемы 382, 383
ментальные состояния *см.* состояние ментальное
метаболизм 46, 119, 127, 132, 136, 191, 328
метаморфизм 123, 139
метеорология 26, 32, 40, 56, 84, 183, 347
метод Дельфи 416
– дерева относительной важности 416
– сглаживания 403
методология 13, 25, 26, 33, 39, 57, 165, 235, 236, 271, 338, 341, 342, 350, 368, 374, 415, 421
механизация 27, 209, 250, 260
– мыслей 209, 244
механика *гамильтонова* 80
– декартова 338
– квантовая 8, 16, 27, 28, 39, 40, 74, 79–82, 100–102, 128–130, 184, 244–246, 248, 249, 343, 347
– классическая 8, 14, 27, 77, 80, 128, 130, 157, 212, 246, 330, 347
– небесная 27, 75, 77–79, 84, 338
– ньютонова 66, 73, 123, 130, 158
– статистическая 29, 35, 125, 132
механики 64
миграция 37, 38, 93, 330, 375, 377, 378, 412
микроинтерес 340
микрокосмос 79, 316
микрообратимость 257
микропроизводство *см.* нанотехнология
микроскоп сканирующий туннельный 103, 107
– – электронный 10
микросостояние *см.* состояние микроскопическое
микросоциология 373
микроуровень 37, 420
микрохирургия 308
микроэкономика 373
микроэлектроника 103, 279
минимакс критерий риска 345
минимум 97, 105, 172, 174–176, 270, 344
мировая линия 65, 100
многомировая интерпретация 248
многообразие *см.* топология
модель Гудвина 352
– диссипативная 39, 138, 352
– Изинга 172, 173
– компьютеризованная 412
– консервативная 352
– линейная 7, 38, 112, 330, 342, 343, 348, 350, 370, 421
– Лоренца 85, 86, 347, 348

модель Лотки–Вольтерры 147, 352, 411
– Лундберга–Метцлера 350
– механистическая 62, 66, 123, 193, 334, 342, 418
– научного роста 412, 413
– нелинейная 9, 39, 41, 84, 112, 147, 343, 347, 348, 350, 354, 378, 406, 408
– Хансена–Самуэльсона 349
– хищника–жертвы 147
– Хопфилда 173, 174, 270
– экзогенная 350, 351, 353, 370
– эпидемическая 410
модуль 261
–, *A*-модуль 261
–, *R*-модуль 261
–, *S*-модуль 261
моды 30, 95, 142, 325
– нестабильные 30
мозг 26, 32–34, 36, 41, 127, 152–155, 157, 160, 162, 168, 180, 181, 184, 186, 187, 190, 191, 195, 199, 200, 209, 225, 227, 250, 255, 259, 261, 266, 289, 305, 394
– в бочке 317–319
мозжечок 181
молекулы 27, 29, 31, 39, 40, 79, 83, 91, 92, 95, 103, 125, 183, 225, 248
молекулярное моделирование 316, 328
монады 123, 156, 157, 211
монизм 156, 159
мониторинг 405
монопричинность 37, 41, 209, 425
морфоген 140, 141
морфогенез 139–144, 320
мультимедиа 38, 331, 394
муравей 149, 150
мутация 124, 134, 136–138, 209, 326, 327, 390, 411
мысленный эксперимент 205, 246, 318

Налоговая политика 39, 343, 353
намагниченность 29, 92, 98
наномашина 103, 104, 110
наномир 23, 29, 43, 102, 103, 107
нанороботы 110, см. робот
наноструктура 103–105, 108, 110
нанотехнология 21, 23, 103, 104, 107
нарушение симметрии 30, 43, 44, 55, 91, 92, 96–98, 143, 196, 197, 273, 356, 359, 360, 380
население 12, 368, 370, 371, 375
натурализм 33, 331, 417, 425
наука 5–7, 13, 14, 21, 34, 49, 54, 62, 211, 339, 400, 401, 410
– вычислительная 425
– естественная 13, 24, 39, 51, 84, 87, 96, 122, 124, 128, 257, 354, 408, 417, 420, 421
– компьютерная 21–23, 25, 158, 212, 229, 234, 243, 250, 279, 320, 321, 367, 399
– о жизни 102, 123, 280, 319
– социальная 36, 69, 331, 366, 367, 375, 417, 421, 444
наукометрия 411, 415
научное сообщество 6, 12, 217, 262, 411, 412
невидимая рука 38, 340, 366
неврология 39, 41, 170, 306
нейробиология 25, 26, 152, 177, 186, 188, 280, 305, 307–309, 311
нейробионика 36, 260, 305, 312–315, 328
нейрон 34, 35, 41, 160–162, 167, 168
– МакКаллоха–Питтса 250, 251
нейронный компьютер *см.* компьютер нейронный
нейрореабилитация 309
нейрофизиология 153, 160, 165, 178, 193
нейрохирургия 36, 305, 306, 309
нелинейность 8, 21, 24, 25, 28, 29, 43, 84, 87, 132, 247, 249, 320, 343, 348, 350, 366, 373, 423, 424
немонотонное мышление 239
необратимость 96, 125, 257
неподвижная точка 30, 32, 33, 35, 87, 90, 93, 111, 137, 148, 170, 174, 254–256, 270, 273, 324, 348, 349, 352, 368, 413, 420
неполнота 34, 129, 222–224, 250, 362
неприводимость *см.* вычислительная неприводимость
неразрешимость 34, 222, 223, 258, 321
нерегулярность 52, 79, 82, 114, 348, 350, 353
несепарабельность 298, 300, 303, 304
Нефтяной кризис 348, 355

