



НАУКИ ОБ
ИСКУССТВЕННОМ

Из классического наследия

Нобелевский
лауреат
Г. Саймон

НАУКИ
ОБ ИСКУССТВЕННОМ

Философия и методология науки

Информатика

Теория управления

Психология

Моделирование экономических, социальных
и биологических систем



УРСС



НАУКИ ОБ
ИСКУССТВЕННОМ

Herbert Simon

THE SCIENCES OF THE ARTIFICIAL

Г. Саймон

**НАУКИ ОБ
ИСКУССТВЕННОМ**

Перевод с английского
Э.Л. Наппельбаума

Издание второе

Москва



УРСС

Редакционный совет серии:

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

Саймон Герберт

Науки об искусственном: Пер с англ. Изд. 2-е. — М.: Едиториал УРСС, 2004.
144 с. (Науки об искусственном.)

ISBN 5-354-00759-3

Герберт Саймон — один из виднейших американских специалистов по теории организаций, теории управления, теории принятия решений, эвристическому программированию.

Книга «Науки об искусственном» представляет собой цикл лекций, прочитанных Саймоном в Массачусетском технологическом институте и посвященных сравнению методологий изучения естественного и искусственного миров, психологии человеческого мышления и науке «конструирования». Она, бесспорно, заинтересует психологов, специалистов по управлению и всех тех, кто занимается вопросами моделирования экономических, социальных и биологических систем.

Издательство «Едиториал УРСС». 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 9.
Лицензия ИД № 05175 от 25.06.2001 г. Подписано к печати 07.04.2004 г.
Формат 60 × 90/16. Тираж 1500 экз. Печ. л. 9. Зак. № 2-1338/526.


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

ISBN 5-354-00759-3

© Едиториал УРСС, 2004

ИЗДАТЕЛЬСТВО УРСС
НАУЧНОЙ И УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

E-mail: URSS@URSS.ru
Каталог изданий
в Internet: <http://URSS.ru>
Тел./факс: 7 (095) 135-42-16
Тел./факс: 7 (095) 135-42-46



2502 ID 21191



9 785354 007592 >

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Конечно, междисциплинарную серию «Науки об искусственном» невозможно представить без одноименной книги выдающегося американского ученого Г. Саймона, который ввел в научный обиход сам термин “The Sciences of the artificial”, раскрыл особенности и выделил основные разделы общей теории конструирования искусственных объектов.

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

*Вице-президент Российской ассоциации искусственного интеллекта,
академик Российской академии естественных наук, лауреат премии
Президента России, доктор технических наук, профессор
Э. В. Попов*

Приглашение прочесть весной 1968 года в Массачусетском технологическом институте серию лекций из цикла, посвященного Карлу Тейлору Комптону, позволило мне публично высказать и до некоторой степени развить тезис, игравший решающую роль в моих работах сначала по теории организаций, затем по науке об управлении, а в последнее время по психологии.

Мой основной тезис состоит в том, что многие из наблюдаемых нами явлений «искусственные» в весьма специфическом смысле этого слова. Они таковы, каковы они есть, лишь потому, что вынуждены были для достижения определенных целей и решения определенных задач приспособиться к требованиям внешней среды. И если в естественных явлениях все выглядит «неизбежным», что вызвано непрерываемостью естественных законов, то на искусственных явлениях всегда лежит печать «свободы выбора» и подверженности внешним влияниям.

Такая необязательность формы искусственных явлений всегда вызвала сомнения в том, допустимо ли считать, что искусственное вообще поддается научному исследованию. Иногда подобные сомнения связывают в первую очередь с целенаправленным, или «телеологическим», характером искусственных систем и с вызванными этим трудностями распутывания клубка, в котором предписания и описания тесно переплелись между собой. Но, как мне кажется, главная трудность совсем не в этом. Суть проблемы, по-моему, в том, чтобы понять, каким образом вообще можно делать эмпирические утверждения о системах, которые были бы совсем иными, если бы изменились внешние условия их существования.

Тридцать лет назад, почти сразу же, как я приступил к исследованиям административных организаций, я столкнулся с проблемой искусственности в ее почти идеальной форме:

«...Администрирование в известной мере можно уподобить актерскому мастерству. Задача подлинного актера состоит в том, чтобы знать и исполнять роли, какими бы разными по своему внутреннему содержанию они ни были. Успех постановки зависит от качества пьесы и от того, насколько хорошо она сыграна. Эффективность процесса администрирования также зависит от качества организации и от той эффективности, с которой ее члены исполняют свои роли» [1].

Каким же образом следует строить теорию администрирования, которая содержала бы нечто большее, чем одни нормативные правила хорошей игры? В частности, как создать эмпирическую теорию? В более ранних работах по теории организаций, например в книге «Административное поведение», на которую я уже ссылался, и в четвертой главе другой моей книги, «Модели человека» [2], я пытался найти ответ на эти вопросы, показав, что эмпирическое содержание явлений (то есть все те необходимости, которые не видны из-за кажущейся свободы выбора) вытекает из неспособности поведенческой системы идеально приспособиться к окружающей среде, то есть из-за пределов ее рациональности, как я назвал эту неспособность.

В процессе исследований мне пришлось вторгнуться и в другие области знаний, в результате чего я постепенно пришел к заключению, что проблема искусственности не есть специфическая проблема теории организаций и административного поведения, а затрагивает гораздо более широкий спектр дисциплин. Например, экономику, в которой благодаря принятому постулату рациональности экономического поведения человека все люди оказываются выдающимися актерами: на основании их поведения мы можем делать кое-какие выводы о требованиях, предъявляемых внешней средой, но совершенно ничего не узнаем о структуре их подсознательной деятельности. Но в таком случае эта проблема выходит за рамки экономики и охватывает те разделы психологии, которые занимаются рациональным поведением человека — его мышлением, решением задач и обучением.

Наконец, как мне показалось, я начал понимать, что проблема искусственности позволяет раскрыть те трудности, с которыми мы сталкиваемся при попытках наполнения инженерных наук и других профессиональных знаний эмпирическими и теоретическими сведениями, выходящими за рамки непосредственно связанных с ними наук. Техника, медицина, промышленность и торговля, архитектура и живопись имеют дело не с непреложно данным, а с условным и зависящим от обстоятельств — не с тем, каковы вещи, а с тем, какими им следует быть, — короче говоря, с «конструированием». И возможность создания науки (или наук) о конструировании в точности соответствует возможности создания науки об искусственном: если возможно одно, то возможно и другое.

В настоящих заметках я попытаюсь не только показать возможность создания науки об искусственном, но и проиллюстрировать ее характер. Я не стал привлекать для этого примеры из теории административного поведения, теории организаций или экономики, так как подробно останавливался на этих вопросах в других работах. Вместо этого, особенно во второй и третьей главах, я заимствовал основные примеры из области психологии познания и технического конструирования. А поскольку Карл Комптон был не только выдающимся ученым, но и выдающимся педагогом инженерного профиля, мне показалось уместным использовать полученные выводы для того, чтобы предложить реорганизацию системы инженерно-технического образования.

По мере чтения этой книги читатель убедится, что искусственность ставит интересные проблемы главным образом в тех случаях, когда дело касается сложных систем, действующих в сложных внешних условиях. Искусственность и сложность всегда тесно связаны и переплетены между собой. Вот почему я позволил себе включить в книгу мою раннюю статью «Архитектура сложности» [3], подробно развивающую некоторые идеи, которых я лишь бегло коснулся в этих лекциях.

Я старался отдать должное другим авторам, писавшим по этим вопросам, в подстрочных примечаниях к соответствующим местам книги и в библиографии. Но в гораздо большей степени я должен выразить благодарность Аллеву Ньюэллу, совместно с которым я работаю над большинством исследований свыше десяти лет и которому я и

посвящаю эту книгу. И если в ней есть мысли, с которыми он не согласен, то вероятнее всего они ошибочны, хотя он разделяет со мной ответственность за все остальное.

Ли У. Грегг, безусловно, заметит, что многие положения, особенно во второй главе книги, обязаны своим происхождением нашей совместной с ним работе. Да и вообще на многих страницах этой книги можно найти отпечатки пальцев большого числа моих коллег, нынешних и бывших аспирантов и студентов. Среди них я хочу особо упомянуть Стивена Коулза, Эдварда Фейгенбаума, Джона Грейсона, Роберта Линдсея и др., чьи работы имеют самое непосредственное отношение к затронутым здесь вопросам.

Мир естественного и мир искусственного

Сегодня, примерно через три столетия после Ньютона, мы прекрасно знаем, что такое естественные науки, и особенно хорошо — чем занимаются физика и биология. Всякая естественная наука — это совокупность знаний о некотором классе вещей: объектов или явлений нашего мира, о свойствах и характеристиках, которыми они обладают, о том, как они себя ведут и как взаимодействуют друг с другом.

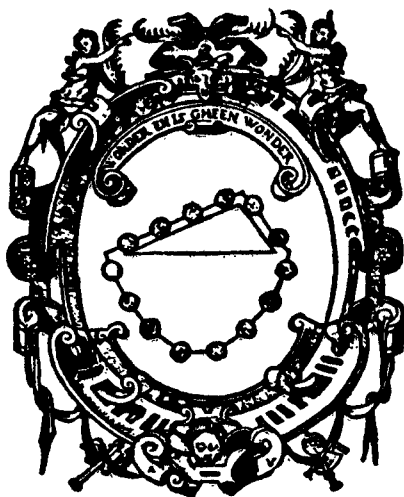
Главная цель любой естественной науки состоит в том, чтобы свести удивительное к обычному; чтобы показать, что сложность, если смотреть на нее под верным углом зрения, оказывается всего лишь замаскированной простотой; чтобы открыть закономерности, скрывающиеся в кажущемся хаосе. Симон Стевин, один из первых голландских физиков, с помощью изящной диаграммы (рис. 1) показал, что закон наклонных плоскостей «самоочевидным образом» вытекает из невозможности вечного движения. Действительно, опыт и здравый смысл подсказывают нам, что цепь с шариками, изображенная на рисунке, не будет двигаться вправо или влево, а останется неподвижной. (В самом деле, сдвинув цепь на один шарик, мы ничего не изменим на рисунке; поэтому, если бы цепь сдвинулась с места, она продолжала бы двигаться вечно.) А так как свисающая часть цепи симметрична, ее можно вовсе удалить, не нарушив равновесия. Но тогда шары на длинной стороне будут уравновешивать шары на короткой, более крутой стороне, а их относительное число обратно пропорционально синусам углов наклона соответствующих плоскостей.

Стевину так понравилось это построение, что он заключил его в виньетку, а сверху украсил девизом:

Wonder, en is gheen wonder,

что означает «удивительно, но не непостижимо».

Задача естественных наук как раз и состоит в том, чтобы показать, что удивительное не непостижимо, показать, как его можно достигнуть, не разрушая удивления. Ибо стоит нам объяснить удивительное, обнаружить скрытые закономерности, как рождается новое удивление, удив-



Р и с . 1. Закон наклонных плоскостей. Виньетка, придуманная Симоном Стевином в качестве иллюстрации доказательства этого закона.

ление перед тем, как из простоты возникает сложность. Эстетика естественных наук и математики созвучна эстетике музыки и живописи — и та и другая зиждутся на обнажении скрытой гармонии.

Мир, в котором мы живем, в значительно большей мере является творением человеческих рук, чем природы, это гораздо более искусственный, нежели естественный мир. Почти каждый элемент окружающего мира несет на себе следы человеческой деятельности. Температура среды, в которой мы проводим большую часть своей жизни, искусственно поддерживается на уровне 20 градусов; мы искусственно повышаем или понижаем влажность воздуха,

которым дышим, а вредные примеси, которые попадают в наш организм при дыхании, также в значительной степени являются продуктом деятельности человека (и им же затем отфильтровываются).

Более того, для большинства из нас — я говорю о работниках умственного труда — существенную часть внешнего мира образуют цепочки артефактов, называемых «символами», которые мы воспринимаем зрительно или на слух в виде письменной или устной речи и сами выплескиваем во внешний мир — как и я это сейчас делаю — при помощи рта или рук. Законы, управляющие этими цепочками символов, определяющие моменты времени, когда мы их воспринимаем или посылаем, регламентирующие их содержание, сами являются результатом наших коллективных «искусственных» действий.

Можно возразить, что я преувеличиваю искусственность нашего мира. Человек вынужден подчиняться законам тяготения столь же непреложно, как и камень; кроме того, он представляет собой живой организм, зависящий — через питание и многое другое — от мира биологических явлений. Я согласен признать себя виновным в преувеличении, но настаиваю на том, что оно весьма незначительно. Разумеется, правильно, что космонавт или летчик, будучи частью природы, подчиняются законам тяготения. Но при этом надо все же уточнить, что именно мы имеем в виду, когда говорим, что нечто «подчиняется» естественным законам. Аристотель не считал естественным, чтобы тяжелые предметы взлетали вверх, а легкие падали вниз (Физика, книга IV), так что, по-видимому, наше понимание «естественного» глубже, чем аристотелевское.

Не меньшую осторожность следует проявлять, приравнивая «естественному» все «биологическое». Лес, например, — явление природы, но о ферме этого никак сказать нельзя. Даже виды животных и растений, от которых зависит пропитание человека — хлебные злаки и породы скота, — являются результатом его творческой деятельности, принадлежат к миру «искусственного». Вспаханное поле в столь же малой (или, если угодно, в столь же большой) степени можно считать элементом природы, как и асфальтированное шоссе.

Приведенные примеры проясняют суть нашей проблемы, ибо то, что мы отнесли к разряду искусственного, остается частью природы. Искусственное не может игнориро-

вать или нарушать законы природы. Но в то же время оно приспособлено к целям человека и его задачам. Оно имеет тот или иной вид именно потому, что в этом виде удовлетворяет стремлениям человека летать или хорошо питаться. Изменяются цели человека — изменяются и окружающие его артефакты, и наоборот.

И коль скоро научное исследование призвано охватить все эти объекты и явления, в которых воплощены не только законы природы, но и человеческие цели, необходимо научиться связывать эти две разноплановые составляющие. Выяснение характера этих связей и их влияния на определенные области знания — в первую очередь на психологию и инженерное дело — и составляет главную тему первых трех глав нашей книги.

Об искусственном

Итак, естественные науки — это знания об естественных объектах и явлениях. Зададим себе вопрос: нельзя ли создать «науки об искусственном», то есть знания об искусственных объектах и явлениях? К сожалению, выражение «искусственный» несет на себе налет осуждения, от которого мы должны избавиться, прежде чем двинемся дальше.

В толковом словаре понятие «искусственное» определяется так: «созданное руками человека, а не природой; не настоящее, неестественное, притворное, не относящееся к сути дела». Синонимы: притворное, поддельное, сделанное, неискреннее, лицемерное, показное, нарочитое, фальшивое, сфабрикованное, неестественное; антонимы: настоящее, неподдельное, подлинное, природное, естественное, натуральное, реальное, истинное.

По-видимому, в нашем языке отразилось глубокое недоверие человека к творениям рук своих. В мою задачу не входит оценка справедливости этого отношения или исследование его возможных психологических корней. Но мне хотелось бы подчеркнуть, что в этой книге я намерен пользоваться термином «искусственный» в как можно более нейтральном смысле слова — в смысле «сделанное человеком» в противовес природному¹.

¹ Хочу сразу же снять с себя ответственность за выбор именно этого термина. Выражение «искусственный интеллект», приведшее меня к нему, родилось в Массачусетском технологическом институ-

В определенных контекстах мы предпочитаем различать «искусственное» и «синтетическое». Например, украшение из цветного стекла, напоминающее по внешнему виду сапфир, мы называем искусственным, изготовленный же человеком камень, химически не отличающийся от сапфира, — синтетическим. Аналогичное различие часто делается между «искусственным» и «синтетическим» каучуком. Следовательно, некоторые искусственные предметы являются имитацией природных, но эта имитация может быть осуществлена либо на основе того же материала, из которого образован природный объект, либо на совсем другой основе.

Но как только наряду с понятием «искусственного» мы вводим понятие «синтетического», мы сразу вторгаемся в область инженерного мастерства. В самом деле, слово «синтетическое» часто используют в более широком смысле как «сконструированное» или собранное из нескольких частей. К инженерной области мы относим задачи «синтеза», в то время как наука занимается «анализом». Синтезированные, или искусственные, объекты — а точнее, создание новых искусственных объектов, обладающих желаемыми свойствами, — и есть главная цель инженерной деятельности и инженерных знаний. Инженер думает о том, какими *должны* быть вещи — с точки зрения достижения определенной *цели* или выполнения определенной *функции*. Поэтому наука об искусственном должна быть тесно связана с наукой об инженерной деятельности, но, как мы увидим в третьей главе, это совсем не то, что обычно понимают под «техническими науками».

Вместе с понятиями цели и «долженствования» мы вносим в нашу картину мира также различие между нормативным и описательным. Естественные науки нашли пути к исключению нормативного, что позволило им сосредото-

те (МТИ). Наша исследовательская группа предпочитала выражения вроде «обработка сложной информации» или «имитация познавательных процессов». Но при этом мы столкнулись с новыми терминологическими трудностями, так как словарь говорит, что «имитировать» значит «быть или становиться внешне, по форме похожим, не затрагивая сущности; подражать; притворяться; подделывать». Так или иначе, термин «искусственный интеллект», по-видимому, прижился, и очистить его от предвзятого смысла, наверное, легче, чем вовсе отказаться от него. Со временем он станет достаточно идиоматичным и перестанет служить мишенью для любителей дешевой риторики.

точиться на том, каковы вещи в действительности. Можем и должны ли мы сохранить такое положение и при переходе от изучения естественных к изучению искусственных явлений, от анализа к синтезу¹?

Мы установили четыре признака, отличающих искусственное от естественного, и, следовательно, уже можем наметить границы науки об искусственном:

1. Искусственные объекты конструируются (хотя и не всегда вполне преднамеренно) человеком.

2. Искусственные объекты могут внешне походить на естественные, но существенно отличаться от последних в одном или нескольких аспектах.

3. Искусственные объекты можно охарактеризовать их функциями, целями и степенью приспособления к требованиям среды.

4. Искусственные объекты часто, особенно при их проектировании, рассматриваются не только в описательных терминах, но и с точки зрения категории «долженствования».

Формирующая роль внешней среды

Приглядимся внимательнее к функциональному или целевому аспекту искусственного. Когда говорят о назначении объекта или приспособлении его к определенным целям, имеют в виду взаимосвязь трех факторов: назначения или цели, природы артефакта и характера внешней среды, в которой этот артефакт функционирует. Например, когда мы думаем о часах с точки зрения их назначения, мы вполне можем воспользоваться детским определением: «часы показывают время». Но если мы сосредоточиваем внимание на самих часах, мы, наверное, станем описывать их,

¹ На этом вопросе я подробнее останавливаюсь в третьей главе. Но чтобы не оставлять читателя пока в полном неведении, укажу здесь, что придерживаюсь позиции наивного позитивизма и считаю, как и в гл. III работы [1], что «должное» не может быть сведено к «сущему». Подобная точка зрения полностью согласуется со стремлением рассматривать естественные и искусственные целенаправленные системы как явления, подлежащие изучению вне зависимости от их целей ([1], приложение). Об этом говорится также в статье А. Розенблюта, Н. Винера и Дж. Байджлоу «Поведение, цель и телеология», опубликованной в журнале *Philosophy of Science*, 10, 18—24 (1943).

рассказывая о взаимном расположении зубчатых колес, о действии упругих сил пружины или силы тяжести на гири или маятник.

Однако часы можно рассматривать и по отношению к внешней среде, в которой их предполагается использовать. Солнечные часы на деле выполняют свою функцию лишь в районах с обилием солнечного света — гораздо больше смысла использовать их, например, в Фениксе, чем в Бостоне, а в условиях полярной зимы они и вовсе бесполезны. Изобретение часов, которые и на корабле во время сильнейшей качки могли показывать время с достаточной для определения долготы точностью, было одним из выдающихся достижений научной мысли XVIII века. Чтобы выполнять свои функции в подобных условиях, морские часы должны были обладать рядом особых свойств, многие из которых, как правило, не существенны для «сухопутных» часов.

Естественные науки имеют точки соприкосновения с артефактом в двух из указанных выше трех аспектов: в структуре самого артефакта и во внешней среде, в которой он действует. Будут ли часы действительно показывать время, зависит от их внутреннего устройства и от того, в каких условиях они функционируют. Режущие свойства ножа зависят как от материала, из которого изготовлено его лезвие, так и от твердости предмета, который им собираются резать.

Артефакт как «связующее звено»

Описанная ситуация вполне симметрична. Артефакт можно рассматривать как своеобразную «точку встречи», как связующее звено между «внутренней» средой — материалом и структурой самого артефакта, — и «внешней» средой — окружением, в котором он работает. Если внутренняя среда соответствует внешней, и наоборот, артефакт отвечает своему назначению. Так, если часы не чувствительны к качке, они могут служить корабельным хронометром. (Если же они не обладают этим свойством, лучше повесить их над камином.)

Отметим, что такой подход к артефактам можно с равным успехом применить и ко многим объектам, не сделанным руками человека, — по существу, ко всем объектам, которые можно считать «приспособленными» к определен-

ной ситуации, — и в частности, к живым системам, сформировавшимся в ходе органической эволюции. Теория самолета опирается на естественные науки, когда объясняет поведение его внутренней среды (например, работу авиационного двигателя), его внешней среды (свойства атмосферы на различных высотах) и отношения между внутренней и внешней средами (аэродинамика движущихся поверхностей). Ноточно на такие же части можно расчленить и теорию полета птиц¹.

Одиночный самолет или одиночную птицу можно исследовать с помощью методов естественных наук, не уделяя особого внимания их целям или условиям адаптации и не упоминая о связях между тем, что я назвал «внутренней» и «внешней» средами. В конечном итоге их поведение определяется законами природы столь же непреложно, как и все другое (по крайней мере мы все уверены, что это справедливо в отношении самолета, и большинство из нас верит в то, что это справедливо и для птицы).

Функциональное описание

При изучении самолета или птицы не обязательно проводить такое разделение на внутреннюю и внешнюю среды, но такой подход оказывается весьма удобным. Это объясняется несколькими причинами, которые мы попытаемся выяснить на ряде примеров.

Многие животные, обитающие в полярных областях, имеют белый мех. Обычно мы объясняем это тем, что белый цвет наилучшим образом подходит для арктических условий существования, ибо на снегу белым животным легче оставаться незамеченными. Однако это, конечно, не естественнонаучное объяснение, ибо содержит ссылку на цели и функции. По сути дела, при таком объяснении лишь констатируется, что таковы должны быть организмы, которые хорошо отвечают данным условиям, то есть кото-

¹ Обобщая приведенные рассуждения относительно деления на «внешнюю» и «внутреннюю» среды, мы приходим к выводу о том, что возможность подобного разделения в большей или меньшей степени присуща всем сложным и большим системам, как естественным, так и искусственным. В своей обобщенной форме это служит аргументом в пользу того, что природа в целом организована по «уровням». В четвертой главе «Архитектура сложности» я останавливаюсь на этом подробнее.

рые способны выжить в условиях такого рода внешней среды. Для того чтобы эта констатация превратилась в объяснение, необходимо дополнительно ввести еще понятие естественного отбора или какого-либо аналогичного механизма.

Важная черта объяснений такого рода состоит в том, что они в первую очередь обращают внимание на свойства внешней среды. Глядя на заснеженные ландшафты, мы без труда можем предсказать преобладающий цвет обитающих здесь животных. При этом нам едва ли требуется знать что-либо о биологии этих животных, помимо того, что они часто враждуют друг с другом, используют зрительную информацию при формировании своего поведения и приспособляются к внешней среде (благодаря естественному отбору или какому-либо другому механизму).

В науках о поведении человека принцип рациональности играет такую же роль, какую естественный отбор играет в биологической эволюции. Зная о каком-то промышленном предприятии лишь то, что оно стремится к достижению максимальной прибыли, мы часто можем предсказать изменение его поведения при определенном изменении внешней среды — например, как оно изменит цены на свою продукцию, если ее обложить налогом. Мы можем сделать такой прогноз (и этим постоянно занимаются экономисты) без каких-либо детальных предположений о механизме адаптации предприятия, то есть о механизме принятия решений, образующем внутреннюю среду рассматриваемого предприятия.

Следовательно, первое преимущество разграничения внутренней среды от внешней при изучении адаптивных или искусственных систем заключается в том, что оно часто позволяет предсказывать поведение системы лишь на основании ее целей и характеристик внешней среды при минимальных предположениях о характере внутренней среды. Именно поэтому нередко встречаются ситуации, в которых идентичные или сходные цели в одинаковых или близких условиях достигаются с помощью совершенно различных сред — это относится к самолетам и птицам, дельфинам и тунцам, гиревым и пружинным часам, электромеханическим реле и бесконтактным переключателям.

Аналогичные преимущества часто может дать и разграничение, делающее основной упор на внутреннюю среду системы. В очень многих случаях ответ на вопрос, до-

бьется ли система поставленной цели, приспособится ли она к внешним условиям, зависит от отдельных характеристик внешней среды, а вовсе не от деталей ее поведения. Такая способность самоприспосабливающихся систем у биологов получила название гомеостаза. Это важное свойство большинства удачных конструкций, как биологических, так и искусственных. Как правило, конструктор стремится изолировать внутреннее содержание системы от внешнего окружения так, что инвариантность отношений между внутренней средой и целью сохраняется, невзирая на изменение большинства параметров, характеризующих внешнюю среду. Так, корабельный хронометр реагирует на качку лишь в отрицательном смысле, сохраняя при всех движениях корабля неизменным отношение между стрелками на циферблате и астрономическим временем.

Подобной квазинезависимости от внешнего мира можно добиться различными видами пассивной изоляции с помощью отрицательной обратной связи (наиболее известная форма такой изоляции), упреждающей адаптации или различных комбинаций указанных методов.

Функциональное описание и синтез

В самом лучшем из возможных миров (по крайней мере с точки зрения конструктора) можно даже надеяться на то, что нам удастся совместить достоинства описанных выше подходов, основанных на представлении самоприспосабливающейся системы как совокупности целей, внутренней среды и внешней среды. Можно надеяться, что мы сумеем охарактеризовать основные свойства системы и ее поведения, не вдаваясь в подробности устройства как внешней, так и внутренней среды. В перспективе видится создание такой науки об искусственном, которая в самом факте относительной простоты взаимосвязи внешнего и внутреннего найдет основной источник абстрагирования и обобщения.

Рассмотрим задачу конструирования физического устройства, предназначенного служить счетчиком. Если мы хотим, чтобы устройство считало до тысячи, необходимо, чтобы оно могло принимать любое из по меньшей мере тысячи состояний, чтобы оно могло оставаться в каждом таком состоянии столько времени, сколько потребуется, и чтобы оно обладало способностью переходить из одного

состояния в другое. Существуют десятки внутренних сред, которыми для этого можно пользоваться (и которые фактически уже использовались). Например, это может быть колесо, разделенное отметками через каждые 20 угловых секунд и снабженное храповым механизмом, позволяющим поворачивать его и закреплять на месте. С тем же успехом можно использовать и систему из десяти электрических переключателей, схема соединения которых позволяет представлять двоичные числа. В наши дни мы переключателям наверняка предпочтем транзисторы или другие бесконтактные устройства¹.

Подобный счетчик будет приводиться в действие импульсом, приходящим из внешней среды. Природа импульса может быть различной; в зависимости от конструкции счетчика импульс может быть либо механическим, либо электрическим. Но при введении соответствующего преобразователя, осуществляющего связь между двумя средами, физический характер этого внутреннего импульса уже не будет зависеть от физической природы импульса во внешней среде — счетчик можно будет заставить считать что угодно.

Описание искусственного устройства путем указания его организации и принципа работы — характера взаимосвязи между внутренней и внешней средами — составляет основную цель любой изобретательской и конструкторской деятельности. Инженеры легко поймут язык патентной заявки на усовершенствованный регулятор электродвигателя, относящейся к 1919 году:

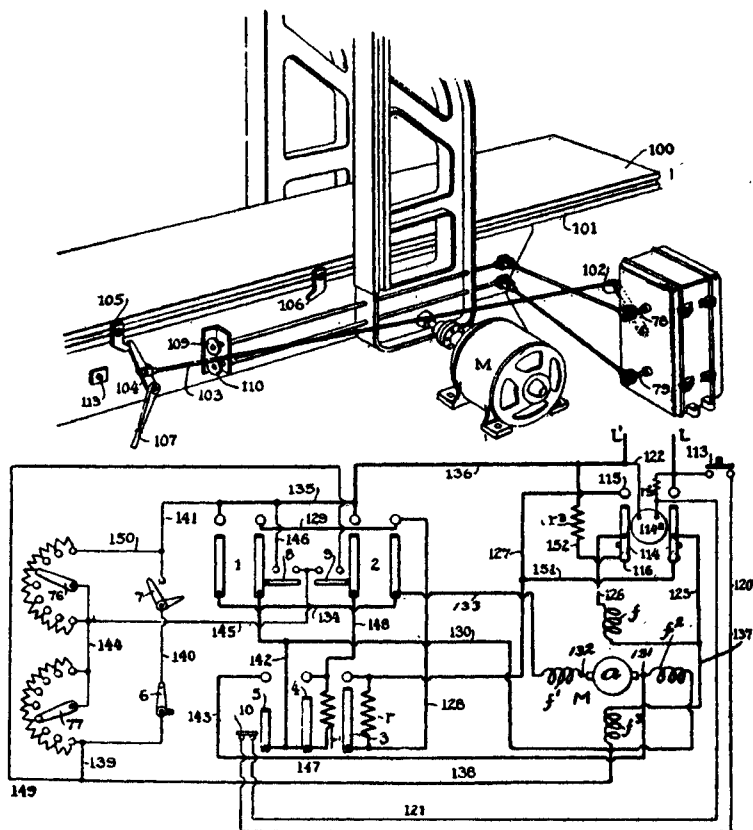
«Заявляю новизну и желаю закрепить за собой в соответствии с патентным правом следующее:

1. Использование в регуляторах электродвигателей комбинации средств реверсирования, постоянно действующих средств ослабления поля и управляемых вышеупомянутыми средствами реверсирования средств, обеспечивающих отключение средств ослабления поля на пусковой период и регулирование эффективности упомянутых средств в остальное время...»²

¹ Теория функциональной эквивалентности вычислительных машин за последние годы получила широкое развитие (см., например, [4]).

² Патент США № 1 307 836, выданный Артуру Саймону 24 июня 1919 года.

Из этого отрывка мы узнаём, что изобретение относится к регулированию электродвигателя, и это, пожалуй, все, что здесь говорится о конкретных объектах или явлениях. Зато упоминаются абстрактные «средства реверсирования» и «средства ослабления поля», назначение ко-



Р и с . 2. Иллюстрация из патента на регулятор электродвигателя.

торых проясняется в параграфе, предваряющем патентную заявку:

«Достоинства описываемого электродвигателя специального типа и возможностей его регулирования очевидны для специалистов. Среди них можно отметить обеспечение большого пускового момента и возможность быстрого реверсирования двигателя».

Предположим теперь, что рассматриваемый электродвигатель предназначается для строгального станка (рис. 2). Изобретатель так описывает его поведение:

«Работа регулятора иллюстрируется на примере строгального станка (100), приводящегося в действие электродвигателем M с регулятором, реагирующим на возвратно-поступательное движение стола (101) станка. Ведущий вал регулятора снабжен рычагом (102), соединенным рейкой (103) с рычагом (104), который в свою очередь закреплен на станине станка, и зацепляющимися кулачками (105) и (106) на столе станка. Легко понять, что описанное устройство обеспечивает перекидывание ведущего вала регулятора при возвратно-поступательном движении стола, а это обеспечивает селективное срабатывание реверсирующих переключателей (1) и (2) и автоматическое управление всеми остальными переключателями».

Итак, все свойства, которыми наделена внутренняя среда, оказываются подчиненными целям с учетом характера внешней среды. Такой электродвигатель будет периодически реверсироваться, реагируя на перемещения стола станка. Но «форма» его поведения — скажем, изменение во времени переменных, характеризующих работу двигателя, — окажется зависящей от «формы» внешней среды (в нашем случае от расстояния между кулачками на столе).

В описанном устройстве, как в капле воды, отражается природа артефактов. Главное для их описания — это цели, связывающие внутреннюю среду с внешней. Внутреннюю среду образуют естественные явления, организованные таким образом, чтобы обеспечивать достижение целей в определенном диапазоне внешних сред. Но обычно имеется много функционально эквивалентных естественных систем, которые могут быть для этого использованы.

Внешняя среда определяет условия достижения цели. Если внутренняя среда сконструирована правильно, она приспособится к внешней среде, и ее поведение в значительной степени будет определяться поведением последней — совершенно аналогично тому, что имеет место в случае «экономических субъектов». Для того чтобы предсказать это поведение, нам достаточно лишь спросить: «А как вела бы себя рационально сконструированная система в подобной ситуации?» Другими словами, поведение системы отражает форму целевой среды.

Пределы адаптации

Но, по-видимому, на деле все обстоит сложнее. «Если бы желания были конями, каждый бедняк скакал бы верхом». Если бы нам всегда удавалось найти такую внутреннюю систему, которая, подобно Протею, принимала бы форму, соответствующую поставленной задаче, — тогда «создавать» и «хотеть» стали бы синонимами. Слова «средство для обработки алмазов» определяют цель конструирования, которая в принципе может быть достигнута с использованием различных материалов. Но искомое средство не было создано до тех пор, пока не нашлась по крайней мере одна внутренняя среда, подчиняющаяся обычным законам природы, — в нашем случае один материал, достаточно твердый, чтобы оставлять царапины на алмазах.

Часто нам приходится довольствоваться лишь приближенным достижением цели конструирования. В таких случаях свойства внутренней системы как бы «вылезают наружу». Иными словами, поведение системы лишь частично отвечает поставленной цели, частично же оно отражает ограниченные возможности внутренней среды.

Так, описанный выше регулятор электродвигателя должен обеспечивать быстрое изменение направления вращения двигателя. Но двигатель подчиняется законам электромагнетизма и механики, и для такой системы легко указать задачу, в которой внешняя среда потребует от двигателя столь быстрого изменения направления вращения, что он с этим не справится. В благоприятной обстановке мы, наблюдая за двигателем, узнаем лишь, для чего он был предназначен, во враждебной же среде мы выясним и кое-что относящееся к его внутренней структуре, точнее говоря, к тем ее аспектам, которые оказывают решающее влияние на ограничение возможностей системы¹.

¹ Любопытно сравнить это рассуждение с утверждением о конструировании организационной системы, приведенным в работе [1]. «Следовательно, рациональность не определяет поведения. В пределах рациональности поведение абсолютно гибкое и приспособливается к возможностям, целям и знаниям. Поведение же, напротив, определяется иррациональными элементами, устанавливающими границы рациональности... Теория организационного управления должна заниматься пределами рациональности и тем, как организация воздействует на пределы рациональности действий принимающего решение лица».

В обычных условиях эксплуатации мост ведет себя просто как относительно ровная поверхность, по которой может передвигаться транспорт. И только в тех случаях, когда он перегружен, мы начинаем узнавать о физических свойствах материалов, из которых он построен.

Моделирование как орудие исследования

Слово «искусственное» содержит в себе некоторое предостережение; оно как бы говорит, что хотя мы воспринимаем естественный и искусственный объект одинаково, по сути дела они совершенно различны, то есть сходство их скорее внешнее, чем внутреннее. Пользуясь терминологией предыдущего раздела, можно сказать, что искусственный объект имитирует реальный, ибо по отношению к внешней системе он проявляет те же свойства, что и настоящий, приспособляясь при одинаковых целях к сравнимому многообразию внешних задач. Такая имитация становится возможной ввиду того, что различные физические системы можно организовать так, чтобы они обнаруживали практически идентичное поведение. Поведение демпфированной пружины и демпфированного электрического контура подчиняется одному и тому же линейному дифференциальному уравнению второго порядка. Поэтому мы можем использовать один из этих объектов для того, чтобы моделировать другой.

Принципы моделирования

Благодаря абстрактному характеру и общности языка вычислительных машин как устройств для манипуляции символами, цифровые вычислительные машины существенно расширили диапазон систем, поведение которых поддается имитации. Такую имитацию мы теперь обычно называем «моделированием» и стараемся разобраться в имитируемой системе, изучая поведение модели в разнообразных модельных или имитационных средах.

Моделирование как метод, позволяющий разобраться в поведении системы и предсказать его, было известно задолго до появления вычислительных машин. Гидродинамические модели и аэродинамические трубы давно зарекомендовали себя как ценные средства для исследования по-

ведения ольших систем на их уменьшенных моделях. Почти наверняка и при открытии закона Ома определенную роль сыграла аналогия с простыми гидравлическими явлениями.

Моделирование может даже принимать вид мысленного эксперимента, никогда не осуществляемого на практике. Одним из моих ярких воспоминаний о времени «великой депрессии» является висевшая в кабинете отца многоцветная диаграмма, представлявшая гидравлическую модель экономической системы (потоки денег и товаров в ней были представлены различными жидкостями). Насколько мне помнится, автором схемы был инженер Дальберг, отличавшийся, по-видимому, технократическими амбициями. В то время эта модель так и осталась на бумаге, но и в таком виде ею можно было воспользоваться для того, чтобы проследить логические последствия тех или иных экономических мер или событий (разумеется, при условии правильности положенной в ее основу теории).

По мере того как совершенствовалось мое формальное образование в области экономики, я все более пренебрежительно стал относиться к этой наивной модели и только после второй мировой войны узнал, что известный экономист, профессор Лернер, действительно построил такую гидравлическую модель. Эта модель под названием «Мониак» имитировала экономику, следуя теории Кейнса. Конечно, модель Лернера опиралась на теорию, более близкую к действительности, чем модель Дальберга, к тому же она не только была построена, но и работала. Однако и «Мониак», оказавшийся весьма полезным для целей преподавания, ничего не дал нам сверх того, что легко получалось из простой математической интерпретации теории Кейнса, и вскоре ценность этой модели была сведена к нулю появлением целого ряда более совершенных машинных моделей экономики.

Моделирование как источник новых знаний

Теперь мы вплотную подошли к главному вопросу, относящемуся к моделированию. *Может ли моделирование сказать нам нечто, чего мы не знали раньше?* Уже сама постановка вопроса как бы подсказывает ответ: не может. На самом деле имеется интересная параллель между утверждениями, которые часто приходится слышать относи-

тельно моделирования и вычислительных машин. Утверждения эти следующие:

1. Моделирование не лучше тех предположений, которые положены в его основу.

2. Вычислительная машина способна делать лишь то, что заложено в ее программу.

Я не стану оспаривать эти утверждения, так как оба они кажутся мне справедливыми. И все же моделирование может сказать нам нечто, чего мы до этого не знали.

Существуют два пути получения новых данных с помощью моделирования, и пути эти тесно связаны между собой. Первый из них очевиден, второй, по-видимому, не совсем. Очевидным является то, что даже в тех случаях, когда исходные посылки правильны, еще совсем не ясно, что же из них следует, и выяснить это далеко не просто. Все строгие рассуждения сводятся в конце концов всего лишь к огромной цепи тавтологий, но кому под силу извлечь из этого факта непосредственную пользу! И с какими мучениями и срывами нам приходится добираться до выводов из исходных предположений!

Можно, например, ожидать, что моделирование окажется мощным инструментом, который на основании наших знаний о механизмах, управляющих поведением газов, позволит создать метеорологическую теорию и сделает возможным предсказание погоды. Наверное, многие знают, что подобные попытки действительно предпринимаются уже на протяжении ряда лет. В чрезвычайно упрощенном виде суть их сводится к следующему: принимается, что нам уже известны правильные исходные положения (в данном случае локальные уравнения атмосферных явлений), но необходима вычислительная машина, чтобы установить, к чему приведет взаимодействие огромного числа переменных в условиях сложной конфигурации исходных данных. В таком виде эта идея представляет собой не более чем экстраполяцию (в масштабах, соответствующих возможностям современной вычислительной техники) той идеи, которой мы пользуемся при решении системы из двух алгебраических уравнений.

Описанный подход к моделированию находит широкое применение в задачах, связанных с техническим конструированием. Это вызвано тем, что для многих технических задач типична ситуация, когда внутренняя среда состоит

из элементов, фундаментальные законы поведения которых (механические, электрические или химические) хорошо известны. А трудность задачи заключается в невозможности проследить поведение этих элементов, собранных воедино.

Моделирование малоизученных систем

Большой интерес представляет другой вопрос: может ли моделирование оказаться полезным в тех случаях, когда мы еще не слишком хорошо знакомы с естественными законами, управляющими поведением внутренней среды? Мне бы хотелось показать, почему и на этот вопрос следует ответить утвердительно.