нечеткая логика 315, 389
нигилизм 420
Новый курс 369
ньютоновская механика *см.* механика ньютонова
– система 31, 73

Область притяжения 199
обработка информации 34, 103, 157, 168, 183, 188, 224, 227, 229, 255, 256, 269, 279, 280, 293, 296, 311, 314, 315, 362, 383, 386, 391, 394, 395, 398, 399
обратимость 27, 29, 128, 256, 257
обратная связь 131, 172, 270, 308, 315–317, 339, 342, 355, 363, 409
– – нелинейная 171–173
– – отрицательная 8, 38, 179, 355, 363, 371
– – положительная 8, 10, 38, 355, 358, 360, 361, 364, 371
обратное *распространение* 35, 185, 186, 265, 267, 269, 391
обучение 33, 35, 38, 169, 170, 176, 177, 260, 326, 368, 394
– конкурентное 177, 178
– контролируемое 177
– неконтролируемое 326
общая теория относительности *см.* относительность, общая теория относительности
общественный порядок 330
общество 7, 16, 21, 22, 25, 32, 37, 40, 259, 330–335, 338, 339, 342, 345, 346, 356, 360, 368–370, 372, 381, 383, 392, 399, 402, 409, 410, 417, 421
–, основанное на знании 392
объединение физических сил 97
– – –, великое объединение 98
овладение знаниями 230, 232, 233
ограниченная рациональность *см.* рациональность
ограниченность 24, 39, 114, 362, 370, 416
одновременность 63
однородность 44, 98, 101
онтогенез 31, 181, 183
оптимальный по Парето *см.* благосостояние, оптимальное по Парето
оптимизация 133, 176, 184, 185, 363, 391, 420
– линейная 404
– эволюционная 133, 368
опыт ЭПР (Эйнштейна–Подольского–Розена) 28, 246
орбита *см.* траектория
организм 27, 29, 31, 39, 40, 43, 46, 49, 50, 56, 107, 119, 120, 123, 129, 131, 137, 139, 140, 146, 154, 155, 160, 164, 170, 183, 225
основанная на знании система *см.* система, основанная на знании
останов *см.* проблема останова
осциллятор 70–72
– гармонический 66, 77, 82, 112
– нелинейный 353
осцилляции 94
отбор 96, 124, 138, 325, 411
ответственность 42, 393, 417, 421, 422, 425
относительность, общая теория относительности 28, 74, 96, 100, 102
–, *специальная теория* относительности 63, 64, 79, 130
отображение 78, 87–90, 112, 114, 115, 137, 167, 180, 227, 407
– логистическое 87
– нелинейное рекурсивное 88
– Пуанкаре 78, 87

Память 127, 156, 157, 293, 362
пантеизм 156
парадигма 7, 35, 36, 122, 123, 216, 229, 230, 279, 283, 289, 290, 381, 392, 404, 417
парадокс близнецов 64, 65
– обратимости 126
параллелизм 33, 209, 249, 250, 311, 312, 314
параметр порядка 10, 23, 26, 30–35, 37, 39–41, 95, 96, 121, 142, 149, 152, 162, 164, 196–199, 273, 274, 276, 324, 358, 359, 382, 387, 409, 422, 423
– управляющий 30, 84, 85, 87–90, 93, 94, 131, 139, 142, 143, 146, 202, 273, 274, 325, 358, 359, 387, 407, 409, 413