Прежде всего, позволю себе сделать предварительное замечание, которое сильно упростит дело. Нас редко интересует возможность объяснить или предсказать явления во всей их полноте. Обычно для нас значительно важнее знать лишь некоторые свойства, выделенные из явлений сложной действительности. Поясню свою мысль. Спутник, запущенный человеком, является, безусловно, искусственным объектом, но мы, как правило, не рассматриваем его как «модель» Луны или какой-нибудь планеты. Он просто подчиняется тем же законам физики, касающимся его инерционной и гравитационной массы, в отвлечении от большинства его прочих свойств. Он сам представляет собой одну из лун. Точно так же электрическая энергия, попадающая в мой дом из атомной электростанции в Шипингпорте, не «моделирует» энергию, которая генерируется тепловой электростанцией или ветровым движком. Любая из этих энергий подчиняется уравнениям Максвелла.

Чем больше мы хотим абстрагироваться от подробностей целой группы явлений, тем легче моделировать эти явления. Более того, нам не нужно знать или пытаться предугадать всю внутреннюю структуру системы, достаточно лишь той ее части, которая необходима для выбранного уровня абстракции.

В этом огромное наше преимущество. В противном случае вся наша стратегия продвижения от главного к частностям, на которой вот уже три столетия зиждутся естественные науки, оказалась бы невозможной. Мы знали об общих чертах физического и химического строения мате-

рии задолго до того, как получили представление о молекулах. Мы хорошо знали молекулярную химию до того, как познакомились с атомной теорией. Мы многое знали об атомах еще до того, как появилась теория элементарных частиц (если только считать, что сегодня эта теория существует).

Такое построение здания науки, напоминающее небоскреб, который строят с крыши и еще не довели до фундамента, стало возможным лишь потому, что поведение систем каждого уровня зависит только от очень приближенных (упрощенных, абстрагированных) характеристик системы следующего, более низкого уровня¹. К счастью, это так, ибо в противном случае безопасность наших мостов и самолетов зависела бы от «восьми возможных способов» представления элементарных частиц.

Искусственные системы, равно как и приспособляющиеся системы, обладают некоторыми свойствами, делающими их особенно удобными для упрощенного моделирования. Описание таких систем, данное в одном из предыдущих разделов, объясняет, почему это так. Возможность сходного поведения систем с различным внутренним устройством особенно полезна, если нас интересуют только те аспекты, которые вытекают из *организации* частей, независимо почти от всех (за малым исключением) свойств индивидуальных составляющих. Так, во многих случаях нас могут интересовать только те характеристики материала, которые сказываются на его сопротивлении растяжению или сжатию. При этом нам глубоко безразличен химический состав этого материала, нас даже не интересует, сталь это или дерево.

¹ Эта мысль полнее развивается в четвертой главе. Свыше полувека назад Бертран Рассел сделал аналогичное замечание об архитектуре математики. В предисловии к книге «Principia Mathematica» он пишет: «...Основной аргумент в пользу любой теории относительно оснований математики должен быть индуктивным, то есть заключаться в том, что эта теория позволяет нам вывести обычную математику. В математике наибольшая степень очевидности обычно обнаруживается не в самом начале, а позднее. Поэтому первые выводы, еще не достигшие уровня очевидности, скорее дают основания верить в посылки (так как из них следуют правильные выводы), чем укрепляют веру в следствия (так как они основаны на данных посылках)». Наблюдающееся ныне предпочтение дедуктивного формализма часто заставляет нас забывать об этом важном факторе, который сегодня не менее справедлив, чем он был в 1910 году.

Патент на регулятор электродвигателя, о котором говорилось выше, может служить иллюстрацией такого абстрагирования до уровня принципиальной организации. Это изобретение описывается как «комбинация» каких-то «средств изменения направления» и «средств ослабления поля», то есть элементов, задаваемых их функциями в рамках организованного целого. Но сколькими способами можно реверсировать двигатель или ослаблять напряженность поля? Мы можем моделировать систему, описанную в патентной заявке, самыми разными способами, весьма далекими от реального физического устройства, которое она отражает.

Достаточно небольшого дополнительного шага на пути абстрагирования, и эту патентную заявку можно будет сформулировать таким образом, чтобы она охватывала не только электрические, но и механические устройства. Вероятно, каждый студент, собирающийся стать инженером, сможет сконструировать механическую систему, которая будет сочетать в себе реверсивность и переменный пусковой момент и тем самым моделировать систему из нашего патента.

Вычислительная машина как искусственный объект

Ни одна из искусственных систем, придуманных человеком, не подходит для подобного рода функционального описания лучше, чем цифровая вычислительная машина. Это и в самом деле система-Протей, ибо почти все свойства ее поведения (при условии, что она правильно работает!) принадлежат к категории структурных. Скорость выполнения основных операций позволяет нам делать некоторые умозаключения о физике элементов и законах природы, которым они подчиняются. Например, данные о быстродействии машины сразу позволяют установить отсутствие некоторых видов «медленных» элементов. Что же касается остального, то практически ни одно интересное наблюдение, относящееся к работающей машине, не связано с конкретной природой ее элементов. Вычислительная машина представляет собой некую структуру элементарных функциональных компонентов, для которых с высокой степенью точности можно утверждать, что

на поведении системы как единого целого сказывается лишь характер функций, осуществляемых этими компонентами¹.

Вычислительная машина как абстрактный объект

Именно абстрактность поведения вычислительных машин, существенным образом облегчающая использование математики при их изучении, и привела кое-кого к ошибочному заключению, что если наука о вычислительных машинах будет создана, то это неизбежно будет математическая, а не эмпирическая наука. Остановимся подробнее на этих двух вопросах: на значении математики для вычислительных машин и на возможности их эмпирического исследования.

Некоторые важные теоретические исследования, начатые фон Нейманом, были посвящены надежности машин. Задача состояла в том, чтобы создать надежную систему из ненадежных частей. Любопытно: задача эта не ставилась как проблема физики или технологии. Предполагалось, что технолог, выпускающий элементы, сделал все от него зависящее. И тем не менее элементы получились ненадежными! С ненадежностью можно справиться только путем правильной организации этих элементов.

Для того чтобы поставленная задача стала содержательной, придется несколько задержаться на природе ненадежных частей машины. Как известно, любую машину можно собрать из простых основных элементов разного типа. Например, в качестве таких элементарных частей можно взять так называемые нейроны Маккаллока — Питтса. Как подсказывает само название, эти элементы призваны повторять предполагаемые анатомические и функциональные характеристики нейронов мозга, но в сильно абстрагированном виде. С формальной точки зрения они изоморфны переключающим схемам простейшего типа — схемам И, ИЛИ и НЕ. Предположим, что система строится из таких элементов и что у каждого элемента имеется определенная вероятность оказаться неисправным. Тогда наша задача сведется к тому, чтобы так организовать эти

¹ По теме этого и последующего разделов см. уже цитированную выше книгу М. Миньского и статью Дж. фон Неймана «Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных элементов» (сб. «Автоматы» под ред. К. Шеннона и Дж. Маккарти, М., ИЛ, 1956).

элементы и их взаимосвязи, чтобы вся система в целом работала надежно.

При этом для нас чрезвычайно важно, что компонентами могут быть как нейроны, так и реле или транзисторы. Законы природы, управляющие поведением реле, превосходно известны, в то время как законы поведения нейронов известны лишь весьма приблизительно. Но для нас это не существенно, так как для нашей теории главное в том, что элементы обладают определенным уровнем ненадежности и должны быть связаны друг с другом некоторым заданным образом.

Приведенный пример показывает, что возможность создания математической теории поведения некоторой системы или моделирования этой системы не всегда зависит от того, есть ли в нашем распоряжении адекватная микротехника законов природы, управляющих элементами. Может оказаться, что такая микротехника вообще не имеет отношения к делу.

Вычислительная машина как объект для экспериментирования

Перейдем теперь к вопросу о существовании эмпирической науки о вычислительных машинах — о машинах, а не о физике твердого тела или физиологии ее элементов. Можно считать вполне установленным фактом, что почти все машины, построенные до настоящего времени, имеют много общего в принципах своей организации. Почти в каждой из них можно выделить активное операционное устройство (*mill* — «мельница» в машине Бэббиджа) и запоминающее устройство (*store* — «склад» по терминологии Бэббиджа), а также устройства ввода и вывода данных. (Некоторые крупные системы, подобно колониям водорослей, состоят из меньших систем; каждая из них в свою очередь содержит все или только часть составляющих. Но в данном случае я намеренно упростил ситуацию.) Все они в состоянии запоминать символы (программы), которые могут интерпретироваться управляющим устройством и претворяться в жизнь. Почти все они обладают чрезвычайно ограниченными возможностями делать что-то одновременно, параллельно. По самой своей сути это системы, способные делать за один прием только одно дело.

Обычно для того, чтобы с символами можно было что-то предпринять, их прежде всего необходимо перевести из внешних запоминающих устройств большой емкости в операционное. Наконец все машины умеют выполнять лишь простейшие базовые операции: запоминать символы, переписывать их, перемещать и стирать, а также сравнивать.

Поскольку в мире сейчас имеется уже множество таких устройств, а поведение их в чем-то напоминает поведение центральной нервной системы человека, то почему бы нам не заняться изучением их «естественной истории»? Мы можем изучать их так же, как если бы это были кролики или морские свинки, исследуя, как они реагируют на различные внешние ситуации. И в той мере, в какой их поведение отражает широкие функциональные характеристики, о которых мы уже говорили, и не зависит от деталей конкретного устройства машин, мы можем построить общую — и одновременно эмпирическую — теорию их поведения.

В качестве примера анализа поведения машин как эмпирического явления можно сослаться на исследования последних пяти лет, посвященные созданию вычислительных систем с разделением времени. При их конструировании мы можем опираться лишь на фрагменты теории. На таких же отрывочных сведениях основываются и прогнозы поведения конкретных конструкций в условиях, когда потребители загружают систему самыми разнообразными задачами.

Большинство современных конструкций в первоначальных вариантах страдало серьезными недостатками, а большинство прогнозов работоспособности оказались удивительно неточными. Сейчас системы конструируют, совершенствуют и изменяют в несколько последовательных этапов. Возможно, с помощью теории удалось бы предвидеть результаты этих промежуточных экспериментов и отбросить их. Но на практике этого не произошло, и я не знаю никого, кто, будучи хорошо знаком с этими чрезвычайно сложными системами, конкретно представлял бы себе, как это можно было бы сделать по-другому. Чтобы понять, как работает система, ее необходимо построить и понаблюдать за ее поведением¹.

¹ Эмпирический, экспериментальный оттенок исследований вычислительной техники убедительно показан Морисом Уилкисом в его лекции «Машины тогда и теперь» [5].

Машинным программам, предназначенным для решения игровых задач или для доказательства математических теорем, также приходится иметь дело с самыми разными и сложными средами. И даже если сама программа не слишком велика и запутана (по сравнению, скажем, с программой контроля и управления большой вычислительной системы), об общих характеристиках этих задач, об их среде, известно еще слишком мало для того, чтобы можно было точно предсказать качество поведения и селективность поиска решения каждой задачи.

Поэтому и здесь теоретический анализ должен сочетаться с обширными экспериментальными данными. На основании многочисленных литературных данных об этих экспериментах мы теперь начинаем получать представление о возможностях различных эвристических приемов, позволяющих уменьшить размерность пространства поиска решения поставленной задачи. В задачах на доказательство теорем, например, имеется целый ряд результатов эвристического типа, основанных на экспериментальных исследованиях и подсказанных ими. К ним относятся: использование теоремы Эрбрана, принцип разрешения, принцип опорного множества и т. п.¹

Вычислительные машины и мышление

По мере расширения и углубления наших теоретических и эмпирических знаний о вычислительных машинах мы обнаружим, что их поведение в значительной степени основано на простых общих законах. То, что в вычислительных программах казалось сложным, чаще всего являлось лишь отражением сложности внешней среды, по отношению к которой программа приспособлявала свое поведение.

В той мере, в какой этот прогноз окажется справедливым, станет очевидной исключительная роль, которую машинное моделирование может сыграть в качестве инструмента, позволяющего глубже понять человеческое поведение. Действительно, если именно организация элемен-

¹ См., например, эмпирические данные в работе «Принцип демодуляции в доказательстве теорем» [6]. См. также сборник программ [7]. В рассматриваемой области принято озаглавливать статьи об эвристическом программировании так: «Эксперименты с такой-то программой».

тов, а не их физические свойства в основном определяет поведение и если машины в известном смысле организованы наподобие человека, то машина представляет собой естественный «полигон» для исследования того, насколько верны различные предположения об организации человеческого поведения. Психология может продвигаться вперед, не дожидаясь того, пока в рамках нейрофизиологии будут выяснены проблемы, связанные с устройством нервных элементов, какими бы важными и интересными ни оказались открытия в этой области. Следующая глава и будет посвящена самой интересной из существующих искусственных систем — человеческому интеллекту и вопросам машинного моделирования человеческого мышления.

Психология мышления. Как искусственное вырастает в естественное

Взгляните на муравья, совершающего утомительный путь по песчаному берегу, на котором ветер и волны оставили свои следы. Сначала он ползет вперед, затем сворачивает вправо, чтобы легче было взбираться на крутой песчаный барашек, огибает гальку и на секунду замирает, чтобы обменяться информацией со своими сородичами. Из таких элементов складывается его петляющий и неуверенный путь домой. Не будем антропоморфистами и не станем фантазировать, каковы «задачи» муравья, а просто зарисуем его путь на клочке бумаги. Получится последовательность нерегулярных ломаных отрезков, которую тем не менее нельзя назвать случайным блужданием, ибо в ней явно просматривается какое-то чувство направления, стремление к какой-то цели.

Такой рисунок без какой-либо подписи я как-то показал другу. Что тут нарисовано? След опытного горнолыжника, спускающегося по крутой и довольно каменистой трассе? Или след парусного суденышка, плывущего против ветра по водному пространству, усеянному островами и отмелями? А может, это траектория в более абстрактном пространстве — путь поиска студента, пытающегося доказать геометрическую теорему?

Но кому бы ни принадлежала траектория и в каком бы пространстве она ни была начертана, почему она не прямая? Почему она не ведет прямо от начала к конечной цели? Для муравья (а по правде сказать, и во всех других случаях) мы знаем ответ на этот вопрос. У муравья есть общие ориентиры местоположения его дома, но он не в состоянии предвидеть всех препятствий, которые встретятся ему на пути. Ему снова и снова приходится менять направление, приспособляясь к трудностям, встретив-

шимся на пути, а иногда и возвращаться назад, чтобы обойти непреодолимое препятствие. Его горизонт очень ограничен, поэтому он преодолевает препятствие, лишь когда на него натывается; он пробует обойти его или пройти поверх него, не учитывая того, что его ждет впереди. Поэтому его легко заманить в ловушку.

Рассматривая траекторию движения муравья как геометрическую фигуру, мы убедимся, что она неправильная, запутанная и трудно поддается описанию. Но ее сложность на самом деле отражает лишь сложность рельефа побережья, а не сложность муравья. Другое животное небольших размеров, живущее в том же песке, где и наш муравей, вероятно, изберет примерно такой же путь.

Свыше десяти лет назад Грей Уолтер построил электро-механическую «черепаху», которая умела обследовать поверхность и периодически отыскивала свое «гнездо», где перезаряжались ее батареи. Позднее в нескольких лабораториях, в том числе в лаборатории профессора Минского в Кембридже (штат Массачусетс), создавались автоматы, способные к поиску цели. Предположим, что мы решили создать автомат размером с муравья, имеющий сходные с ним средства передвижения и сравнимые возможности восприятия. Предположим также, что мы снабдили его несколькими простыми механизмами адаптации: если впереди крутой подъем, попытайтесь преодолеть его, карабкаясь не прямо вверх, а наискосок; если перед тобой непреодолимое препятствие, попытайтесь обойти его и т. д. (Если отбросить трудности микроминиатюризации элементов, то на нынешнем уровне знаний такая конструкция вполне реальна.) Чем же будет отличаться поведение подобного автомата от поведения муравья?

Все эти рассуждения приводят нас к гипотезе, к которой можно было бы прийти и на основании соображений, высказанных ранее в отношении искусственных объектов.

В том, что касается принципов своего поведения, муравей весьма прост. Кажущаяся сложность его поведения во времени в основном отражает сложность внешней среды, в которой он функционирует.

С первого взгляда такого рода гипотеза не всем может показаться правдоподобной. Это эмпирическая гипотеза, для проверки которой надо выяснить, можно ли, приписав системе адаптации муравья весьма простые свойства, объяснить его поведение в данной или сходной ситуацион-

ной среде. По причинам, подробно изложенным в предыдущей главе, истинность рассматриваемой гипотезы не должна зависеть от простоты или сложности микроскопического строения муравья. На клеточном или молекулярном уровне муравьи, безусловно, весьма сложные живые организмы; но подробности микроскопического устройства внутренней среды муравья почти никак не влияют на его поведение во внешней среде. Поэтому построенный нами автомат, несмотря на полное отличие его от муравья на микроскопическом уровне, может тем не менее в общих чертах моделировать поведение последнего.

В настоящей главе я подробно остановлюсь на этой гипотезе, только слово «муравей» заменю на «человек».

В том, что касается принципов своего поведения, человек весьма прост. Кажущаяся сложность его поведения во времени в основном отражает сложность внешней среды, в которой он живет.

Попробую несколько укрепить свою позицию. Я не стану рассматривать человека во всей его сложности, со всеми его «потрохами», а ограничусь изучением поведения *Homo sapiens*, «человека разумного». И хотя я полагаю, что гипотеза, о которой идет речь, справедлива для человека в целом, пожалуй, целесообразнее будет с самого начала отделить одни трудности от других и изучать лишь человеческое познание, а не поведение человека во всех его проявлениях¹.

Причины, по которым мы *a priori* приписываем этой гипотезе некоторую отличную от нуля вероятность, уже были разъяснены в предыдущей главе. Мыслящий человек представляет собой адаптивную систему, и его цели определяют взаимосвязь между его внешней и внутренней средами. В той мере, в какой он действительно способен к адаптации, его поведение будет отражать в основном характеристики внешней среды (с точки зрения стоящих перед ним целей) и позволит обнаружить лишь некоторые свойства, ограничивающие его способность к приспособ-

¹ Возможные обобщения этой гипотезы на эмоциональные проявления и мотивацию намечены в статье «Мотивационное и эмоциональное управление поведением» [8], а на определенные аспекты восприятия — в статье «Объяснение некоторых явлений восприятия с точки зрения теории информационных процессов» [9]. Однако для обеих упомянутых областей необходимы, видимо, более подробные сведения о физиологических структурах, чем те, которые нужны для изучения рассматриваемых здесь познавательных процессов.

лению и обусловленные его внутренней средой—физиологическим аппаратом, который и обеспечивает ему способность думать.

Я не намерен вновь останавливаться на этих теоретических рассуждениях, а попытаюсь найти эмпирические подтверждения этой гипотезы среди данных, относящихся к процессам человеческого мышления. Точнее, я хотел бы сделать очевидным, что только некоторые «врожденные» характеристики внутренней среды мыслящего человека ограничивают приспособление его мышления к типу стоящей перед ним задачи. Все остальное в его мышлении и поведении при решении задач является «искусственным», то есть приобретено путем обучения и доступно усовершенствованию посредством открытия более эффективных подходов.

Психология как наука об искусственном

Решение задач часто рассматривают как поиск в огромном лабиринте возможностей, лабиринте, который описывает внешнюю среду. Успешное решение задачи предполагает селективный поиск и сокращение исходного многообразия возможностей до обозримого множества. В качестве конкретного примера возьмем задачу, принадлежащую к известному классу криптоарифметических задач¹:

$$\begin{array}{r} + \text{DONALD} \\ \text{GERALD} \\ \hline \text{ROBERT} \end{array} \quad D = 5.$$

Необходимо буквы в этом наборе заменить цифрами от нуля до девяти так, чтобы во всех случаях одинаковые буквы заменялись одинаковыми цифрами, причем разным буквам соответствовали разные числа, а получившиеся числа удовлетворяли сформулированной арифметической задаче. В качестве дополнительного указания сообщается, что букву *D* следует заменить цифрой 5.

¹ Криптоарифметические задачи были впервые использованы Ф. Барлеттом в его исследованиях по решению задач (см. [10]). В своих рассуждениях я опираюсь на эту его работу, на доклад Аллена Ньюэлла [11] и на проведенный мною совместно с Ньюэллом анализ нескольких протоколов решения таких задач, результаты которого еще не опубликованы.

Один из подходов к решению этой задачи состоит в том, чтобы перебрать все $10!$ (десять факториал) возможностей замены десяти букв десятью цифрами. Для современной вычислительной машины число $10!$ не столь велико — всего лишь чуть больше 3 миллионов (а точнее, 3 628 800). Программе, предназначенной для систематической проверки всех вариантов и требующей десятой доли секунды на каждую подстановку и проверку, в худшем случае понадобится около десяти часов на всю работу (а при $D = 5$ и вовсе не более четырех часов). И хотя мне не приходилось составлять такую программу, я полагаю, что одна десятая секунды — это гораздо больше того времени, которое действительно потребуется современной машине для проверки одного варианта.