первичное квантование 27
перечислимость 216
периодичность 115
перцептрон 261–265, 279, 291
пессимистично-оптимистичный критерий 345
платоновские тела 107
погода 32, 40, 111, 347, 402, 403, 406, 408, 423
подобие 171
показатель Ляпунова 117, 118, 313, 406, 407
полезность *см.* правило максимакса, правило максимина
полис 331–333, 368, 393, 418, 420
политика 37, 41, 339, 353, 361, 400, 402
политическая экономия 340, 341
полноты теорема *см.* теорема полноты
порог 95, 96, 131, 172, 173, 194, 250, 280, 281, 300, 378, 381, 391
пороговая плоскость 264
порядок *см.* возникновение порядка
правило максимакса 344, 345
– максимина 344–346
– Мертона 59
– обучения 35, 170, 176, 177, 184, 261, 262
– Уайдроу–Хоффа 184, 186
предельная точка *см.* аттрактор
предельный цикл 68–71, 75, 76, 86, 111, 117, 131, 139, 141, 145, 148, 174, 228, 277, 287, 288, 348, 352, 353, 377, 384, 406
предсказуемое поведение 342, 407, 408
предсказуемость 227, 365, 407
представление знания 35, 230, 232, 233, 270
преобразование 30, 48, 51, 91, 97, 105, 125, 171, 281, 300
– вектора 166, 171, 188
– Галилея 63, 429
– Лоренца 65
– тензора 166, 188
прибыль 91, 165, 332, 346, 355
принцип замка и ключа 105, 107
– линейности *см.* принцип суперпозиции
– локальной активности 279, 291
– подчинения 30, 33, 41, 138, 142, 143, 196, 273, 274, 277
– соответствия 74, 80–83
– суперпозиции 9, 27, 28, 30, 81, 82, 87, 246, 334, 342, 366
природа 22, 25, 27, 29–32, 50, 56, 57, 62, 103, 120, 123, 151, 200, 331
причинность *см.* монопричинность
– нелинейная 31, 32, 200
– свободы 338, 393, 419
проблема OR 263, 264
– XOR 263, 264
– многих тел 43, 72, 73
– останова 222, 223, 258
– решения 222, 223
– связности 290
– связывания 194
прогноз 401
– долгосрочный 116, 269, 343, 408, 410, 416
– землетрясений 408
– краткосрочный 269, 426
– курса акций 269
– нелинейная 408
– погоды 116
– солнечных пятен 408
– статистический 406
программа «Ассоциативная память» 239, 240
– «Решатель Общих Задач» (РОЗ) 229
– ANALOGY 229
– BACON 240, 241
– DALTON 241
– DENDRAL 229, 230, 235–237, 243, 438
– ELIZA 319
– EURISKO 240
– GENESYS 328
– GLAUBER 241
– GPS 394
– KEKADA 241, 242
– LOGICAL THEORIST 229
– META-DENDRAL 236, 237, 438
– SHRDLU 230
– SIBYL 405
– STAHL 241
– STUDENT 229
программирование линейное 343
– логическое 278

программирование нелинейное 404
– эвристическое 228, 229
программное обеспечение 209, 244, 268, 293, 295, 315, 355, 397
прорицание 402, 416
– выполняющееся 402
– самовыполняющееся 409
– саморазрушающее 409
простота 43, 55–57, 64
пространство *см.* фазовое пространство, пространство состояний
– абсолютное 63
– векторное 389
– гильбертово 27, 81, 245, 246
– *метрическое* 165, 414
– синаптических весов 169
– состояний 58, 60, 61, 67, 69–71, 140, 147, 166, 174, 369
– – сенсорное 166
– топологическое 165
пространство-время 64, 100
– Минковского 64, 65
– Ньютона 63–65
– релятивистское 64, 66
протез 306, 307
процесс диффузии 145, 289, 290
– измерения 28, 74, 244, 246–248
психология 41, 152, 190, 191, 198, 243, 271

Разум 21, 22, 25, 26, 32–34, 36, 41, 82, 152–159, 195, 199, 200, 204, 207–209, 216, 217, 221, 243, 244, 255, 261, 305, 306, 317, 318, 329, 331, 392, 417, 418, 420
разумные материалы *см.* материалы интеллектуальные
распознавание 33, 35, 158, 270, 271, 273, 275, 315
– образов 33, 36, 41, 108, 152, 174, 225, 250, 260, 262, 273, 275, 290, 327
распределение вероятностей 176, 225, 226, 245
рационализм 123, 155, 158
рациональность 39, 345, 361–363, 393, 418
– ограниченная 39, 362, 363
регрессионный анализ 403
– – множественный 404
редукционизм 121, 122, 125, 129, 139, 154, 191, 243, 367, 391, 425
рекурсивность *см.* вычислимость
Решатель Общих Задач (РОЗ) *см.* программа «Решатель Общих Задач» (РОЗ)
решение проблем 314, 363
Римский клуб 416
робот 21, 104, 230, 261, 278, 316, 329, 384, 394
робототехника 260, 277, 296, 305, 313, 315, 328
роевой интеллект 383, 391, 393
рост знаний 415
рынок 353, 355, 364, 385, 422
рыночные цены *см.* цены рыночные

Самоадаптация 108, 395, 398, 399
самоанализ 157, 190, 232, 341
самовоспроизводство 123, 136, 260, 412, 413
самовосстановление 103
самоизлечение 395, 398
самоконструирующиеся материалы 29, 43, 102
самоконсультация 395
самоконфигурация 395, 399
самоорганизация 7–9, 11, 16, 29, 31, 33, 35, 38, 93, 102, 123, 129, 138, 139, 170, 172, 173, 183, 206, 209, 250, 255, 332, 335, 347, 359, 360, 366, 367, 394, 417, 420
– диссипативная 9, 24, 29, 31, 93–95, 108, 119, 131, 138, 275, 325, 406
– консервативная 24, 29, 108, 172, 175, 275
самоотносимость 318, 392, 417
саморефлексия 34, 152, 189, 190, 194, 395
самосборка 105, 106
самосогласованность 221
самосознание 33, 34, 152, 190, 206, 318
сбор данных 30, 43, 110, 111, 157, 353
сверху вниз стратегия *см.* стратегия сверху вниз
свобода *см.* причинность свободы
связывания проблема *см.* проблема связывания

связь, передача информации 11, 256, 331
сенсорное пространство состояний *см.* пространство состояний сенсорное
сенсорно-двигательная координация 166, 167
сердце 122, 144, 145, 153, 154, 335
сетчатка 166, 180, 181, 188, 225, 261, 308, 310–312
сеть автоассоциативная 172
– ассоциативная 160, 161, 171, 172
– бронхиальная 145
– булевская *см.* булевская сеть
– глобальная 331
– двухслойная 168, 312
– информационная 38, 368, 383–385, 388, 424, 425
– клеточная нейронная *см.* клеточная нейронная сеть (КНС)
– МакКаллоха–Питтса 251, 252, 261
– мина–камень 266
– многослойная 35, 168, 178, 181, 184, 264, 265, 390
– мобильная 393, 398
– нейронная 16, 22, 33, 35, 38, 41, 153, 160, 162, 165, 167–169, 172, 173, 176, 178, 179, 181, 184, 186, 195, 216, 260, 262, 266, 268, 269, 278, 279, 287, 291, 307–310, 315, 331, 384, 390, 391, 409
– нелинейная *см.* клеточная нейронная сеть (КНС)
– обратной связи 171
– однородная 35, 179, 270
– однослойная 265
– прямой связи 267, 269
– с биологической обработкой импульсов 307, 308
– сложная 25, 136, 137, 144, 147, 157, 160, 173, 193, 239, 268, 306, 308, 310, 383, 398, 410
– сосудистая 144
– трехслойная 168, 169
симбиоз 32, 149
симметрия 27, 44, 46, 49, 52, 53, 55, 91, 96, 98, 143, 241, 290, 346
синапсы 35, 161–164, 193, 250, 435
– Хебба 161, 170
сингулярность 100, 101
синергетика 5, 7–10, 12, 14–18, 23–25, 30, 32, 33, 36–39, 196, 202, 271, 276, 278, 358, 359, 368, 373, 374
синергетический компьютер *см.* компьютер синергетический
система аксиоматическая 221, 223, 224, 341, 418
– вычислительная 16, 41, 110, 208, 224, 249, 260, 296, 315, 320, 383, 385, 392, 398, 399
– Гамильтона 62, 73, 75–77, 79, 81–84, 131
– гибридная 278, 315
– глобального позиционирования (GPS) 394, 395, 398, 399
– городская 370–373
– детерминированная *см.* детерминизм
– динамическая 30, 32–37, 43, 59–62, 67, 69, 73, 74, 78, 84, 87, 111, 112, 115, 118, 130, 174, 227, 228, 255, 270, 324, 352, 358
– диссипативная 27, 29–32, 38, 84, 86, 87, 95, 96, 108, 119, 131, 136, 139, 174, 255, 277, 325, 401
– замкнутая 31, 93, 119, 124, 125, 127, 128, 130, 141
– иммунная 136, 138, 327, 391
– инерциальная 63, 64
– интегрируемая 77
– интенциональная 201
– информационная 227, 315, 382–384, 387, 392, 399
– квантовая 27, 28, 40, 80–83, 228, 245–247, 249, 399
– клеточная 31, 34, 104, 142, 323
– консервативная 27, 73, 75, 76, 84, 359
– культурная 367
– Линденмайера 321
– линейная 9, 343
– Лоренца 113
– неинтегрируемая 77, 78, 84
– нелинейная сложная 24–26, 33–35, 39, 40, 131, 132, 255, 277, 278, 293, 360, 367, 421
– необратимая 27, 352
– неравновесная 17, 131
– нервная 11, 109, 127, 136, 154, 162–164, 166, 168, 173, 197, 290, 293, 394