Что же касается человека, то, судя по всему, он едва ли способен на подобный подвиг. Чтобы произвести одну подстановку и проверку, человеку понадобится не менее минуты, и ему очень трудно проследить за тем, что он уже проделал и какие варианты опробованы. Разумеется, для облегчения задания он может воспользоваться карандашом и бумагой, но это лишь затормозит его продвижение вперед. При сорокачасовой рабочей неделе на решение нашей задачи, таким образом, может потребоваться несколько человеко-лет!

Отметим, что наш вывод о невозможности полного систематического перебора как метода решения подобных задач человеком основывался на весьма грубых предположениях о способностях человеческого интеллекта. Мы исходим из предположения, что простые арифметические операции занимают время порядка нескольких секунд, что эти операции выполняются в основном последовательно, а не параллельно и что человек не обладает памятью такого объема, который позволил бы запоминать новые данные за доли секунды. Конечно, все эти предположения говорят кое-что о физиологии нашей центральной нервной системы, но не слишком много. Например, небольшое «усовершенствование» мозга путем добавления в него новой подсистемы, обладающей свойствами обычного арифмометра, ознаменовало бы замечательный успех нейрохирургии — или эволюции. Но даже такая радикальная операция лишь не намного изменила бы наши гипотезы с точки зрения объяснения или предсказания поведения человека при решении такого рода задач.

И все-таки люди сплошь и рядом решают задачи типа $DONALD + GERALD = ROBERT$. Как же они этого добиваются? Каковы иные пути представления внешней среды и поиска решений?

Стратегии поиска

Один из методов резкого сокращения перебора состоит в следующем. Нужно по-прежнему систематически перебирать различные сочетания, но ставить цифры в соответствие буквам таким образом, чтобы негодные варианты обнаруживались как можно раньше, еще до того, как полностью составлена определенная комбинация. Тогда за один прием можно отбросить целый класс возможных цифро-буквенных подстановок. Поясню свою мысль на примере.

Предположим, что мы начинаем справа, последовательно исследуя подстановки для букв $D, T, L, R, A, E, N, V, O$ и G и подставляя цифры в естественном порядке 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 0. Мы заранее знаем, что $D = 5$, поэтому среди имеющихся цифр можно вычеркнуть 5. Попробуем T приравнять 1. При взгляде на правый крайний столбец мы сразу замечаем противоречие. Действительно, $D + D = T + c$, где c равно 10 либо 0. А так как при $D = 5$ $T = 1$ невозможно, мы сразу получаем возможность отбросить 8! комбинаций, получающихся в результате подстановки оставшихся восьми цифр вместо восьми букв. Точно таким же путем исключаются все прочие возможные подстановки цифр для T , за исключением $T = 0$. Следовательно, все комбинации, в которых $T \neq 0$, можно не рассматривать.

Описанный подход можно усовершенствовать. Для этого сразу вычисляют (путем сложения), какова должна быть подстановка для суммы, когда известны оба слагаемых. В этом случае нет нужды искать значения для T , так как $T = 0$ можно найти непосредственно, зная, что $D = 5$. Воспользовавшись таким подходом, мы без труда сумеем решить задачу $DONALD + GERALD = ROBERT$ с помощью бумаги и карандаша. Для этого достаточно десяти минут. Дерево поиска для этой задачи в несколько упрощенном виде показано на рис. 3. Каждая его ветвь доводится до точки, позволяющей обнаружить

$D=5$	$T=0$	$L=1$	$R=3$	$G<0$					
		$L=2$	$R=5$	$G=0$					
		$L=3$	$R=7$	$A=1$	$E=2$				
				$A=2$	$E=4$				
				$A=4$	$E=8$				
				$A=6$	$E=2$				
				$A=8$	$E=6$				
				$A=9$	$E=8$				
		$L=4$	$R=9$	$A=1$	$E=2$				
				$A=2$	$E=4$				
				$A=3$	$E=6$				
				$A=6$	$E=2$				
				$A=7$	$E=4$				
				$A=8$	$E=6$				
		$L=6$	$R=3$	$G<0$					
		$L=7$	$R=5$						
		$L=8$	$R=7$	$A=1$	$E=3$				
				$A=2$	$E=5$				
				$A=3$	$E=7$				
				$A=4$	$E=9$				
						$N=1$	$B=8$		
						$N=2$	$B=9$		
						$N=3$	$G=0$		
						$N=6$	$O=2$	$G=1$	

Р и с . 3. Дерево поиска для задачи $DONALD + GERALD = ROBERT$.

некоторое несоответствие. Например, после того как выяснено, что $D = 5$ и $T = 0$, предположение $L = 1$ позволяет сделать вывод, что $R = 3$, а это приводит к противоречию, так как, согласно крайнему левому столбцу задачи, G при этом должно быть отрицательным.

Дерево, приведенное на рис. 3, несколько проще, чем требуется в действительности. Каждая из его ветвей, заканчивающаяся противоречием на основании предположения о значении L , на самом деле должна ветвиться на один ярус дальше. Это связано со следующим обстоятельством: противоречия во всех этих случаях должны возникать из-за того, что букве O не удастся приписать какое-нибудь единственное значение, удовлетворяющее всем полученным условиям. Для этого в каждом отдельном случае необходимо рассмотреть четыре дополнительных варианта. Следовательно, полное дерево поиска должно иметь 68 ветвей. Но и это существенно меньше, чем $10!$ или даже $9!$

Итак, нам удалось путем сравнительно небольших отклонений от систематического, полного перебора возможностей существенно сократить необходимое пространство поиска. Следует признать, что такого рода отклонения

отнюдь не всегда столь просты, как я это умышленно здесь представил. Одним из шагов в предложенной схеме является обнаружение противоречия, к которому приводит данная подстановка. При этом, естественно, имеется в виду лишь «относительно очевидное» противоречие, поскольку при наличии достаточно быстрой процедуры, позволяющей находить все противоречивые предположения (как прямые, так и косвенные), мы могли бы практически сразу найти решение подобной задачи. Ведь в ней любая комбинация подстановок, кроме единственной правильной, должна привести к противоречию.

Говоря о поиске относительно очевидных противоречий, мы имеем в виду следующее. После каждой новой подстановки мы рассматриваем столбцы, в которых встречается заменяемая буква; затем (если это возможно) из этих столбцов определяем значения букв, оставшихся нерасшифрованными, и проверяем, не были ли уже заняты вновь найденные значения. Если полученная цифра оказалась занятой, получается противоречие.

Итак, мы заменили грубый «лобовой» поиск комбинированной системой «поиска и рассуждения». Можно ли продолжать этот процесс? Можно ли принципиально исключить из решения задачи любой поиск по методу проб и ошибок? Оказывается, что в применении к данной задаче это возможно, но для всей совокупности криптоарифметических задач это предположение уже несправедливо¹.

Основная идея, позволяющая избежать большинства проб и ошибок при решении поставленной задачи, связана с отказом от систематического (справа налево) приписывания буквам численных значений. Вместо этого мы стараемся обнаружить столбцы, относительно которых уже имеется достаточная определенность, позволяющая производить новые подстановки или по крайней мере делать новые выводы об их свойствах.

Рассмотрим вкратце этот процесс. Зная, что $D = 5$, мы сразу же, как и прежде, выводим, что $T = 0$. Это также означает, что 1 переносится во второй столбец, так что $R = 2L + 1$, то есть нечетно. Из крайнего левого столбца, зная, что $D = 5$, мы можем заключить, что $R > 5$

¹Например, метод, описываемый ниже, не позволяет столь радикально сократить поиск при решении криптоарифметической задачи $CROSS + ROADS = DANGER$.

(поскольку $R = 5 + G$). Объединяя эти два вывода, получаем, что $R = 7$ или $R = 9$, но проверять эти предположения не будем. Вместо этого обратим внимание на то, что у второго столбца слева необычная структура: $O + E = O$, то есть число плюс некоторое другое число равно самому себе (с точностью до переноса в следующий столбец и переноса из следующего столбца). Знания математики или эксперимент подсказывают нам, что так может быть только в том случае, если $E = 0$ или $E = 9$. Поскольку известно, что $T = 0$, остается лишь возможность $E = 9$, а это в свою очередь устраняет одну из альтернатив для R . Следовательно, $R = 7$.

Из $E = 9$ следует, что $A = 4$ и что в третий столбец справа переносится 1, откуда $2L + 1 = 17$ и, значит, $L = 8$. Нам осталось теперь каким-то образом распределить цифры 1, 2, 3 и 6 между буквами N , B , O и G . Мы полагаем $G = 1$, исходя из того, что, какое бы значение ни приписывалось букве O , в крайний левый столбец происходит перенос. Тем самым осталось всего $3! = 6$ различных возможностей, которые при желании можно перебрать методом проб и ошибок; в итоге получаем $N = 6$, $B = 3$ и, следовательно, $O = 2$.

Итак, мы проследили путь решения нашей задачи, исходя из трех различных предположений о стратегии поиска. При этом выяснилось, что чем совершеннее оказывалась стратегия, тем менее сложным был поиск. Однако важно отметить, что, как только выбрана стратегия поиска, процесс поиска становится связанным лишь со структурой задачи и не зависит от каких-либо характеристик того, кто решает эту задачу. Какой вывод можно было бы сделать относительно познавательной структуры человека или автомата, наблюдая за тем, как он успешно решает задачи подобного рода? Вероятно, нам удалось бы выяснить стратегию, к которой он прибегает. По совершенным им ошибкам и удачному их исправлению мы, возможно, смогли бы выявить не только пределы возможностей системы или точность ее памяти и элементарных процессов, но и в какой-то степени быстроту этих процессов. При благоприятных условиях нам, быть может, удалось бы узнать, к каким из мыслимых стратегий способна прибегать система и при каких условиях она вероятнее всего выберет каждую из них. Но у нас очень мало шансов выяснить что-либо конкретное о нейрофизиологических харак-

теристиках центральной нервной системы решающего задачу человека. К тому же конкретные свойства этой системы едва ли скажутся на ее поведении, если не считать ограничений, которые они накладывают на ее возможности.

Пределы возможностей

Попробуем теперь позитивным образом сформулировать, как мы себе представляем эти ограничения и пределы. При этом будем исходить из экспериментальных данных и опыта машинного моделирования поведения человека. Говоря об экспериментальных данных и моделировании на ЭВМ, мы имеем в виду широкий круг познавательных задач — от достаточно сложных (типа криптоарифметических задач, шахматных задач и задач на доказательство теорем) до задач промежуточной сложности (формирование понятий) и весьма простых задач, которые пользуются наибольшей популярностью в психологических лабораториях (задачи на механическое заучивание текстов, воспринимаемых на слух, или задачи на емкость кратковременной памяти). Несмотря на такое разнообразие задач, при их решении проявляются лишь несколько характеристик пределов приспособляемости внутренней системы. Более того, для всех типов упомянутых задач пределы эти оказываются одними и теми же. Это позволяет надеяться на то, что обнаружение такого рода ограничений даст возможность получить единое логически согласованное объяснение поведения человека для всего многообразия решаемых задач.

Ограничения, налагаемые на быстроту формирования понятий

Проблема формирования понятий широко изучалась психологами в рамках следующего типичного примера¹. Пусть стимулами служит набор карт, на которые нанесены простые геометрические фигуры. Они отличаются друг от друга по форме (на одной карте может быть изображен квадрат, на другой — треугольник, на третьей — круг

¹ Предлагаемое изложение процесса формирования понятий основано на работе «Модели процессов и простые стохастические теории формирования понятий» [12]. См. также [13].

и т. д.), цвету, размеру, положению и т. п. «Понятие» определяется экстенциональным образом, то есть с помощью предъявления некоторого множества карточек, на которых встречается это понятие. Примерами понятий могут служить: «желтое» или «квадрат» (простые понятия), «зеленый треугольник» или «большое и красное» (конъюнктивные понятия), «маленькое или желтое» (дизъюнктивное понятие) и т. д.

Остановимся на экспериментах с N -мерными стимулами, для каждой размерности которых существует всего два возможных значения, и с одномерным формируемым («простым») понятием. На каждом шаге испытуемому предъявляется один пример, положительный или отрицательный, связанный с формируемым понятием. Испытуемый реагирует на него, отвечая «положительный» или «отрицательный», и получает «подкрепление» в виде указания «правильно» или «неправильно» в соответствии с выданным ответом. В типичных опытах подобного рода поведение испытуемого характеризуется числом проб или числом ошибочных ответов до достижения безошибочной реакции на стимулы. В некоторых опытах испытуемого просят также периодически сообщать, какими содержательными понятиями он пользуется (если он к ним прибегает) при выдаче ответов.

Описанная ситуация настолько проста, что, как и в криптоарифметических задачах, мы можем заранее оценить среднее количество испытаний, необходимых для того, чтобы выявить имеющееся в виду понятие (при условии, что испытуемый пользуется наиболее эффективной стратегией поиска). В каждом испытании, независимо от ответа, испытуемый может по реакции экспериментатора (наличие или отсутствие подкрепления) установить, принадлежал ли предъявленный стимул отыскиваемому понятию или нет. Если принадлежал, то испытуемый знает, что один из атрибутов (или признаков) этого стимула — например цвет, размер или форма — входит в определение понятия. Если не принадлежал, то испытуемый знает, что понятие определяется *дополнением* одного из атрибутов стимула. В любом случае в результате каждого испытания исключается половина возможных простых понятий, а в случайной последовательности стимулов каждый новый стимул выбраковывает в среднем половину понятий, оставшихся после предыдущих испытаний. Поэтому среднее

число испытаний, необходимых для выявления искомого понятия, будет пропорционально двоичному логарифму размерности стимулов.

Если на каждое испытание отводится достаточно времени (скажем, одна минута) и если при этом разрешается пользоваться карандашом и бумагой, то любого человека со средними умственными способностями можно обучить наиболее эффективной стратегии поиска, и он будет следовать ей без особых трудностей. Однако, как правило, при проведении описываемых опытов испытуемых не учат эффективным стратегиям, им не дают бумаги и карандаша, а для ответа на каждый последующий стимул им предоставляют очень немного времени — всего порядка четырех секунд. Поэтому, чтобы обнаружить искомое понятие, испытуемым требуется гораздо больше испытаний, чем необходимо при использовании эффективной стратегии. И хотя, насколько мне известно, опыты с обучением эффективной стратегии еще не проводились, я убежден, что даже после обучения человек, которому отводят четыре секунды на ответ и не дают бумаги и карандаша, не сумеет этой эффективной стратегией воспользоваться.

Какой вывод позволяют сделать подобные эксперименты относительно человеческого мышления? Во-первых, они свидетельствуют о том, что люди не всегда способны самостоятельно найти разумные стратегии, хотя их весьма просто обучить этим стратегиям (в этом нас убеждают также наблюдения за игрой мастера-шахматиста с новичком). И хотя это заключение вряд ли следует отнести к числу поразительных, оно весьма поучительно. Но я еще вернусь к этому вопросу.

Во-вторых, как мы имели возможность убедиться, у человека нет достаточных средств для хранения информации в памяти, чтобы он мог пользоваться эффективной стратегией (если только процесс предъявления стимулов не замедляется во много раз или если испытуемым не разрешено пользоваться вспомогательной внешней памятью). Известны факты, свидетельствующие о том, что люди обладают практически неограниченной полупостоянной памятью (на это, в частности, указывает их способность запоминать все новые разрозненные факты на протяжении всей жизни). Поэтому узкое место нашего опыта должно заключаться в малом объеме оперативной (так называемой кратковременной) памяти человека и в величине промежутка

времени, требующегося для перевода единицы информации из ограниченной кратковременной в обширную долговременную память¹.

На основании других опытов мы пришли к следующим выводам: в быстродействующей кратковременной памяти может одновременно храниться не более семи единиц информации (а иногда всего две единицы); на перенос информации из кратковременной памяти в долговременную требуется, по-видимому, не менее пяти секунд. Для того чтобы последние утверждения стали операционными, следовало бы, конечно, уточнить, что имеется в виду под «единицей» информации. Но мы пока предположим, что такой единицей является «простое» понятие.

Можно ожидать, что даже без бумаги и карандаша испытуемый прибегнет к эффективной стратегии, если, во-первых, его такой стратегии обучили и, во-вторых, он располагает в каждом испытании двадцатью-тридцатью секундами на ответ и обработку каждого стимула. Однако лично я подобных опытов не проводил, поэтому предыдущее высказывание следует рассматривать лишь как предсказание, с помощью которого можно проверить справедливость развиваемой ниже теории.

Хочу еще раз подчеркнуть, что сделанные выводы могут показаться читателю очевидными, а возможно и тривиальными. Если это так, то мне хотелось бы напомнить, что очевидными они становятся лишь для тех, кто принимает за истинную мою самую общую гипотезу, гласящую что: *целенаправленное поведение человека в значительной части отражает структуру внешней среды, в которой оно реализуется, и для того, чтобы предсказывать это поведение, нужно лишь самое приближенное знание системы переработки информации человеком.*

В наших опытах такими существенными характеристиками, по-видимому, являются емкость кратковременной памяти, выражаемая числом единиц информации (или «блоков»), и время, необходимое для фиксации этой единицы информации в долговременной памяти. Ниже я подробнее остановлюсь на том, насколько устойчивы эти

¹ В монографии Брунера, Гуднау и Остина [14], по-видимому, впервые подчеркивалась роль ограниченности кратковременной памяти (авторы пользовались термином «познавательный стресс») в процессах формирования понятий. Там же дается вполне законченное описание некоторых стратегий, выбираемых испытуемыми.

характеристики в отношении широкого круга решаемых задач. Но сейчас мне хотелось бы сделать несколько заключительных замечаний об умении испытуемых пользоваться различными стратегиями и о влиянии обучения.

Вряд ли кого-нибудь удивит утверждение, что тем или иным стратегиям можно обучить. Мало удивительного и в том, что обучение новым стратегиям способно резко изменить качество поведения испытуемого и повысить его эффективность. Все образовательные институты основаны на этих предпосылках. Тем не менее они не всегда в полной мере учитываются психологами, занимающимися изучением процессов познания. В той степени, в какой поведение зависит от навыков, приобретенных в процессе обучения, а не от «врожденных» характеристик системы преобразования информации человеком, наши знания о поведении следует рассматривать как социологические, а не психологические по своей природе. Другими словами, они говорят лишь о том, чему научились люди, развиваясь в определенной социальной среде. Как и когда они этому научились — вопрос другой и очень трудный. Но не следует смешивать стратегии, приобретенные в результате обучения, с врожденными свойствами биологической системы, реализующей эти стратегии.

Эти соображения подтверждают данные Бартлетта и моей лаборатории о поведении людей при решении криптоарифметических задач. В самом деле, для решения этих задач различные испытуемые пользуются различными стратегиями — не только теми, о которых упоминалось выше, но и многими другими. Как они научились этим стратегиям, как пришли к ним, решая поставленную задачу, мы не знаем, хотя известно, что сложность и совершенство используемых стратегий непосредственно зависят от того, насколько испытуемые знакомы с математикой и насколько легко они ее воспринимают. Но, помимо стратегий, единственной характеристикой человека, ярко проявляющейся при решении криптоарифметических задач, является ограниченная емкость его кратковременной памяти. Основные трудности, с которыми сталкивается испытуемый в своих попытках использовать стратегии комбинаторного характера (и, возможно, обычное недоверие к такого рода стратегиям), объясняются теми нагрузками, которым при этом подвергается кратковременная память. Испытуемым трудно просто потому, что они забы-

вают, где они остановились, какие подстановки уже были сделаны и на каких неявных предположениях основываются подстановки, сделанные условно. Все эти затруднения обязательно возникли бы и в любом арифметическом устройстве, которое может держать в кратковременной памяти лишь несколько блоков данных и для перевода данных из кратковременной памяти в долговременную нуждается в большем времени, чем ему отпущено.

Параметры памяти. Пять секунд на блок

Если несколько параметров, о которых говорилось выше, создают основные ограничения для внутреннего устройства системы, проявляющиеся в познавательном поведении людей, то одной из важных проблем экспериментальной психологии становится задача оценки этих параметров и выяснения, насколько они варьируют от человека к человеку для различных заданий.

Но за исключением некоторых областей психологии органов чувств, типичные экспериментальные ситуации в психологии связаны скорее с задачами на проверку гипотез, чем с оценкой параметров. В отчетах о подобных опытах нередко встречаются утверждения о том, что тот или иной параметр отличается (или не отличается) «статистически значимым образом» от другого параметра, однако при этом очень мало говорится о самих значениях этого параметра. Более того, иногда нам сообщают уровни значимости или результаты дисперсионного анализа, так ничего и не сказав о численных значениях параметров, лежащих в основе всех этих выводов.

Не ограничиваясь возражениями против сложившейся порочной практики публикации результатов в экспериментальной психологии, я хочу посоветовать и на другое. В типичных случаях экспериментаторы совершенно не заботятся о том, чтобы выбирать единицы измерения, приемлемые для теории. Так, в экспериментах по обучению «скорость обучения» практически всегда измеряется «числом *испытаний* на критерий», «суммарным числом *ошибок*», «суммарным *временем* на критерий» и, возможно, другими вспомогательными параметрами. В частности, практика измерения скорости обучения числом испытаний, а не затраченным временем, распространенная в первой поло-

вине XX столетия и дожившая почти до наших дней, не только скрывала от наших взоров поразительную устойчивость параметра, о котором я собираюсь говорить, но и привела к пространным бессмысленным дискуссиям относительно разницы между обучением «на одно испытание» и обучением «малыми приращениями»¹.

В отличие от других исследователей, Эббингхауз в своих классических опытах по заучиванию бессмысленных слогов (где он сам выступал в роли испытуемого) фиксировал как число повторений, так и время, которое требовалось на заучивание последовательностей из разного числа слогов. Если не полениться провести соответствующий расчет, не трудно убедиться в том, что *время на один слог* в опытах Эббингхауза составляет десять-двенадцать секунд².

Бряд ли есть необходимость вычислять эту цифру с точностью до двух десятичных знаков или даже до одного. Говоря об устойчивости этого параметра, мы имеем в виду устойчивость с точностью до порядка величины или же с точностью до коэффициента, большего единицы, но не превосходящего двух. Она гораздо ближе к стабильности дневной температуры, которая в большинстве мест остается в пределах 263—333 градусов Кельвина, чем к стабильности скорости света. Постоянство с точностью до двукратного увеличения не следует игнорировать. Даже когда Ньютон впервые оценил скорость звука, он ввел в свои расчеты ненужный коэффициент, «съевший» около 30% истинной величины (эта ошибка была обнаружена и устранена только через столетие). В наши дни некоторые новые физические константы в теории элементарных частиц отличаются еще большей неопределенностью. Можно ожидать, что за каждой приближенной, а подчас даже очень грубой устойчивостью удастся обнаружить истинный параметр. Значение его можно будет измерить точно, как только станет известно, какие условия эксперимента следует поддерживать постоянными во время измерения.

Если бы устойчивость, о которой идет речь, относилась только к параметру Эббингхауза (хотя эта устойчивость и сохраняется на протяжении ряда лет), то это представляло

¹ Факты, подтверждающие постоянство параметра фиксации, рассматриваются в работах [15—18].

² См. [19].

бы интерес не столько для психологии, сколько для биографии этого ученого. Однако на деле это не так. Вспомним некоторые опыты Хэлла и Ховленда, относящиеся к 30-м годам¹. Внося кое-какие коррективы (так как приводимые там результаты выражены через число испытаний), мы снова увидим, что второкурсникам колледжа для запоминания бессмысленных слогов методом последовательных угадываний требуется время порядка десяти-пятнадцати секунд. С убыстрением ритма (скажем, с четырех до двух секунд на слог) число испытаний на критерий пропорционально возрастает, а общее время обучения остается в принципе постоянным.

Здесь перед нами открывается богатейшая золотоносная жила. Если прежние опыты с бессмысленными слогами пересмотреть с этих новых позиций, среди них найдется и немало таких, где основным параметром обучения окажется время порядка пятнадцати секунд на слог².

Я старался не преувеличивать «постоянства» этой постоянной. Но нельзя забывать, что попытки очистить процедуру ее измерения от влияния сопутствующих факторов едва начались. Мы уже знаем о нескольких переменных, оказывающих основное воздействие на значение этого параметра, и у нас есть теоретические объяснения этих эффектов — объяснения, которые до сих пор выдержали все проверки.

Известно, например, что осмысленность является чрезвычайно важным фактором. Бессмысленные слоги с высоким показателем ассоциативности и текст из не связанных между собой однослоговых слов запоминаются приблизительно втрое быстрее, чем бессмысленные слоги с низкой ассоциативностью. Непрерывная проза заучивается приблизительно за треть времени (на одно слово), потребного для запоминания текста из не связанных между собой слов. (Последнюю величину можно получить также из опыта Эббингхауза по заучиванию текста «Дон Жуана». Там тре-

¹ Их результаты приводятся в «Справочнике» С. Стивенса.

² Читатель может самостоятельно проделать соответствующие расчеты, воспользовавшись результатами экспериментов из книги М с G e o r g e J. A., Psychology of Human Learning. Однако только Бужельский [20], по-видимому, первый публично заявил о постоянстве этого параметра и сумел поставить нужные для проверки этого тезиса опыты.

буемое время на символ составляло примерно 10% соответствующего времени для бессмысленных слогов.)

Мы знаем также, что сходство, особенно сходство стимулов, оказывает на время фиксации несколько меньшее влияние, чем их осмысленность, и мы можем теоретически оценить величину этого влияния.

Наиболее плодотворной при объяснении этих и других явлений, описанных в литературе по механическому вербальному обучению, оказалась теория информационных процессов, на основании которой была написана программа машинного моделирования поведения человека под названием ЕРАМ. Поскольку программа ЕРАМ неоднократно описана в литературе, я не стану рассказывать о ней подробно, а затрону лишь один вопрос, имеющий непосредственное отношение к рассматриваемым проблемам. Теория, лежащая в основе программы ЕРАМ, позволяет подойти к решению вопроса о том, что же мы понимаем под «блоком» информации. Блок представляет собой некоторую максимальную уже знакомую субструктуру стимула. Так, бессмысленный слог «КЫГ» состоит из блоков «К», «Ы» и «Г», а слово «КОЛ» образует единый блок, поскольку эта структура всем прекрасно известна. Теория ЕРАМ постулирует постоянство времени, необходимого для фиксации блока. Как показывают опытные данные, эта постоянная составляет примерно пять секунд на блок, а возможно, и чуть меньше. По сути дела, все количественные прогнозы программы ЕРАМ относительно влияния, оказываемого на скорость обучения такими факторами, как бессмысленность слогов, их сходство и знакомство с ними испытуемых, вытекают из этой концепции блоков информации и постоянства времени фиксации одного блока¹.

¹ В большинстве опытов для проверки теории ЕРАМ использовались задания на вспоминание, а не просто на распознавание. Программа ЕРАМ состоит из двух процессов, в неявном виде присутствующих во время фиксации: процесса обучения различению и процесса запоминания образа. Поскольку распознавание связано в основном с первым процессом, может оказаться, что анализ заданий на распознавание даст для параметра фиксации несколько меньшие величины, чем пять секунд на блок. В самом деле, согласно экспериментам, о которых мне рассказывали Уолтер Рейтман и Мэри Поттер, время, необходимое для фиксации того факта, что со сходными объектами или изображениями уже приходилось встречаться ранее, может быть порядка одной-двух секунд.

Параметры памяти. Семь блоков или только два?

Другое ограничение внутренней системы, снова и снова проявляющееся в экспериментах по обучению и решению задач, связано с объемом информации, которую способна удерживать кратковременная память. И в этом случае критической единицей оказывается, по-видимому, блок информации, причем и здесь в это понятие вкладывается тот же смысл, что и при определении постоянной фиксации.

К этому параметру, известному ранее в связи с исследованиями по запоминанию цифр, оценкам численности и различению стимулов, вновь было привлечено внимание благодаря знаменитой статье Джорджа Миллера «Магическое число семь плюс минус два» [21]. Сегодня кажется менее правдоподобным, чем во время написания этой статьи, что во всех трех упомянутых типах задач мы сталкиваемся с одним, а не с тремя различными параметрами. Поэтому мы будем упоминать лишь о задачах, связанных с выяснением объема памяти на цифры. Кроме того, сегодня появились сомнения насчет того, чему же равно истинное значение параметра: семи или двум? А это слишком большой разброс, чтобы оставить его без внимания.

Вот факты, которыми мы располагаем на основании последних опытов с кратковременной памятью. Если испытуемый должен прочесть последовательность цифр или букв, а затем воспроизвести их, то ему обычно удается правильно выполнить задание, если последовательность не превышает семи или даже десяти символов. Если же в период между предъявлением символов и их воспроизведением от испытуемого требуется выполнение практически любой, даже самой простой задачи, число символов, которые он способен запомнить, падает до двух. В связи с тем вариантом этой задачи, который чаще всего встречается в повседневной жизни, мы можем назвать эти цифры «постоянными телефонной книги». Обычно нам удается запомнить все семь цифр номера телефона, прочитанного в телефонной книге, если только нас ничто не отвлекает в процессе запоминания — хотя бы даже собственные мысли!

Но если опыты показывают, что прерывание другим действием все же не мешает запоминанию более чем двух блоков, то это явление почти всегда удается объяснить с помощью механизма, о котором мы упоминали в предыду-

щем разделе. В применении к некоторым экспериментам (как на это указывал и Миллер) объяснение заключается в том, что испытуемый, прежде чем заносить стимулы в кратковременную память, осуществляет их перекодирование в меньшее число блоков. Если десять единиц информации удастся перекодировать в два блока, удастся запомнить все десять цифр. В других опытах иногда кажется, что в кратковременной памяти удерживается «слишком многое». На самом же деле время, которое отводится испытуемому, позволяет перенести избыточные данные в долговременную память.

Приведу всего два примера. Н. Во и Д. Норман [22] сообщают об опытах, в которых было показано, что в памяти в условиях прерывания надежно удерживаются только первые два символа последовательности. Но вместе с тем в памяти испытуемых сохраняется и какой-то остаточный след от остальных символов. Как показывают вычисления времени, которым испытуемые располагали для фиксации символов, большинство остаточных явлений может быть объяснено, если принять, что скорость передачи данных в долговременную память составляет порядка пяти секунд на блок. (Такое объяснение полностью согласуется с теоретической моделью, предложенной Во и Норманом.)

По сообщению Р. Шепарда [23] испытуемые, которым показывали очень длинную серию фотографий, по преимуществу пейзажей, способны были при повторном предъявлении их в составе более широкого набора с высокой степенью надежности вспомнить, какие из них они уже видели ранее. Но если учесть, что речь здесь идет о задачах на распознавание, при которых требуется лишь фиксация различительных признаков, а среднее время, отводившееся на каждую фотографию, было порядка шести секунд, описанные явления становятся вполне объяснимыми и даже — более того — предсказуемыми на основании предлагаемой нами теории.

Организация памяти

Приведенными примерами отнюдь не исчерпывается список экспериментов, которые можно было бы привести в подтверждение высказанных идей о параметре фиксации, параметре емкости кратковременной памяти и в поддерж-

ку гипотезы, согласно которой именно эти параметры являются главными и практически единственными характеристиками системы обработки информации, которые проявляются или могут проявиться в этих стандартных психологических экспериментах.

Это вовсе не означает, что других параметров не существует и что нельзя указать эксперименты, которые позволили бы их обнаружить и оценить. Можно лишь сделать вывод, что не следует пытаться излишне усложнять законы, управляющие поведением человека в ситуациях, когда поведение его на самом деле просто, а сложной является только окружающая его среда.

Сотрудникам нашей лаборатории, например, удалось выяснить, что задания на решение в уме различных арифметических задач позволяют выявить несколько других параметров. Так, из работы Дансеро следует, что время, требуемое для выполнения элементарных арифметических операций и фиксации промежуточных результатов, объясняет лишь часть (примерно половину) общего времени, затрачиваемого на то, чтобы в уме умножить четырехзначное число на два. Большинство дополнительных затрат времени уходит, по-видимому, на выборку из памяти чисел, подвергнутых временной фиксации, и на то, чтобы «найти им место» в кратковременной памяти, где с ними можно работать. Мы надеемся, что исследования Дансеро позволят не только оценить эти новые параметры, но и достичь некоторого понимания связанных с ними процессов¹.

Структурирование стимулов

Теперь мне хотелось бы остановиться на одной характеристике внутренней системы, скорее «структурной», нежели количественной, которая также обнаруживается в некоторых опытах. Обычно полагают, что память организована по «ассоциативному» принципу, но при этом не уточняют, что именно имеется в виду. Одна из интерпретаций раскрывается работами Мак-Лина и Грегга [25]. В их опытах от испытуемого требовалось заучивать наи-

¹ Первые результаты исследований, связанных с определением общего времени решения арифметических задач в уме, содержатся в статье Дансеро и Грегга [24].

зусть списки из 24 букв алфавита, выписанных вразнобой. При этом авторы старались поощрять структуризацию списка, предъявляя буквы на карточках сначала по одной, затем по три, четыре, шесть и даже по восемь букв на каждой. Всякий раз, когда буквы предъявлялись группами, испытуемые выучивали список примерно вдвое быстрее, чем при их одиночном предъявлении.

Мак-Лин и Грегг пытались также выяснить, как выучиваемая последовательность хранится в памяти — в виде одного длинного списка или в виде иерархии блоков, каждый из которых представляет собой более короткий список. Они определяли это по тому, как испытуемые группировали буквы во времени при воспроизведении списка, особенно если требовалось выдать список в обратном порядке. Результат получился довольно четким: список запоминался в виде последовательности коротких подпоследовательностей. Подпоследовательности в основном соответствовали блокам, которые предъявлялись экспериментатором, или фрагментам этих блоков. Если же испытуемый был предоставлен самому себе, он чаще всего предпочитал образовывать блоки из трех-четырёх букв. (Вспомним о роли блоков такой же длины в опытах по изучению влияния осмысленности при запоминании бессмысленных текстов.)

Зрительная память

Материалом для опытов Мак-Лина и Грегга служили одномерные цепочки символов. Но те же вопросы могут быть заданы и относительно организации информации при запоминании двумерных зрительных стимулов¹. В каком смысле память и мышление воспроизводят зрительные характеристики стимулов? Мне не хочется воскрешать старые споры о «безобразной памяти» — по крайней мере, в той форме, в какой они велись в свое время. Но, возмож-

¹ В опытах Мак-Лина и Грегга буквы в списках, разумеется, тоже представляют собой двумерные зрительные стимулы. Но, так как сами буквы выступают для испытуемых как знакомые блоки, которые можно сразу узнать и зафиксировать в памяти, нет оснований полагать, что их двумерный характер играет какую-либо роль в поведении испытуемых. Это снова «очевидно», но только в том случае, если у нас имеется общая теория обработки стимулов «внутри» системы.

но, сегодня этот вопрос можно рассматривать в более операциональной форме, чем в начале века.

Вступая на этот опасный путь, я нахожу утешение в том, что это уже до меня сделали самые ярые оппоненты ментализма. Достаточно вспомнить Скиннера, который писал:

«Человек может видеть или слышать „стимулы, которых нет” благодаря механизму условного рефлекса: он может увидеть X не только в случае, когда ему показывают X, но и тогда, когда ему показывают стимул, часто сопровождающий предъявление X. Звонок на обед не только вызывает у нас слюноотделение, но и заставляет нас увидеть пищу» [26].

Я не знаю, что именно имел в виду Скиннер, когда говорил «увидеть пищу», но его утверждение придает мне храбрости, и я попытаюсь объяснить, что это значит с точки зрения теории информационных процессов. С этой целью я опишу (в упрощенном виде) опыт, который использовался для прояснения этого вопроса. Предположим, что мы даем возможность испытуемому заучить следующий зрительный образ — магический квадрат:

4	9	2
3	5	7
8	1	6

Затем мы убираем стимул и начинаем задавать вопросы, отмечая время, которое расходуется на ответы. Какая цифра находится справа от 3? А справа от 1? Какая цифра стоит под 5? Какая цифра находится по диагонали сверху и справа от 5? Не все вопросы равнозначны по трудности. Здесь я выписал их в порядке возрастания трудности. Поэтому можно ожидать, что для ответа на последний вопрос испытуемому понадобится существенно больше времени, чем для ответа на первый.

В чем причина этого? Если бы образ, запечатленный в памяти, был изоморфен фотографии символа, едва ли можно было ожидать существенных различий во времени при ответе на разные вопросы. Поэтому приходится признать, что зафиксированный в памяти образ организован совсем не так, как фотография. Можно было бы предположить, что это структура типа списка. Такая гипотеза не противоречит данным Мак-Лина — Грегга и вполне укладывается

ся в модель познания в соответствии с теорией информационных процессов.

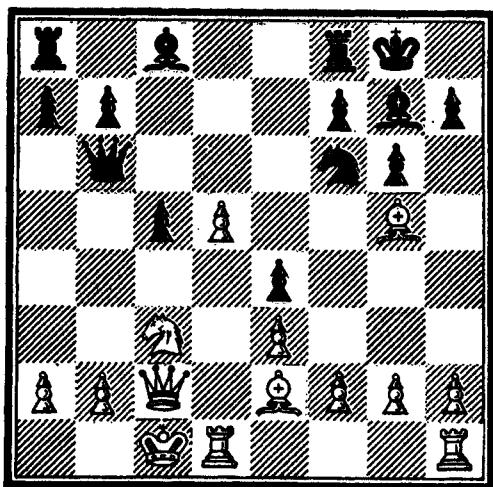
Например, если в памяти хранится список списков: «Верх», «Низ» и «Середина», где «Верх» — это 4-9-2, «Середина» — 3-5-7, а «Низ» — 8-1-6, то отмеченные эмпирические результаты легко объяснить. Чтобы ответить на вопрос: «Какая цифра находится справа от 3?», требуется лишь перебрать горизонтальные списки, тогда как для ответа на вопрос: «Какая цифра стоит непосредственно под 5?» нужно сравнивать эти списки попарно, член за членом. Этот процесс существенно сложнее первого.

Вряд ли у кого-нибудь возникнет сомнение относительно способности испытуемого научиться запоминать не только горизонтальные, но и вертикальные и диагональные отношения. Теория, подобная программе ЕРАМ, предсказала бы, что испытуемому потребуется примерно вдвое больше времени на заучивание как горизонтальных, так и вертикальных отношений, чем на заучивание одних только горизонтальных. Хотя такую гипотезу легко проверить, этим, насколько я знаю, никто не занимался.

Приблизительно такого же рода данные о хранении в памяти «зрительных» образов мы находим и в хорошо известных опытах А. де Гроота [27] по восприятию шахматных позиций. Де Гроот показывал испытуемым шахматные позиции, взятые из реальных партий, в течение, скажем, пяти секунд, затем убирал фигуры с доски и просил восстановить позицию. Гроссмейстерам и мастерам (при наличии 20—24 фигур на доске) это удавалось практически безошибочно, в то время как новички едва могли правильно восстановить положение хотя бы одной фигуры. Что же касается результатов игроков промежуточной силы, то они лежали где-то посредине между этими крайностями. Самым же удивительным в этих опытах было другое: когда гроссмейстерам и мастерам показывали другие доски с тем же числом фигур, но *расставленных случайным образом*, их способности восстановить позицию на доске практически ничем не отличались от способностей новичков. В то же время результаты новичков при этом не ухудшались (правда, и не улучшались).

Какие выводы можно отсюда сделать? Результаты де Гроота опровергают гипотезу о том, будто шахматные мастера обладают каким-то особым даром зрительного воображения — иначе чем объяснить резкое ухудшение их по-

казателей во втором случае? С другой стороны, полученные результаты наводят нас на мысль о том, что позиция на доске запоминается в виде *отношений* между фигурами, а не в виде «телевизионной развертки» всех 64 клеток доски. Численные значения рассматривавшихся выше параметров — семь блоков в кратковременной памяти и пять се-



Р и с . 4. Шахматные позиции, использовавшиеся в опытах на запоминание.

кунд на фиксацию блока — не позволяют предположить, что какой-либо из игроков, хотя бы даже гроссмейстер, может запомнить 64 (или 24) блока информации за десять секунд. В то же время вполне правдоподобно, что в памяти (кратковременной и долговременной) удастся зафиксировать информацию о таком числе отношений (если каждое из них представляет собой хорошо знакомый блок), которое достаточно для восстановления позиции, показанной на рис. 4.

Например:

1. Черные рокировались в короткую сторону, а fianкетированный чернополюсный слон защищает королевского коня.

2. Белые рокировались в длинную сторону, а белый ферзь находится непосредственно перед своим королем.

3. Черная королевская и белая ферзевая пешки, продвинувшиеся на половину противника, атакуются и защищаются соответственно белым ферзевым и черным королевским конями. Кроме того, белый ферзь нападает по диагонали на королевскую пешку черных¹.

4. Чернополюный слон белых нападает на черного королевского коня с поля g5.

5. Черный ферзь нападает на позицию белого короля с поля b3.

6. Черная пешка стоит на c5.

7. Белая королевская пешка e3 блокирует продвижение черной пешки на той же вертикали.

8. Каждая сторона потеряла по пешке и коню.