система, основанная на знаниях 34, 208, 234, 239–241, 243, 244, 332, 405, 406
– открытая 29, 108, 131, 138, 140, 146, 191, 384, 406
–, подобная гиперциклам 133, 134, 136
– полная 139, 223
– самоотносимая 195
– сложная 23, 25–27, 29–34, 36, 37, 39, 41, 43, 96, 102, 105, 107, 108, 119, 128, 131, 136, 139, 144, 146, 147, 151–153, 156, 157, 161, 162, 171–174, 178, 183, 187, 190, 195, 196, 198–200, 206–208, 226, 253, 255, 259, 260, 262, 266, 271, 273, 277, 278, 289, 294, 309, 318–321, 323, 329, 331, 332, 335, 340, 342, 350, 352, 353, 356, 359, 361, 364, 366, 367, 372, 378, 382, 383, 392, 394, 409, 417, 421, 422, 425
– социальная 199, 357, 375, 381, 411, 417
– стохастическая 412
– хаотическая 82, 86, 116, 118, 228, 402, 407, 408
– хозяин – гость 107
– Хопфилда 35, 173, 174, 191, 269, 270, 275
– экологическая 26, 32, 148, 406
– экономическая 26, 38, 40, 111, 326, 330, 335, 343, 349, 353, 359, 423
– экспертная 208, 209, 230–235, 277, 278, 320
слизневик 32, 139, 140
сложная система *см.* система сложная
сложности теория 146, 152, 153, 163, 164, 168, 170, 195, 199, 217, 218, 220, 221, 224, 228, 249, 250, 271, 277, 278, 305, 331, 367, 379, 424
– – квантовая 208, 244
– – классическая 244
сложность 7, 9, 21, 22, 29, 43, 44, 47, 49, 53, 92, 119, 152, 187, 208, 214, 218, 221, 224, 258, 260, 330, 356, 366, 367, 394, 401, 410, 417
– алгоритмическая 34, 208, 212, 222, 223, 257
– вычислительная 223, 224, 227, 228, 329, 362, 364
– динамическая 21, 36, 118, 260, 292, 296, 300, 305
–, индекс 36, 296, 300, 302, 303
– размеров программ 208, 223, 224
слой входной 167, 168, 177, 265, 267, 390, 391
– выходной 168, 262, 265, 267, 277
– промежуточный 261, 264, 277
случайная динамика *см.* динамика случайная
– переменная 226, 227
случайность 21, 26, 35, 39, 41, 42, 208, 223, 224, 250, 257, 258, 280, 330, 347, 359, 361, 362, 365, 402, 403, 409, 421, 424, 426
снизу вверх стратегия *см.* стратегия снизу вверх
собственность 338, 339
сознание 16, 28, 33, 34, 120, 127, 152–157, 161, 187, 190, 191, 193–195, 198, 207, 244, 247–249, 308, 315, 318, 329, 339, 366, 392
соотношение неопределенностей 80, 82, 100–102, 128, 165, 343
состояние внешнее 33, 190
– внутреннее 33, 34, 190, 194
– квантовое 27, 28, 81, 82, 98, 226, 245, 246, 249
– макроскопическое 28, 30, 136, 248
– ментальное 33, 152–154, 157, 159, 162, 191, 193, 198, 204, 206, 207, 209, 249
– микроскопическое 125, 132, 133, 226
– неподвижное 85
– психологическое 198
– психосоматическое 198
– фазовое 71, 139, 273, 313, 406
– эмоциональное 58, 155, 198, 226, 315, 334
сосудистая сеть *см.* сеть сосудистая
сотрудничество 39, 380, 381, 424
социобиология 149, 356, 383, 391
социоконфигурация 37, 357, 358, 375, 376
социология 6, 11, 39, 40, 343, 373, 378, 379, 399
специальная теория относительности *см.* относительность, специальная теория относительности
справедливость 220, 332–334, 339, 341, 418, 420, 422
– дистрибутивная 333

справедливость коммутативная 333
справедливые цены *см.* цены справедливые
спрос и предложение 38, 40, 340, 400
статистическая значимость 404
степени свободы 10, 29, 30, 41, 77, 79, 92, 96, 126, 143, 198, 325, 335
степень предсказуемости 407
– сложности 21, 151, 157, 198, 208, 217, 228
стоическая философия *см.* философия стоиков
стратегии решения проблем 235
– – –, обратная цепочка вывода 235, 237
– – – «предположи и проверь» 238
– – –, прямая цепочка вывода 235
– – – «создай и проверь» 236
– – –, управляемая данными 239–241
– – –, – теорией 239, 241
стратегия сверху вниз 111, 163, 257, 271
– снизу вверх 163
стрела времени 126, 127
структура диссипативная 9, 40, 96, 98, 131, 132, 142, 143, 146, 147, 369, 370, 373, 381
– консервативная 146
– необратимая *см.* необратимость
– обратимая *см.* обратимость
суперобъединение 98
суперпозиция 28, 55, 82, 87, 228, 246–249

Телеология 31, 121–123, 128, 157, 212
телереальность 316
теорема, *H*-теорема 126
– КАМ 78
– Лиувилля 75, 84
– о неполноте 221
– о сходимости перцептрона 262
– полноты 229
теоремы о сингулярности 100
теория государства 330, 334
– графов 218, 219
– игр 343, 345–347
– информации 22, 35, 223, 224, 226, 228, 399
– суперструн 43, 98
– универсальности Фейгенбаума 89
термодинамика 29, 124, 125, 127, 128, 130, 176, 342, 357, 365
–, второе начало 31, 93, 119, 124–128, 130, 257, 258
– неравновесная 130, 290, 356
–, первое начало 124, 130
– равновесная 127, 132, 187, 270, 275, 330, 347
тест Тьюринга 317–319
техника эпициклов-деферентов 53–55
технический прогресс 348, 349
технология 8, 29, 35, 36, 110, 230, 277–279, 355, 359, 381, 401
– микросхем 260, 279, 280, 315
– СБИС 279, 294
томография 306, 309
топография 185
топологии сетей *см.* топология
топология 61, 124, 167, 172, 181, 248
– многообразий 77
– сети 186, 315, 390
тор 68, 70, 71, 77, 117, 352, 353
траектория 27, 43, 52, 55, 58, 60–62, 66–68, 71, 74, 77–79, 82, 84, 86, 87, 102, 111, 116, 129, 158, 169, 174, 349
– замкнутая 67, 147, 148
– периодическая 55, 148
трансплантация 36
транспьютер 312

Универсальная машина КНС *см.* клеточная нейронная сеть (КНС), универсальная машина (УМ КНС)
– – Тьюринга *см.* машина универсальная Тьюринга
управляемый целями *см.* решение проблем
управляющий параметр *см.* параметр управляющий
уравнение в частных производных 81, 280, 290
– дифференциальное 84, 85, 87, 91, 112, 117, 131, 259, 281, 287, 288, 290, 302, 410
– Лотки–Вольтерры 411
уравнение нелинейное 87, 90, 111, 203, 276, 290, 347, 364, 408

уравнение Шрёдингера 27, 28, 81–84, 128, 129, 245–247
– эволюции 30, 34, 138, 142, 148, 150, 152, 203, 273, 276, 330, 347, 352, 357, 359, 392, 411
уравнения Гамильтона 27, 73, 74
ускорение 51, 62, 67, 73, 372
условие Эйлера 219
утилитаризм 419

Фазовая плоскость 112, 113
– точка 71, 74
фазовое пространство 27, 60, 61, 69, 74, 75, 77, 82, 86, 114, 175, 353
– состояние *см.* состояние фазовое
фазовый переход 21, 29–33, 43, 90, 91, 97, 98, 196, 197, 270, 275, 330, 335, 339, 423
– портрет 60, 61, 67, 69, 71, 147, 354
фенотип 16, 320, 321, 414
ферромагнетик 29, 92, 97, 172, 173, 360
физика 7, 21, 26, 33, 43, 45, 50, 69, 80, 93, 97, 122, 128, 143, 152, 183, 185, 271, 273, 305, 320, 343
– единая релятивистская квантовая 100
– квантовая *см.* механика квантовая
– классическая 61, 66, 81, 244, 248, 257, 334, 338, 341, 403
– лазера 26, 39, 279
– ньютоновская 31, 330, 338, 339, 401
– спиновых стекол 35, 172, 260
– статистическая 91, 228, 373
– твердого тела 104, 191, 260
– элементарных частиц 48, 83, 96–98, 101, 102, 129, 226, 248, 249, 366
физикализм 26, 34, 37, 129, 176, 191, 331, 343
физиократы 330, 337, 338, 368
физиология 35, 56, 122, 143, 159, 162, 186, 279, 306
филогенез 31, 181, 183
философия 6, 16, 25, 31, 33, 36, 46, 47, 49, 53, 56, 57, 62, 66, 122, 124, 156, 230, 243, 318, 331, 333, 335, 400, 415, 420, 422
– жизни 120, 121
– моральная *см.* этика
– науки 14, 239, 401, 415, 418
– природы 123, 154, 156
– разума 154–157, 190
– стоиков 57
филотаксис 139–141
флуктуация 31, 91, 96, 97, 101, 111, 119, 126, 128, 131, 132, 138, 150, 151, 172, 183, 196–198, 269, 271, 274, 355, 356, 369, 373, 387, 412
– инфоормации 386–389
– квантовая 100, 102
– случайная 355, 359, 360, 365, 408
форма 30, 49
фотосинтез 127, 204
фрактал 16, 116, 144, 145
фрактальная размерность 86, 116, 118
фуллерен 106, 110, 255
функция GENERATE AND TEST 236
– благосостояния 340
– булевская 137, 240, 263, 283, 286, 300
– волновая 27, 81, 82
– логистическая 348
– полезности 370, 420
– рекурсивная 216, 217, 236, 240
– сложная 164
– утилитарная 341, 419
– энергетическая 35
– энергии 78