9. Белый белополюный слон стоит на e2.

Все фигуры, которые не были упомянуты, остаются на исходных позициях.

Поскольку некоторые из выписанных отношений являются сложными, необходимо привести разумные основания, по которым их все же можно считать единичными «блоками». Я думаю, что большинство опытных шахматистов сразу скажут, что это так. (Между прочим, я выписал эти отношения по памяти и именно в том порядке, в каком они всплывали в моем воображении.) Данные о движении глаз опытного игрока, изучающего позицию на доске, в основном подтверждают нашу теорию формирования и запоминания отношений². Особо четко при этом проявляются отношения 3 и 5.

Приведенные выше соображения о зрительной памяти позволяют в рамках нашей основной темы сделать следующий вывод: многие явления, связанные с формированием зрительных представлений, не зависят сколько-нибудь существенно от детальной организации лежащих в их основе нейрофизиологических процессов, а могут быть объяснены и предсказаны на основании теории, которая опирается на весьма общие и абстрактные свойства организации памяти. При этом оказывается, что речь идет все о

¹ Заметим, что англосаксонская система шахматной нотации удобнее для таких представлений позиции, и в оригинале отношения выглядят гораздо компактнее. Ниже в переводе применяется международная система нотации. — *Прим. первая.*

² Тихомиров О. К., Познянская Э. Д., Исследование зрительного поиска как путь к анализу эвристик, *Вопросы психологии*, № 4, 39—53 (1966).

тех же свойствах, которые мы постулировали для построения теоретико-информационной теории заучивания бессмысленных текстов и формирования понятий.

В частности, мы можем допустить, что память организована по принципу списочной структуры (элементы этого списка сами могут быть списками), содержащей дискриптивные составляющие (двучленные отношения) и короткие (трех- и четырехэлементные) списочные компоненты. Память, организованная таким образом, по-видимому, обладает всеми свойствами, необходимыми для объяснения явлений хранения как «символических», так и зрительных и слуховых стимулов.

Обработка естественного языка

Любая теория человеческого мышления не может и не вправе обойти вопросы, связанные с самой характерной познавательной способностью человека — умением пользоваться языком. Какое место занимает язык в общей картине процессов познания, которую я выше обрисовал, и как данные о языке согласуются с моим основным тезисом о том, что психология есть одна из наук об искусственном?

Исторически современная теория структурной лингвистики и теоретико-информационная модель познания родились в рамках одной и той же схемы — в кругу идей, связанных с развитием современных цифровых вычислительных машин и с осознанием того факта, что, хотя машина и сделана из реальных физических элементов, ее «душа» — в ее программе. Одна из первых профессиональных работ по структурной лингвистике и один из первых докладов о теоретико-информационных моделях познания появились почти одновременно в сентябре 1956 года [28]. Между обеими теориями с самого начала установилось согласие. В этом нет ничего удивительного, поскольку обе основываются на одинаковых представлениях о человеческом мышлении.

Несомненно, найдутся люди, считающие, что в основу этих теорий положены диаметрально противоположные точки зрения на человеческое мышление. В самом деле, для меня основное в мышлении — это то, что его процедуры имеют искусственный характер, что оно приспосабливается к требованиям окружающей среды в результате

индивидуального обучения и социального обмена знаниями. В то же время виднейшие теоретики формальной лингвистики придерживаются позиции «врожденности» языка. Они утверждают, будто дети не смогли бы приобрести такой сложный навык, как умение говорить на том или ином языке и понимать его, если бы в них от рождения не был заложен основной аппарат, необходимый для проявления этого навыка.

В этой связи уместно напомнить дебаты об универсальных структурах языка — о том, существуют ли какие-либо характеристики, общие для всех известных языков. Мы знаем, что общность различных языков не выражена сколько-нибудь конкретно, а проявляется в широких структурных характеристиках, которые в той или иной мере, видимо, присущи всем языкам. Создается впечатление, что во всех языках существует какое-то различие между существительным и глаголом, то есть между объектом и действием (или отношением). По-видимому, все языки имеют многоступенчатый характер, проявляющийся в структуре словосочетаний. Во всех языках определенные преобразования позволяют получать одни языковые последовательности из других¹.

Но если типичные универсалии, о которых говорят сторонники теории «врожденности», выглядят именно таким образом, то для этой теории возможны по крайней мере две интерпретации. Одна из них состоит в том, что лингвистические способности имеют *чисто* лингвистический характер. Это значит, что язык есть *вещь в себе* и связанные с языком способности человека не используются ни в какой другой сфере его деятельности.

Согласно другой интерпретации, вся деятельность, связанная с генерированием или дешифровкой лингвистических символов, зависит от некоторых особенностей центральной нервной системы человека, общих для всех людей. Более того, эти характеристики существенны не только для речи и ее восприятия, но и для других аспектов человеческого мышления.

Если первая интерпретация не объясняет удивительного параллелизма, наблюдаемого в фундаментальных предположениях относительно человеческих способностей,

¹ По поводу лингвистических универсалий см. [29 и особенно стр. 58—90]. Позиция «врожденности» изложена Кацем [30].

лежащих в основе как современных лингвистических теорий, так и теоретико-информационных моделей познания, то для второй это не составляет особого труда. Предположения, аналогичные сделанным ранее о структуре человеческой памяти, в точности совпадают с гипотезами, какие нужно было бы сделать о системе, чтобы она смогла перерабатывать лингвистическую информацию. На самом деле у обеих областей имеется множество пересечений. И здесь и там в качестве основного принципа организации памяти постулируется иерархически организованная списочная структура. И там и здесь интересуются тем, как последовательно работающий преобразователь может превращать цепочки символов в списочную структуру, и наоборот. И там и здесь тот же класс языков программирования оказался удобным орудием моделирования и имитации изучаемых явлений.

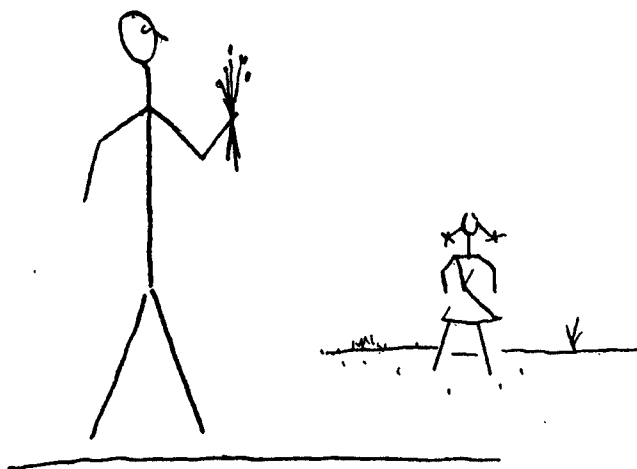
Роль семантики в обработке лингвистической информации

Я позволю себе наметить еще один путь, который обещает в будущем еще большее сближение лингвистических теорий с теоретико-информационными моделями познания. До сих пор лингвистическая теория была в основном теорией синтаксиса, или грамматики. Но в практических приложениях, занимаясь такими задачами, как машинный перевод, она столкнулась с трудностями, когда перевод зависит не только от синтаксических признаков, но и от контекста, или «смыслового содержания». Сейчас кажется совершенно очевидным, что одно из основных направлений развития лингвистики состоит в разработке адекватной семантики, призванной дополнять синтаксис.

Теория мышления, которую я здесь вкратце обрисовал, уже сейчас может составить значительную часть этой семантической компоненты. Принципы организации памяти, о которых только что говорилось, могут быть использованы как для анализа способов внутреннего представления языковых цепочек, так и для того, чтобы исследовать внутреннее представление двумерных зрительных или других нелингвистических стимулов. А если общие принципы организации стимулов различной природы действительно существуют, то это поможет разобраться в том, как при интерпретации языковых фактов могут быть сов-

местно использованы синтаксические и семантические признаки.

За последние годы в Университете Карнеги — Меллона развернулись научные исследования, имеющие самое непосредственное отношение к затронутому вопросу. Мне хотелось бы упомянуть лишь о двух исследованиях, в которых делаются попытки использовать намеченный подход для разрешения синтаксических неопределенностей с помощью семантических признаков.



Р и с . 5. Синтаксически двусмысленная фраза «Я встретил ее на поляне с цветами».

В частности, Коулз [31] описывает машинную программу, в которой для разрешения синтаксических неопределенностей используются изображения на экране катодно-лучевой трубки. В целях упрощения я постараюсь изложить предлагаемую им процедуру на примере, который, на мой взгляд, доступнее, чем пример самого Коулза. Рассмотрим предложение

Я встретил ее на поляне с цветами.

Для этого предложения допустимы по крайней мере три интерпретации, а лингвист наверняка обнаружил бы и большее их число. Выбор одной из трех очевидных интерпретаций зависит от того, у кого, по нашему мнению, нахо-

дятся цветы: у меня, у моей знакомой или они просто растут на поляне?

Предположим теперь, что наше предложение сопровождается изображением (рис. 5); тогда у нас уже не останется каких-либо поводов для сомнений. Разумеется, что цветы у меня!

Программа Коулза способна распознавать объекты на изображении и отношения между этими объектами. Она может также описывать изображение с помощью списочной структуры, которая в рассматриваемом примере будет выглядеть следующим образом:

ВСТРЕТИЛ (Я, С (цветами)), (её, НА (поляне))

Я не пытаюсь воспроизвести здесь реальные подробности схемы Коулза, а стремлюсь лишь показать, что представленную подобным образом картинку нетрудно сравнить с различными вариантами разбора словесных цепочек и, следовательно, она может быть использована для устранения неопределенностей интерпретации этих цепочек.

На основании другой программы, недавно завершённой Л. Шиклоши, мы имеем возможность увидеть, как семантическая информация может помочь в приобретении языковых навыков. Возможно, читатель уже знаком с серией книг «Язык в картинках», созданной профессором Ричардсом с сотрудниками (эти книги подготовлены для многих языков). На каждой странице такой книги имеется рисунок, а под ним — одна или несколько фраз, говорящих что-то о рисунке на подлежащем изучению языке. При этом последовательность рисунков и сопровождающих их подписей позволяет перейти от простейших ситуаций («Я здесь», «Это человек») к более сложным («Эта книга на полке»).

Входом для программы Шиклоши служит материал, аналогичный одной из книг «Язык в картинках». Предполагается, что рисунки из этого материала уже преобразованы в списочные структуры (схожие с той, которая приводилась выше при описании программы Коулза), которые служат их внутренним представлением. Задача программы состоит в том, чтобы, сталкиваясь с подобным рисунком, научиться составлять подходящее предложение на изучаемом естественном языке — предложение, опи-

сывающее, что показано на рисунке. В случае ситуации с цветами (более сложном, чем те случаи, на которых реально испытывалась описанная программа) хотелось бы надеяться, что программаотреагирует на рисунок предложением

Он встретил ее на поляне с цветами,

если бы это был русский язык,
или

He met her at the lawn with flowers,

если бы это был английский язык.

Бесспорно, программа даст правильный ответ только в том случае, если у нее уже имеются достаточный словарный запас и необходимые грамматические познания. В противном случае она использует предложение, связанное с рисунком, для обогащения собственного словаря и синтаксиса.

Я не собираюсь развивать эти оригинальные эксперименты в целостную теорию семантики. Приведенные примеры призваны лишь показать, что характер структуры памяти, предложенный, исходя из других соображений, для объяснения поведения человека в простейших познавательных задачах, можно использовать и для других целей. В частности, он позволяет объяснить, каково внутреннее представление цепочек лингвистических символов, возможно ли аналогичное представление стимулов другой природы, как эта общность представления (использование иерархически организованной списочной структуры во всех случаях жизни) в состоянии объяснить слияние языка и его «смысла» в уме человека.

Поэтому между тезисами о том, что, с одной стороны, люди от рождения обладают навыками к изучению и использованию языков, а с другой — язык представляет собой в основном искусственное, а следовательно, наиболее «человеческое» из всех созданий человеческого труда, нет противоречий. Согласно первому тезису, внутренняя среда реально существует и тем самым реально накладывает определенные ограничения на возможные для человека процессы обработки информации. Структура языка выявляет эти ограничения, а они в свою очередь определяют ту общ-

ность, которая наблюдается в вавилонском смешении языков.

Что же касается второго тезиса, об искусственности языка, то он утверждает, что для различных языков пределы приспособляемости, налагаемые внутренней средой, являются весьма широкими пределами организации, а не узко специфичными пределами синтаксиса. Более того, эти ограничения касаются не только языковых способностей, но и всех других видов внутреннего представления опыта, приобретаемого с помощью приходящих извне стимулов.

Подобная точка зрения на взаимоотношения языка и мышления проливает новый свет на гипотезу Уорфа, согласно которой (если сформулировать ее в гипертрофированном виде) думать можно только о том, что можно выразить словами. И если эта точка зрения верна, то с тем же успехом можно утверждать, что «выразить можно только мыслимое»!

Заключение

Итак, напомним тезис, с которого мы начали: *человек, рассматриваемый как поведенческая система, весьма прост. Кажущаяся сложность его поведения во времени в основном отражает сложность окружающей его среды.*

Эта гипотеза в свою очередь опиралась на тезис, рассмотренный в первой главе, согласно которому поведение адаптируется к целям, то есть оно искусственно и, следовательно, раскрывает лишь те характеристики изучаемой системы, которые препятствуют полной адаптации.

Чтобы проиллюстрировать, как мы приступили к проверке справедливости этих тезисов и одновременно к созданию теории о простых принципах, лежащих в основе поведения человека, я собрал результаты некоторых опытов, касающихся познавательных возможностей человека, и особенно тех из них, которые проводились в психологических лабораториях.

Поведение людей при решении криптоарифметических задач, при формировании понятий, заучивании наизусть, хранении информации в кратковременной памяти, обработке зрительных стимулов и при выполнении заданий, требующих использования естественного языка, свиде-

тельствует в пользу справедливости рассмотренных тезисов. Искусственность и, следовательно, изменчивость поведения человека вряд ли требуют другого подтверждения, помимо тех, которые дают нам повседневные наблюдения. Поэтому главное значение приводимых примеров в том, что они говорят об общности организации процессов обработки информации у людей, выполняющих различные задания.

Неопровержимо доказано, что система обработки информации человека работает в основном последовательно во времени: она способна перерабатывать одновременно лишь несколько символов, причем обрабатываемые символы должны храниться в особых, ограниченных по емкости, структурах памяти, содержимое которых может быстро меняться. Наиболее резкие ограничения на возможности использования эффективных стратегий накладываются тем обстоятельством, что емкость кратковременной структуры памяти весьма мала (всего семь блоков), а время, необходимое для переноса одного блока информации из кратковременной памяти в долговременную, достаточно велико (порядка пяти секунд).

Когда же мы от задач, связанных в основном с загрузкой кратковременной памяти и с использованием способностей центральной нервной системы к последовательной обработке информации, переходим к задачам, требующим поиска и извлечения хранящейся информации, мы наталкиваемся на новые пределы адаптации и, исследуя эти ограничения, получаем возможность добывать новую информацию об организации мышления и устройстве мозга. Изучение зрительного восприятия и задач, требующих использования естественных языков, все с большей очевидностью свидетельствует о том, что память действительно устроена по ассоциативному принципу, но «ассоциативность» в этом случае обладает такими свойствами, которые специалисты по вычислительной технике называют «списочной» структурой. Выше я вкратце обрисовал характер этих свойств.

Таковы обобщения, относящиеся к законам мышления человека, которые удается сделать на основании экспериментальных данных. Они весьма просты, чего и следовало ожидать, учитывая исходные гипотезы. Более того, хотя общая картина будет постоянно расширяться и проясняться, не следует ожидать существенного ее усложнения.

Только свойственное человеку высокомерие вынуждает нас считать, что сложность выбираемого нами пути и причудливость траектории движения муравья объясняются различными причинами!

Одно из любопытных следствий избранного мною подхода и выдвинутых тезисов заключается в том, что собственно о физиологии так ничего и не было сказано. Мышление принято связывать с мозгом. Я же говорил об организации мышления, совершенно не затрагивая структуру мозга.

Основная причина такой «десубстанцииализации» разума заключается, конечно, в самом рассмотренном выше тезисе. Различие между устройством вычислительной машины и структурой мозга не помешало машинам имитировать широкий спектр процессов человеческого мышления — и все потому, что и машина и мозг в процессе мышления выступают как приспособляющиеся системы, которые стремятся адаптировать свои процессы к задачам, выдвигаемым перед ними окружающей средой.

Я был бы весьма огорчен, если бы, искажая истинный смысл этих выводов, их поняли как утверждение, будто нейрофизиология не может внести свой вклад в объяснение поведения человека. Такая точка зрения по меньшей мере наивна. Вместе с тем наш анализ искусственного вынуждает нас к определенному взгляду на характер возможного физиологического объяснения поведения. Объектом нейрофизиологии являются исследования внутренней среды приспособляющейся системы, известной под названием *Homo sapiens*. Именно к физиологии приходится обращаться за объяснением пределов возможностей приспособления: почему емкость кратковременной памяти ограничена семью блоками? Какова физиологическая структура, соответствующая одному «блоку»? Что происходит в течение пяти секунд, когда осуществляется фиксация одного блока? Как реализуются ассоциативные структуры в мозге человека?

По мере расширения наших знаний взаимосвязь между физиологическим и теоретико-информационным объяснениями станет такой же, как взаимосвязь между квантовомеханическими и физиологическими объяснениями в биологии (или между объяснениями на основе физики твердого тела и теории программирования в вычислительной технике). Они образуют два взаимосвязанных уровня объяс-

нения, причем в нашем случае именно на пересечении этих уровней и обнаруживаются предельные возможности системы.

И наконец, последнее замечание. Следует ожидать, что, связывая во внутреннем аспекте психологию обработки информации с физиологией, мы должны будем во внешнем аспекте, то есть с точки зрения задач, предлагаемых внешней средой, связать психологию с общей теорией поиска в больших комбинаторных пространствах. Но это уже тема следующей главы, ибо теория «конструирования» и есть не что иное, как общая теория поиска.

Наука о конструировании. Как создавать искусственное

Издавна принято считать, что цель научных дисциплин состоит в изучении природных объектов, в объяснении их структуры и свойств, в то время как в задачу инженерной подготовки входит изучение искусственных объектов — как сконструировать и изготовить артефакты, обладающие желаемыми свойствами.

Но конструированием занимаются не только инженеры. По существу, мы конструируем всякий раз, когда разрабатываем способы превращения данной ситуации в другую, более приемлемую. И интеллектуальная деятельность, помогающая создать искусственные материальные объекты, принципиально ничем не отличается от той, которая помогает врачу прописать лекарство больному, экономисту разработать план сбыта продукции своего предприятия, а политическому деятелю подготовить программу социальных преобразований. Конструирование, или синтез, понимаемое в таком широком смысле, составляет основу обучения любой профессиональной деятельности. Именно это отличает области практической деятельности от сферы науки. Главной задачей как инженерных, так и архитектурных, юридических, педагогических, медицинских или административных учебных заведений по существу является научить конструированию.

Однако по иронии судьбы, несмотря на центральную роль конструирования во всякой профессиональной деятельности, естественные науки в нашем веке почти полностью вытеснили науки об искусственном из учебных программ институтов, готовящих инженеров, врачей, юристов и администраторов. Сегодня в технических институтах учат физике и математике, в медицинских институтах — биологии и физиологии, а школы делового администриро-

вания стали институтами, готовящими специалистов по новым разделам математики. Слова типа «прикладное» («прикладная математика» и т. д.) лишь маскируют этот печальный факт, но не меняют его сущности. Они означают лишь, что в профессиональных институтах из математики и естественных наук для детального изучения отбирается то, что, как считают, представляет наибольшую ценность для будущей практической деятельности специалиста. Но из этого вовсе не следует, что там учат конструированию, синтезу в противовес анализу.

Такой сдвиг в сторону естественных наук и отдаление от наук об искусственном наиболее быстро и интенсивно происходил в технике, деловом администрировании и медицине, хотя эти тенденции нельзя не заметить также в юридических и библиотечных институтах и на факультетах журналистики. Институты, где преподавание ведется на высоком уровне, подверглись этому влиянию в большей степени, чем более слабые институты. То же относится и к программам старших курсов по сравнению с младшими. Сегодня в первоклассных профессиональных учебных заведениях редкие диссертации посвящены решению задачи синтеза, а не какой-то задаче из области физики твердого тела или теории стохастических процессов. Правда, это замечание в меньшей степени — по причинам, на которых мы остановимся ниже, — относится к работам по вычислительной технике и вопросам организационного управления, а также к некоторым другим работам, например в области химической технологии.

Столь всеобъемлющая тенденция должна иметь какие-то глубокие причины. И одна из них достаточно очевидна. По мере того как стирается грань между университетом и профессиональными высшими учебными заведениями (в том числе техническими институтами), последние начинают все более заботиться о своей «академической респектабельности». А с точки зрения господствующих норм, академическая респектабельность требует решения задач, представляющих большие интеллектуальные трудности, имеющих аналитический характер, допускающих формализацию и систематическое преподавание. В прошлом же почти всё, если не всё, что мы знали о процессах синтеза и науках об искусственном, было интеллектуально рыхлым, интуитивным, неформализуемым и пригодным для преподавания лишь по принципу кулинарных рецептов. Так

зачем же университетам снисходить до того, чтобы учить или изучать, как конструировать машины или планировать рыночные стратегии, если можно заняться физикой твердого тела? Ответ был совершенно однозначным.

Сегодня эта проблема уже стала ясной многим, кто работает в области техники и медицины, и в несколько меньшей степени — в области организационного управления. Правда, находятся люди, которые не усматривают здесь никакой проблемы, считая обучение прикладным наукам все же лучшей альтернативой, нежели традиционное профессионально-техническое обучение. Если бы вопрос стоял о таком выборе, нам нечего было бы возразить¹. Однако ни одна из упомянутых альтернатив не является удовлетворительной. В прошлом профессиональные институты не знали, как учить профессиональному конструированию на интеллектуальном уровне, подходящем для университетов. Новые же институты едва ли не полностью сняли с себя ответственность за обучение основным профессиональным навыкам. Поэтому в действительности мы стоим перед задачей создания такой системы профессионального обучения, которая одновременно смогла бы достичь обеих целей: обучать как «искусственным», так и «естественным» наукам на высоком интеллектуальном уровне. А это по

¹ На самом деле перед таким выбором было поставлено прошлое поколение. Тогда важно было освободить профессиональное обучение от ремесленничества, а в качестве возможной альтернативы не существовало подлинной науки конструирования, даже в зачаточном виде. Поэтому прогресс лежал на пути сближения с фундаментальными науками. Одним из вдохновителей этой реформы был К. Комптон, и именно ее он сделал главной темой своей речи при избрании его в 1930 году президентом Массачусетского технологического института:

«Надеюсь... что все большее внимание в институте будет уделяться фундаментальным наукам, что они, как никогда ранее, окажут влияние на самый дух и результаты исследования, что все учебные курсы будут тщательно пересмотрены с целью выяснения, не подменяет ли перегрузка подробностями более эффективное обучение фундаментальным принципам».

Обратите внимание: Комптон особенно подчеркивает важность фундаментальных наук, и это не потеряло своего значения и по сей день. В этой главе я призываю не к тому, чтобы игнорировать фундаментальные науки, а лишь к тому, чтобы наряду с фундаментальными основами естественных наук включить в программу и фундаментальные основы инженерного искусства. В 30-е годы это не представлялось возможным, зато это можно сделать сейчас.

существо тоже задача «конструирования» — организационного конструирования.

Ключ к разрешению проблемы лежит в словах «искусственные науки», или «науки об искусственном». В двух первых главах я уже говорил о том, что наукам об искусственных явлениях постоянно грозит опасность раствориться и исчезнуть. Специфические особенности артефакта проявляются в тонкой пограничной области между естественными законами внутреннего устройства системы и естественными законами внешнего мира, в котором она функционирует. Что же можно сказать об этом нового? Что можно тут изучать, кроме пограничных наук, занимающихся используемыми средствами и закономерностями возникающих задач?

Искусственный мир сосредоточен именно в точках встречи внутреннего и внешнего. Его назначение — в достижении целей за счет приспособливания первого ко второму. Для тех, кто занимается искусственным, настоящая задача состоит в том, чтобы понять, как надо осуществлять это приспособливание средств к внешней среде. А здесь основным вопросом является самый процесс конструирования. Высшие учебные заведения смогут удовлетворять предъявляемым к ним профессиональным требованиям ровно в той степени, в какой они сумеют создать науку о конструировании — интеллектуально четкую, аналитическую, частично формализуемую, частично эмпирическую и пригодную для систематического преподавания.

Основной тезис этой главы состоит в том, что наука конструирования не только в принципе возможна, но и действительно уже зарождается. Она начала внедряться в технические институты, особенно через курсы по вычислительной технике и системному анализу, и в школы делового предпринимательства через курсы по организационному управлению. Возможно, что зачатки ее появились и в программах других институтов, но с этими двумя областями я просто больше знаком. Очертания науки о конструировании вырисовываются сегодня уже настолько ясно, что можно попытаться предсказать некоторые важные черты, которыми технические институты завтра будут отличаться от физических факультетов, а институты организационного управления — от экономических и психологических учебных заведений. Но перейдем к существу вопроса.

Логика конструирования: фиксированные альтернативы

Нам придется начать с некоторых вопросов логики¹. Естественные науки интересуются тем, каковы природные объекты и их свойства. Для этого вполне пригодны обычные логические системы, например исчисление высказываний и исчисление предикатов. Поскольку такая логика занимается декларативными утверждениями, она вполне подходит для изучения законов, по которым из одних утверждений о мире путем логического вывода получаются другие утверждения.

Конструирование же, напротив, занимается тем, каковы должны быть вещи, и созданием артефактов, реализующих поставленные цели. Поэтому уместно задать вопрос, пригодны ли формы рассуждений, принятые в естественных науках, для процессов конструирования? Не было бы ничего удивительного, если бы слова «должны быть» вызвали необходимость в новых дополнительных правилах вывода или в изменении правил, уже существующих в декларативной логике.

Парадоксы императивной логики

Чтобы показать потребность в новой логике — логике императивов или, иначе говоря, в нормативной, деонтической логике, — были построены различные парадоксы. В обычной логике из высказываний «собаки — домашние животные» и «кошки — домашние животные» можно вывести заключение: «собаки и кошки — домашние животные». Но можно ли из «собаки — домашние животные», «кошки — домашние животные» и «необходимо держать у себя домашних животных» заключить, что «необходимо держать у себя кошек и собак»? И можно ли из высказывания «дай мне иголку и нитку» по аналогии с законами декларативной логики вывести: «дай мне иголку или нитку»? Раздражительные люди, пожалуй, предпочтут вовсе обойтись без иголки и без нитки, чем получить одно без другого, а те, кому дорог покой, — без кошек и собак, чем иметь и тех и других вместе.

¹ Вопросы логической формализации процессов синтеза я подробно рассматривал в двух статьях: [32] и [33]. Этим двум работам я и собираюсь следовать здесь.

В ответ на вызов, содержащийся в этих кажущихся парадоксах, было построено несколько конструкций модальных логик, оперирующих всяческими «следует», «должно» и «нужно». Но, насколько я могу судить, ни одна из этих систем не была достаточно разработана или достаточно широко опробована для того, чтобы можно было убедиться в ее способности справляться с логическими потребностями процесса конструирования.

Но, к счастью, в этом и не было надобности, так как можно показать, что все потребности конструирования удовлетворяются за счет незначительной модификации обычной декларативной логики. Следовательно, создавать какую-то особую логику императивов вообще необязательно¹.

Сведение к декларативной логике

Самый простой способ выяснить, какого рода логика требуется для процессов конструирования, заключается в том, чтобы выяснить, какой логикой пользуются конструкторы, когда они заботятся о логической стройности своих рассуждений. Конечно, это не имело бы смысла, если бы люди, занимающиеся конструированием, всегда мыслили бы неряшливо, нечетко и туманно и проявляли чрезмерную склонность к интуитивным решениям. В этом случае можно было бы утверждать, что, какой бы логикой они ни пользовались, это не та логика, которую следует взять на вооружение.

Однако существует обширная область практического конструирования, или синтеза, в которой стандарты строгости выводов настолько высоки, насколько это только вообще возможно. Я имею в виду область так называемых методов оптимизации, наиболее сильно развитых в рам-

¹ Я хотел бы особо подчеркнуть слово «необязательно». Стоило мне как-то высказаться в этом роде (см. вторую из работ, указанных в предыдущей сноске), как один специалист по модальной логике обвинил меня в том, будто я утверждаю, что создание модальной логики «невозможно». Но такое утверждение было бы, очевидно, ложным. Доказать существование модальной логики можно тем же путем, что и существование жирафов, — достаточно лишь показать некоторых из них. Вопрос не в том, существует ли такая логика, а в том, на что она пригодна. Специалисту по модальной логике не должно было бы составить труда отличить «необязательно» от «невозможно».

ках теории статистических решений и теории организационного управления, но приобретающих все большее значение и в теории инженерного конструирования. Теория вероятностей и теория полезности и их пересечение стали предметом пристального внимания не только специалистов практического синтеза, но и значительного числа наиболее выдающихся логиков и математиков настоящего и предшествовавшего поколений, в том числе Ф. Рамзея, Б. де Финетти, А. Уолда, Дж. фон Неймана, Дж. Неймана, К. Эрроу и Л. Сэвиджа.

Логика методов оптимизации может быть обрисована следующим образом. «Внутреннюю среду» задачи синтеза представляют множеством альтернатив действия. Эти альтернативы могут задаваться *in extenso*¹, но чаще они задаются посредством *управляющих переменных* с заданной областью возможных значений. «Внешняя среда» задается множеством параметров, которые либо известны в точности, либо описываются статистически. Цели адаптации внутренней среды к внешней определяются некоторой функцией полезности — функцией (обычно скалярной) управляющих переменных и параметров внешней среды, — а также, возможно, некоторым числом ограничений (скажем, в виде неравенств для функций от управляющих переменных и параметров внешней среды). Задача оптимизации состоит в том, чтобы найти допустимое множество значений управляющих переменных, которые не нарушают сформулированных ограничений и максимизируют функцию полезности при заданных значениях параметров внешней среды. (В вероятностном случае нам пришлось бы говорить не «максимизировать функцию полезности», а «максимизировать математическое ожидание функции полезности».)

Типичным примером применения этой схемы может служить так называемая «задача о диете», представленная в помещенной ниже таблице. Предположим, что у нас имеется перечень продуктов питания. Управляющими переменными служат количества каждого продукта, включаемые в диету. Параметрами внешней среды являются цены на продукты и их питательная эффективность (калорийность, содержание витаминов, минеральных солей и т. п.). Наконец, функцией полезности является стоимость (взя-

¹ С исчерпывающей полнотой, перечислением. — *Прим. перев.*

тая со знаком минус) диеты, удовлетворяющей некоторым ограничениям (например, питательность диеты не должна превышать 2000 калорий в день, что она должна обеспечивать определенные минимальные потребности в витаминах и минеральных солях и чтобы, скажем, турнепс не приходилось есть чаще одного раза в неделю). Все эти ограничения можно считать характеристиками внутренней среды. Задача заключается в том, чтобы выбрать такие количества каждого продукта, чтобы они для заданных цен удовлетворяли требованиям калорийности и другим побочным условиям при минимальных денежных затратах.

Парадигма императивной логики

<i>Термины</i>	<i>Пример:</i> задача о выборе диеты
Управляющие переменные («средства»)	Количество продуктов
Фиксированные параметры («законы»)	{ Цены на продукты Питательные свойства продуктов
Ограничения Функция полезности } («цели»)	{ Требования питательности Стоимость диеты
Ограничения характеризуют внутреннюю среду, а параметры — внешнюю среду.	

Задача. При заданных ограничениях и значениях фиксированных параметров найти значения управляющих переменных, соответствующих максимуму функции полезности.

Задача о диете представляет собой простейший пример класса задач, которые легко решаются даже при огромном числе переменных с помощью математического метода, известного под названием линейного программирования. Этот метод будет подробнее рассмотрен ниже, а сейчас остановимся на самой логике процесса.

Поскольку задача оптимизации после своей формализации становится обычной математической задачей на отыскание максимума функции при заданных ограничениях, очевидно, что логикой, используемой для ее решения, должна быть стандартная логика исчисления предикатов, на которой покоится вся математика. Каким же образом в этом методе удастся избежать применения особой логики императивов? Это достигается тем, что в рассмотренные вводятся множество возможных миров. Задача форму-

лируется так. Сначала рассматриваются все возможные миры, удовлетворяющие ограничениям внешней среды. Затем среди них отыскивается такой конкретный мир, который удовлетворяет всем остальным ограничениям, связанным с целями, и максимизирует функцию полезности. Логика этого процесса аналогична тому, как если бы к уже существующим естественным законам, проявляющимся в ограничениях, налагаемых внешней средой, мы прибавили еще новые «законы природы» — ограничения, связанные с целями, и требование максимизации функции полезности¹. Мы просто спрашиваем себя, какие значения управляющие переменные *имели бы* в мире, удовлетворяющем всем этим условиям, а затем заключаем, что управляющим переменным *следует* иметь именно эти значения.

Поиск оптимума

Наши рассуждения показывают, что уже сейчас мы в состоянии предложить две центральные темы для будущей программы курса науки о конструировании:

1. *Теория полезности и теория статистических решений — логические основания рационального выбора среди заданных альтернатив.*

2. *Совокупность методов, позволяющих на практике отыскивать среди имеющихся альтернатив оптимальную.*

Отыскание оптимальной альтернативы оказывается простым делом лишь в тривиальных случаях. Поэтому для того, чтобы теория полезности была приложима к решению задач «конструирования» из реальной жизни, ее следует дополнить аппаратом, позволяющим проводить необходимые расчеты. Всем известна дилемма рационально

¹ Использование понятия «возможных миров» для включения императивной логики в декларативную имеет свои истоки, по крайней мере в работе Йоргенсена [34]. См. также [1], гл. 3. В последнее время эти же идеи использовали некоторые логики в попытке перебросить формальный мостик между исчислением предикатов и модальной логикой с помощью так называемых семантических или теоретико-модальных методов. Упомянем в этой связи работу Монтага [35], в которой содержатся ссылки на работы Кейнджера и Крипке, а также работу [46]. Хотя все эти теоретико-модальные предложения весьма разумны в своей основе, ни одно из них, по-видимому, не уделяет достаточного внимания той роли, которую в этой теории играют управляющие переменные и целевые ограничения.

мыслящего шахматиста. Оптимальную стратегию шахматной игры легко сформулировать. Для этого достаточно приписать выигрышу значение «+1», ничьей «0», а проигрышу «-1», рассмотреть все возможные варианты развития партии и, двигаясь методом минимакса в обратном направлении от исхода каждого варианта в предположении, что каждый игрок в любой позиции делает наилучший из возможных ходов, определить, какой ход нужно делать. Единственная трудность состоит в том, что число необходимых для этого вычислений оказывается астрономически большим (порядка 10^{120}) и потому их просто невозможно выполнить — ни вручную, ни с помощью существующих вычислительных машин, ни даже с помощью машин, на которые можно рассчитывать в будущем.

Теория «конструирования» в приложении к шахматам должна охватывать не только утопический в этом случае принцип минимакса, но и практически реализуемые процедуры поиска хороших ходов в реально возникающих на доске позициях за реальное время и с помощью реальных людей или реальных машин. Сегодня мы не можем говорить о каких-либо особенно удачных процедурах такого рода, если не считать процедур, хранящихся в памяти гроссмейстеров. Существует, однако, по меньшей мере одна программа — так называемая программа Гринблатта [37], которая позволила вычислительной машине неплохо выступать в воскресных турнирах и получить разряд С по классификации шахматной федерации США. Аналогичные процедуры существуют и в других областях задач, представляющих, возможно, больший практический интерес, чем шахматы.

Таким образом, второй темой программы обучения науке о конструировании должны стать эффективные вычислительные методы, позволяющие находить оптимальные действия в реальных ситуациях или в разумных аппроксимациях реальных ситуаций. В рамках этой темы сегодня существует несколько важных направлений; большинство из них разработано — или по крайней мере доведено до уровня, допускающего практическое использование, — за последние четверть века. К их числу относятся теория линейного программирования, динамическое программирование, геометрическое программирование, теория массового обслуживания и теория автоматического управления.

Как находить удовлетворительные действия

В рамках курса по вычислительным методам не обязательно рассматривать одни лишь вопросы оптимизации. В традиционных методах инженерного конструирования гораздо шире использовались различные неравенства, задававшие условия удовлетворительной работы, чем максимумы и минимумы. Так называемые «показатели качества» позволяли сравнивать различные конструкции и решать, какая из них «лучше», но редко давали возможность оценить, что же «самое лучшее». В качестве примера сошлемся на методы корневого годографа, который нашел применение при конструировании систем автоматического регулирования.

В английском языке мне не удалось найти подходящего слова для методов принятия решений, позволяющих отыскивать хорошие или удовлетворительные решения вместо оптимальных. Поэтому несколько лет назад я ввел для таких процедур новый термин «satisficing»¹. Конечно, по меньшей мере неразумно довольствоваться удовлетворительным решением, если есть все возможности получить оптимальное. Вряд ли кто согласится ограничиться хорошим, если он может иметь наилучшее. Но обычно задачи конструирования не ставятся таким образом.

В реальном мире мы, как правило, лишены возможности выбора между удовлетворительным и оптимальным решениями, так как крайне редко располагаем методом, позволяющим найти оптимум. Рассмотрим, например, хорошо известную комбинаторную задачу о коммивояжере. Пусть заданы географические положения некоего множества городов. Требуется найти маршрут, который позволит коммивояжеру обойти все эти города кратчайшим путем. Для этой задачи имеется естественный алгоритм оптимизации (аналогичный описанному минимаксному алгоритму для игры в шахматы): перебрать все маршруты и выбрать наикратчайший. Но если число городов хоть сколько-нибудь велико, этот алгоритм вычислительно нереализуем (число различных маршрутов для N городов равно $N!$). И хотя удалось найти некоторые пути сокращения поиска, до сих пор не найден алгоритм, позволяющий точно

¹ В дальнейшем этот термин будет переводиться как «удовлетворительный». — *Прим. перев.*

решать задачу о коммивояжере при допустимом объеме вычислений, скажем для множества из пятидесяти городов.

Но, вместо того чтобы держать нашего коммивояжера дома, мы, естественно, выберем для него если не оптимальный, то хотя бы удовлетворительный маршрут. В большинстве случаев простой здравый смысл подскажет достаточно хороший маршрут, но с помощью какой-либо из известных эвристических процедур¹ удастся найти еще лучший.

Почти все ситуации, в которых из-за неумения оптимизировать приходится ограничиваться поиском удовлетворительного, можно распознать по одному признаку. Во всех них множество возможных альтернатив «задано» лишь в абстрактном смысле слова (например, задано некоторое правило, позволяющее по уже известным альтернативам строить новые, и так до тех пор, пока мы не переберем все возможные альтернативы), но не «задано» в том единственном смысле слова, который помог бы нам на практике. Мы не можем, не нарушая пределов практической вычислимости, перебрать все возможные альтернативы и сравнить их достоинства. Мы также не можем распознать наилучшую альтернативу до тех пор, пока не переберем все остальные, даже если нам очень повезет и мы натолкнемся на нее в самом начале поиска. Поэтому приходится удовлетворяться такой стратегией поиска, которая позволяет находить приемлемую альтернативу ценой сравнительно небольшого поиска.

Как правило, ожидаемая продолжительность поиска удовлетворительной альтернативы зависит от того, насколько высоки установленные стандарты, по которым мы считаем ее приемлемой, но очень мало чувствительна к размерам того множества, в котором ведется поиск. Время, которое требуется на то, чтобы в стоге сена отыскать достаточно острую иголку, зависит от плотности распределения острых иголок в стоге, а не от того, насколько велик стог.

Поэтому, когда мы пользуемся одним из методов поиска удовлетворительных альтернатив, часто не важно, «задано» ли все множество возможных альтернатив неко-

¹ Задача о коммивояжере и некоторые очень похожие комбинаторные задачи типа «задачи о размещении складов» имеют большое практическое значение, например при планировании расположения энергостанций для сложной энергетической системы.

торым формальным, но практически неэффективным алгоритмом, или нет. Часто даже совсем не имеет значения, каковы размеры этого множества.

По этой причине такие методы могут быть распространены и на те проблемы конструирования, где множество альтернатив не задано даже в том смысле, в каком оно задано в задаче о коммивояжере. Наша следующая задача и состоит в том, чтобы исследовать эту возможность.

Логика конструирования: как отыскивать альтернативы

Как только мы сталкиваемся со случаем, где альтернативы не заданы ни в каком конструктивном смысле, а должны генерироваться, нам следует еще раз спросить себя, не требует ли это каких-то новых форм мышления или же здесь снова можно обойтись стандартной логикой декларативных высказываний.

В случае оптимизации мы задавали вопрос: какой из всех возможных (то есть достижимых при возможных значениях управляемых переменных) миров является наилучшим (дает наивысшее значение критерия качества)? Вопрос этот относится к числу чисто эмпирических — для ответа на них нужны только факты и обычная декларативная логика.