Хаос 11, 21, 22, 31, 38, 41–43, 82–84, 90, 111, 113, 145, 208, 250, 258, 277, 324, 335, 347, 366, 394, 421, 424
– детерминированный 30, 79, 84, 255, 378, 401, 413
– квантовый 26, 43, 79, 82–84
химия 7, 26, 29, 33, 39, 40, 66, 69, 93, 103, 104, 107, 108, 127, 128, 152, 183, 241, 271, 273, 309, 316, 320, 321, 325, 329
– квантовая 128, 129
– супрамолекулярная 23, 24, 104, 105, 321
хозяин – гость система *см.* система хозяин – гость
Хопфилда система *см.* система Хопфилда

Целостность 129
цельная личность 392
ценность *см.* этика

центральная нервная система (ЦНС) 163, 164, 166, 183, 184, 198, 200, 225, 306, 308, 311
цены 269, 347, 355, 357–359, 361, 363, 364, 403
– естественные 340
– рыночные 340, 365
– справедливые 332, 333, 340
цикл деловой активности 349, 351, 353, 369, 370
– Кондратьева 400
циклический аденозинмонофосфат (цАМФ) 139

Часы 33, 65, 69–72
червоточины 102
Черча тезис 216, 217, 236
число Рейнольдса 93
– Рэлея 85
чистая прибыль 337, 338
чувствительность 36, 109, 114, 116, 127, 146, 228, 250, 261, 321, 325, 354, 407

Шрёдингеровский кот 247

Эволюция 21, 25, 30
– биологическая 34, 36, 37, 44, 119, 127, 128, 132, 151, 183, 195, 199, 207, 209, 252, 261, 265, 325, 329, 331, 366, 368, 382, 395, 398, 414
– городов *см.* эволюция городская
– городская 371
– динамическая 244, 270, 277
– жизни 31, 32, 119, 391
– искусственная *см.* искусственная эволюция
– космическая 28, 96, 100, 248
– культурная 151, 164, 207, 382
– нелинейная 259
– по Дарвину 262
– пребиотическая 136
– социальная 381, 417
– социокультурная 368, 369, 381, 384, 393, 417, 426
– техническая 108, 209, 400, 420
– физическая 34, 125, 273, 275
– химическая 273, 275
– экологическая 151
– экономическая 330, 347–349, 370
эвристическое программирование *см.* программирование эвристическое
эгоизм 340, 341
эквивалентность массы и энергии 124
экологическая система *см.* система экологическая
экология 41, 121, 146, 150, 402, 421, 425
– вычислительная 383, 384
экономика 21, 22, 25, 39–41, 330, 333, 339–343, 348–350, 352, 353
– благосостояния 346, 419
– равновесная 343
– физиократов 335, 336
экономическая система *см.* система экономическая
– таблица 336, 337, 442
– циркуляция 335
экономический рост 341, 353, 354, 400
– человек 341, 347
экспертная система *см.* система экспертная
электродинамика 63, 64, 73
электротехника 35, 250, 279
элементарные частицы *см.* физика элементарных частиц
эмоциональное вычисление 315
эмоция *см.* состояние эмоциональное
энергетическая функция *см.* функция энергетическая
энергетический ландшафт 174, 175
энергия 27, 29, 45, 46, 66
энтелехия 31, 121, 154, 187, 211
энтропия 93, 125
– информационная *см.* информационная энтропия
– КС *см.* Колмогоров–Синай (КС), энтропия
– относительная 226
эпидемиология 410
эпистемология 21, 35, 41, 42, 76, 158, 190, 198, 305, 317, 338, 339, 417, 418, 425
этика 42, 332, 339, 400, 401, 417–420, 424, 425
– трансцендентальная 425
– утилитарная 339
эффект Эдипа 409

Язык программирования 158, 209, 397
– – HTML 386
– – Java 393, 397
– – LISP 224, 229, 230, 236, 239, 240, 242, 244
– – PROLOG 230, 244
– – типа C 292
ямка 180

ANALOGY *см.* программа ANALOGY
ars inveniendi 211
– iudicandi 211

BACON *см.* программа BACON
bellum omnium contra omnes 334

DALTON *см.* программа DALTON
DENDRAL *см.* программа DENDRAL

ELIZA *см.* программа ELIZA
EURISKO *см.* программа EURISKO

GENESYS *см.* программа GENESYS
GLAUBER *см.* программа GLAUBER

H-теорема *см.* теорема, *H*-теорема

KEKADA *см.* программа KEKADA

L-система *см.* система Линденмайера
LISP *см.* язык программирования LISP
LOGICAL THEORIST *см.* программа LOGICAL THEORIST

Mathesis universalis 208, 211, 212, 216, 217, 437
META-DENDRAL *см.* программа META-DENDRAL
MYCIN *см.* программа MYCIN

NETtalk 440
NP-задача 220, 221
NP-полная задача 221

P-задача 220, 221

SHRDLU *см.* программа SHRDLU
SIBYL *см.* программа SIBYL
STAHL *см.* программа STAHL
STUDENT *см.* программа STUDENT

USENET 385

URSS.ru URSS.ru URSS.ru URSS.ru

Уважаемые читатели! Уважаемые авторы!



Наше издательство специализируется на выпуске научной и учебной литературы, в том числе монографий, журналов, трудов ученых Российской академии наук, научно-исследовательских институтов и учебных заведений. 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 «Синергетика: от прошлого к будущему»

Пенроуз Р. **НОВЫЙ УМ КОРОЛЯ. О компьютерах, мышлении и законах физики.**
Хакен Г. **Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам.**
Малинецкий Г. Г. **Математические основы синергетики.**
Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. **Нелинейная динамика и хаос: основные понятия.**
Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б., Подлазов А. В. **Нелинейная динамика.**
Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. **Синергетика и прогнозы будущего.**
Малинецкий Г. Г. (ред.) **Будущее России в зеркале синергетики.**
Малинецкий Г. Г. (ред.) **Синергетика: Исследования и технологии.**
Арнольд В. И. **Теория катастроф.**
Климонтович Ю. Л. **Турбулентное движение и структура хаоса.**
Безручко Б. П. и др. **Путь в синергетику. Экскурс в десяти лекциях.**
Данилов Ю. А. **Лекции по нелинейной динамике. Элементарное введение.**
Трубецков Д. И. **Введение в синергетику.** В 2 кн.: **Колебания и волны; Хаос и структуры.**
Князева Е. Н., Курдюмов С. П. **Основания синергетики.** Кн. 1, 2.
Князева Е. Н., Курдюмов С. П. **Синергетика: нелинейность времени и ландшафты коэволюции.**
Быков В. И. **Моделирование критических явлений в химической кинетике.**
Чумаченко Е. Н., Смирнов О. М., Цепин М. А. **Сверхпластичность: материалы, теория, технологии.**
Редько В. Г. **Эволюция, нейронные сети, интеллект.**
Чернавский Д. С. **Синергетика и информация (динамическая теория информации).**
Баранцев Р. Г. **Синергетика в современном естествознании.**
Андрианов И. В., Баранцев Р. Г., Маневич Л. И. **Асимптотическая математика и синергетика.**
Анищенко В. С. **Знакомство с нелинейной динамикой.**
Тюкин И. Ю., Терехов В. А. **Адаптация в нелинейных динамических системах.**
Васильков Г. В. **Эволюционная теория жизненного цикла механических систем.**
Долгоносов Б. М. **Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов.**
Гуц А. К., Фролова Ю. В. **Математические методы в социологии.**
Турчин П. В. **Историческая динамика. На пути к теоретической истории.**
Котов Ю. Б. **Новые математические подходы к задачам медицинской диагностики.**
Гельфанд И. М. и др. **Очерки о совместной работе математиков и врачей.**
Пригожин И. **Неравновесная статистическая механика.**
Пригожин И. **От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках.**
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.**
Суздалев И. П. **Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов.**

По всем вопросам Вы можете обратиться к нам:
***тел./факс* (499) 135–42–16, 135–42–46**
или *электронной почтой* URSS@URSS.ru
Полный каталог изданий представлен
в *интернет-магазине:* http://URSS.ru

Научная и учебная литература

URSS.ru URSS.ru URSS.ru URSS.ru