В нашем же случае, когда требуется найти удовлетворительный вариант, всякий раз по мере появления нового кандидата мы станем спрашивать себя: удовлетворяет ли эта альтернатива всем критериям качества? Легко видеть, что это тоже эмпирический вопрос; он не ставит перед логикой никаких новых проблем. Но можно ли сказать то же о процессе поиска новых альтернатив? Какова должна быть логика такого поиска?

Анализ средств и целей

Любая целенаправленная система связана с внешней средой по двум различным каналам: по афферентным, или сенсорным, каналам, или каналам восприятия, по которым она получает информацию о внешней среде, и по эфферентным, или двигательным, каналам, через которые

она осуществляет воздействие на внешнюю среду¹. Такая система должна располагать определенными возможностями хранения в своей памяти информации о состояниях мира — афферентной, или сенсорной, информации — и о действиях — эфферентной, или двигательной, информации. А возможность достижения поставленных целей зависит от формирования ассоциаций, простых или очень сложных, между конкретным характером изменения состояния внешнего мира и конкретными действиями, которые (с той или иной степенью надежности) вызовут такие изменения.

Если не считать нескольких врожденных рефлексов, у новорожденного нет средств для разумного увязывания афферентной информации с действиями. Поэтому для его начального обучения очень важно, чтобы он узнал, что определенные действия или последовательности действий приведут к определенному изменению состояния мира в том виде, в каком он его воспринимает. И пока он не накопил достаточно таких знаний, для него мир чувств и мир действий — два отдельных, совершенно не связанных между собой мира. И только по мере того, как опыт помогает ему увязать элементы одного мира с другим, он получает возможность воздействовать на мир целенаправленно.

Вычислительная программа, известная под названием «общий решатель задач» (GPS)², созданная как попытка имитации некоторых основных особенностей подхода человека к решению задач, зримо показывает, что целенаправленность действия зависит от того, удастся ли перекинуть мост между афферентным и эфферентным мирами. В своей афферентной, сенсорной, части GPS должна быть в состоянии представлять как имеющуюся ситуацию, так и желаемые ситуации и объекты. Она должна также уметь оценивать различие (*расхождение*) между желаемым и тем, что есть. В эфферентной части GPS должна быть в состоянии представлять *действия*, преобразующие объек-

¹ Мы не утверждаем, что каналы этих двух типов действуют независимо друг от друга, так как это было бы наверняка неправильно в отношении живых организмов, но говорим лишь о возможности принципиального и до некоторой степени нейрофизиологического разделения входных и выходных потоков.

² GPS — General Problem Solver — известная программа, разработанная Ньюэллом, Саймоном и Шоу. Подробнее см. книгу Эрнста и Ньюэлла [71]. — *Прим. перев.*

ты или ситуации. И, для того чтобы вести себя целенаправленным образом, GPS должна время от времени выбирать такие конкретные действия, которые имеют шансы уменьшить или полностью устранить обнаруженное расхождение между желаемым и существующим. В механизме GPS это достигается с помощью *таблицы связей*, в которой каждый тип обнаруживаемого расхождения увязывается с определенным действием, помогающим это расхождение устранить. Именно с помощью этой таблицы устанавливаются необходимые связи между афферентным и эфферентным мирами. А так как достижение цели обычно требует некоторой последовательности действий и так как некоторые попытки могут оказаться безрезультатными, GPS должна обладать также способностью обнаруживать, насколько успешными оказываются ее действия (то есть каково расхождение между желаемым и имеющимся), и опробовать различные пути к достижению цели.

Логика поиска

Итак, GPS — это система, занимающаяся селективным поиском в (возможно, достаточно большом) пространстве. Цель поиска заключается в отыскании и составлении такой последовательности действий, которая преобразует данную ситуацию в желаемую.

Каковы же законы логики, управляющей этим поиском? Требуется ли здесь нечто большее, чем обычная логика? Нужна ли модальная логика для рационализации этого процесса?

Как нам кажется, обычной логики здесь вполне достаточно. Для того чтобы рассмотреть взаимоотношения между афферентным и эфферентным мирами, представим себе поведение GPS как движение по большому и сложному лабиринту. Перекресткам, или узлам, этого лабиринта соответствуют ситуации с различными афферентными характеристиками, то есть разные состояния внешнего мира, а коридоры, связывающие узлы, — это действия, или поступки, преобразующие одну ситуацию в другую. Тогда в любой заданный момент времени перед GPS неизменно стоит один-единственный вопрос: «Какое действие попробовать теперь?» А так как некоторые сведения, которыми GPS располагает о зависимости

между действиями и изменениями ситуаций, не точны, возникает та самая проблема выбора в условиях неопределенности, о которой уже говорилось выше.

Для такого поиска характерно лишь то, что искомое решение (суммарное действие, отыскиваемое системой) получается в виде некоторой последовательности элементарных действий. При этом огромное число открывающихся альтернатив определяется тем, что эти элементарные действия (число которых может быть и не очень большим) можно сочетать в последовательности бесчисленным разнообразием способов.

Что можно выиграть, рассматривая элементарные действия вместо составленных из них последовательностей? Много, если афферентная характеристика ситуации распадается на факторы, которые, хотя бы приблизительно, согласуются с разложением суммарного действия на элементарные. В программе GPS в неявном виде заложена мысль о том, что если желаемая ситуация отличается от имеющейся чертами P_1, P_2, \dots, P_n и если действие A_1 устраняет расхождение P_1 , действие A_2 — расхождение P_2 и т. д., то имеющуюся ситуацию можно преобразовать в желаемую, выполнив последовательность действий A_1, A_2, \dots, A_n .

С точки зрения законов обычной логики такой вывод совсем не обязателен во всех возможных мирах. Для того чтобы он был справедлив, нужно, чтобы выполнялись некоторые достаточно сильные предположения о независимости эффектов различных действий.

Можно сказать, что такой подход возможен лишь в мирах, которые в определенном смысле слова «аддитивны» или «факторизуемы». (Видимость парадокса в упоминавшихся выше ситуациях с собакой и кошкой или иголкой и ниткой возникает именно из-за неаддитивности действий в этих двух случаях. Первый из них, если воспользоваться экономическими терминами, относится к категории ситуаций с убывающими, а второй — с возрастающими нормами прибыли.)

Однако реальные миры, с которыми приходится иметь дело при решении задач и в процессе синтеза, редко оказываются вполне аддитивными в этом смысле. Каждое действие может иметь побочные последствия (то есть может создавать новые расхождения), а иногда может быть осуществлено лишь по выполнении некоторых побочных ус-

ловий (требует устранения других расхождений, прежде чем это действие может быть выполнено). В такой ситуации нет уверенности, что какую-то подпоследовательность, позволяющую добиться *отдельных* целей, можно дополнить таким образом, чтобы удовлетворить *всем* ограничениям и добиться *всех* целей (хотя бы они и состояли лишь в «удовлетворительном» решении задачи).

По этой причине системы для решения задач и процедуры «конструирования», применяемые в реальном мире, не просто *собирают* решение задачи из элементарных действий, а вынуждены *отыскивать* подходящие комбинации. Во время такого поиска часто полезно не ставить все на одну карту, то есть не идти по одному пути до полного успеха или полного провала. Разумнее с самого начала одновременно исследовать несколько возможных путей и проводить поиск сразу по нескольким направлениям, кажущимся в данный момент наиболее многообещающими. Если один из активных путей перестает казаться привлекательным, его можно заменить другим, имевшим до того более низкий приоритет.

Итак, рассмотрение процесса синтеза в случае, когда альтернативы не заданы, дает по крайней мере еще три темы для обучения науке о конструировании:

3. *Как приспособить стандартную логику к задачам поиска альтернатив?*

Решения здесь имеют вид последовательности действий, приводящих к возникновению ситуаций, которые удовлетворяют всем предписанным ограничениям. И если цели обеспечивают лишь удовлетворительное, а не оптимальное решение, возможны различные решения задачи, то есть редко имеется лишь одна-единственная приемлемая ситуация. Ищутся действия *достаточные*, а не *необходимые* для достижения цели.

4. *Как воспользоваться возможностями параллельной или близкой к параллельной факторизации различий?*

Примером метода, использующего такую факторизацию в широком диапазоне задач, можно считать «анализ средств и целей» (means-end analysis).

5. *Как распределять ресурсы на поиск между различными частично испробованными последовательностями действий?*

На последнем вопросе мне хотелось бы остановиться несколько подробнее.

Конструирование как распределение ресурсов

Задачи распределения ресурсов возникают в проблемах конструирования по двум совершенно различным поводам. Во-первых, одним из признаков удачной конструкции может быть экономия каких-то редких ресурсов. Во-вторых, сам процесс конструирования предполагает управление ресурсами, находящимися в распоряжении конструктора. Цель такого управления в том, чтобы не допустить ненужного распыления усилий по направлениям, оказавшимся бесперспективными.

О сохранении ресурсов или о минимизации их расходов, как об одном из критериев при конструировании, едва ли можно сказать что-то особенное. Минимизация расходов в неявном виде присутствовала во всех задачах технического конструирования, но еще совсем недавно это делалось именно только в неявном виде. Сейчас оценка затрат в процессе конструирования стала играть все более заметную роль. И сегодня можно смело утверждать, что инженеров, которые призваны заниматься конструированием, необходимо обучить всей совокупности практических и теоретических методов, которые известны экономистам как анализ «затраты — эффективность».

Пример конструирования шоссейной дороги

Идея о том, что в процессе конструирования должны приниматься во внимание и сами затраты на конструирование, появилась гораздо позднее и до сих пор еще не получила широкого признания, хотя ею часто пользуются, не отдавая себе в этом отчета. Примером сознательного ее использования может служить работа Мангейма [38], посвященная решению задач проектирования шоссейных дорог.

Мангейм в своем исследовании исходит из двух основных посылок. Во-первых, он предлагает решать задачу постепенно, начиная с уровня самого общего плана и кончая конкретными действиями по строительству дороги. Во-вторых, он пытается приписывать численные оценки различным планам более высокого уровня, используя эти оценки в качестве основы для решения, какие из этих планов следует доводить до более конкретных разработок.

В случае проектирования шоссейных дорог поиск на самом верхнем уровне направлен на выявление «перспективных зон», то есть участков территории, внутри которых можно ожидать выбора удачной трассы. Внутри каждой перспективной зоны с целью более тщательного исследования выбираются одна или несколько полос, и уже затем для каждой из них разрабатываются конкретные варианты. Разумеется, общая схема не ограничивается такой трехуровневой структурой, а может быть соответствующим образом обобщена.

Правило, по которому Мангейм принимает решение о том, какие альтернативы следует подвергнуть дальнейшей детализации, основывается на численных оценках затрат, приписываемых каждому виду деятельности по проектированию, и оценках предполагаемых затрат на само строительство дороги для каждого плана. Оценка стоимости строительства дороги для каждого плана представляет собой более высокого уровня прогноз общей стоимости дороги при условии дальнейшей детализации. Другими словами, эта мера того, насколько перспективен рассматриваемый план. Дальнейшей разработке подлежат лишь те планы, которые кажутся наиболее обещающими с учетом затрат на предполагаемое проектирование.

В конкретной методике, предлагаемой Мангеймом, степень «перспективности» каждого плана оценивается распределением вероятностей исходов, которые можно ожидать, если этот план будет доведен до реализации. Оценить это распределение должен инженер — и в этом серьезная слабость метода, — но после того, как такая оценка получена, далее уже можно пользоваться формальным аппаратом байесовой теории решений. Принятая Мангеймом конкретная вероятностная модель не является существенной для его метода. Столь же удовлетворительными могли бы оказаться и другие методы измерения полезности, не обладающие байесовой структурой.

При проектировании шоссейной дороги оценка планов верхнего уровня выполняет две функции: во-первых, отвечает на вопрос: «Где вести поиск на следующем шаге?» и, во-вторых, на вопрос: «Где прекратить поиск и признать имеющееся решение удовлетворительным?» Следовательно, мы имеем здесь одновременно и механизм, указывающий направление поиска, и критерий удовлетворительного решения, определяющий момент прекращения поиска.

Схема выбора направления поиска

Обобщим наши представления о механизмах выбора направления поиска, выйдя за пределы конкретной задачи Мангейма о проектировании шоссежных дорог, а также за пределы конкретной схемы поиска, основанной на байесовой теории решений. С этой целью рассмотрим типичную структуру программы для решения задач. Такая программа начинается с поиска по всем возможным направлениям, заноса в память «дерево» исследованных ею путей. Каждому концу каждой его ветви — то есть концу каждого частичного пути — приписывается число, которое, по предположению, выражает «ценность» этого пути.

Однако термин «ценность» здесь используется неоправданно. Частичный путь не является решением задачи, а «истинная» ценность любого пути, не ведущего к решению, должна быть равна нулю. Поэтому об этих ценностях полезнее думать, как об оценках выигрыша, который даст продолжение поиска в заданном направлении, чем о «ценности» в более очевидном смысле слова. Не исключено, что окажется целесообразным приписать относительно высокую ценность частичному исследованию, которое *может* привести к очень хорошему решению, но с низкой вероятностью успеха. Ведь если дальнейшее исследование подтвердит бесперспективность поиска, то мы рискуем лишь стоимостью самого поиска. Неудачное решение мы вовсе не обязаны будем принять, мы просто продолжим поиск в других направлениях. Поэтому схема назначения оценок частичным путям достижения цели может резко отличаться от функции оценки предполагаемого конечного решения¹.

Но как только мы поняли, что смысл приписывания оценок незавершенным путям достижения цели состоит лишь в том, что эти оценки служат ориентирами при выборе следующего шага исследования, у нас возникает желание продолжить обобщение. При выборе следующего шага поиска может оказаться полезной любая информация, собранная в процессе поиска, так что вовсе не обязатель-

¹ В неочевидности этого факта можно убедиться на следующем примере. В большинстве программ для игры в шахматы подобные или идентичные процедуры оценки использовались как для выбора направления поиска, так и для оценки позиций, получающихся в конце пути.

но ограничиваться оценкой частичной траектории поиска.

Например, в шахматной программе в процессе исследования может возникнуть промежуточный ход, отличный от предлагавшихся «генератором ходов». И в каком бы контексте (на какой бы ветви дерева поиска) это не произошло, этот ход можно теперь изъять из контекста и рассмотреть на фоне других последовательностей ходов. Эти идеи (на довольно ограниченной основе) Бейлор [39] внес в программу MATER, предназначенную для поиска матовых комбинаций в шахматах, что существенно усилило эту программу.

Следовательно, процесс поиска можно рассматривать — что и делается в большинстве случаев, когда речь идет о решении задач, — как процесс поиска решения задачи. Но с более общих позиций его можно рассматривать и как процесс сбора информации о структуре задачи, которая в конечном счете позволит найти решение. Подобная точка зрения в одном важном смысле обладает большей общностью. Она содержит в себе указание на то, что информация, накопленная при движении вдоль любой конкретной ветви дерева поиска, может быть использована во многих контекстах, а не только в том, где она была получена. В настоящее время имеется лишь несколько программ решения задач, про которые можно сказать, что они хотя бы в ограниченной степени продвинулись от устаревшей более узкой точки зрения к более современной. И здесь открывается важное направление исследований по теории конструирования.

Структура синтеза. Иерархия

В первой главе я уже указывал на некоторые причины, позволяющие предполагать, что всякая сложная система устроена по иерархическому, многоуровневому принципу. Это убеждение основывается на том, что каждая подсистема сложной системы выполняет определенную функцию, а из всех этих функций складывается функция системы в целом. И так же как «внутреннюю среду» всей системы можно охарактеризовать, описав ее функции и не вдаваясь в подробности ее устройства, «внутренние среды» каждой подсистемы можно определять, описывая их функции и не указывая подробностей механизма этой подсистемы. Но к этому вопросу я еще вернусь в следующей главе.

Один из мощных методов синтеза такой сложной структуры состоит в поисках плодотворных способов ее разложения, декомпозиции на квазинезависимые элементы, соответствующие различным функциональным блокам системы. Синтез каждой такой составляющей можно осуществлять с определенной степенью независимости от того, как именно решается задача синтеза других частей. Это возможно потому, что для работы системы в целом важна лишь функция каждой подсистемы и не имеет значения их детальное устройство¹.

Нет оснований полагать, что подобная декомпозиция задачи конструирования на ее функциональные компоненты будет единственной. В ряде случаев могут существовать приемлемые другие декомпозиции, основанные на иных принципах. С этим хорошо знакомы все специалисты по проектированию административных организаций, структуру которых можно разрабатывать по функциональному, технологическому, территориальному и другим принципам. В классической теории организаций уделяется большое внимание именно вопросу декомпозиции задачи организации на совокупность взаимосвязанных подзадач.

Цикл «генерирование — проверка»

Один из способов изучения декомпозиций, согласно которому взаимосвязью между составляющими нельзя полностью пренебрегать, состоит в том, чтобы рассматривать процесс синтеза как совокупность процесса генерирования альтернатив и процесса проверки этих альтернатив относительно всей совокупности требований и ограничений. Не обязательно, чтобы такой цикл генерирования — проверки был единственным. Возможна целая последовательность таких циклов. Генерирование в неявном виде определяет декомпозицию задачи конструирования, а проверка гарантирует, что все косвенные последствия декомпозиции будут учтены и взвешены. Различные декомпо-

¹ Такой подход к синтезу сложных структур был опробован Кристофером Александером [40]. В своей книге он приводит также некоторые автоматические процедуры поиска правдоподобных декомпозиций на основе заданных матриц взаимосвязей функций элементов системы.

зиции соответствуют различным способам распределения ответственности за конечную разработку между процессом генерирования альтернатив и процессом проверки.

В качестве сильно упрощенного примера, поясняющего эту мысль, можно взять процесс проектирования зданий. Здесь роль генерируемых альтернатив будут играть различные варианты фасадов, а в ходе проверок должно выясняться, совместима ли с каждым из вариантов вся совокупность требований, диктуемых необходимостью иметь в этом доме заранее запланированные помещения с выходящими наружу окнами. В то же время генерировать можно и предложения по размещению комнат, а проверку использовать для того, чтобы убедиться, согласуются ли эти предложения с эстетическими требованиями, предъявляемыми к внешнему виду здания. Дом можно проектировать как снаружи, так и изнутри¹.

При организации процесса конструирования или проектирования можно также по-разному решать, как далеко следует заходить в разработке подсистем, прежде чем приступать к подробной разработке общей координирующей конструкции. Или наоборот, насколько подробно нужно разработать общий план увязки отдельных подсистем, прежде чем приступать к проектированию различных их элементов (или возможных элементов). Все эти варианты проектирования хорошо известны архитекторам. С ними приходится сталкиваться и композиторам при решении, насколько далеко должна быть разработана архитектура музыкальной композиции до сочинения входящих в нее музыкальных тем и прочих элементов. С этой же проблемой сталкиваются и составители программ для вычислительных машин, которым приходится выбирать между движением от общего к частному — от блок-схемы управляющей программы к стандартным подпрограммам — и движением от частного к общему — от подпрограмм к координирующей программе.

Теория конструирования должна включать принципы (большинства из них еще не существует), позволяющие устанавливать порядок и последовательность процедур в процессе синтеза.

¹ Многими мыслями этого раздела я обязан Джону Грейсону, разрабатывающему систему проектирования на ЭВМ, которая позволит провести дальнейшее исследование затронутых вопросов.

Если вспомнить теперь, что в общем случае процесс состоит в поиске удовлетворительного, а не оптимального проекта, то становится ясным, что последовательность работы и распределение труда между фазами генерирования альтернатив и их проверки могут сказаться не только на эффективности использования отведенных на синтез ресурсов, но и на самом характере конечной «конструкции». И то, что мы обычно называем «стилем», может в столь же сильной степени зависеть от этих решений, как и от предпочтений, отдаваемых различным целям при конструировании. Архитектор, для которого внешний вид здания важнее его внутренней планировки, будет проектировать совсем другие здания, нежели архитектор, идущий от интерьера к внешнему виду, даже если взгляды обоих на характеристики, которым должен удовлетворять хороший проект, совпадают.

Как только мы приступаем к проектированию таких сложных систем, как города, здания или экономические системы, нам следует отказаться от попыток создать систему, оптимизирующую некую гипотетическую функцию полезности. Напротив, мы должны задуматься над тем, не являются ли упомянутые различия в стиле весьма желательными вариациями процесса конструирования, а вовсе не альтернативами, относительно которых нужно решать, какая из них лучше. Разнообразие в пределах, допускаемых критерием удовлетворительности, само по себе может быть желанной целью среди многих причин хотя бы просто потому, что позволяет нам приписывать ценность самому поиску, а не только его результатам, то есть дает возможность рассматривать процесс конструирования как ценный творческий род деятельности для тех, кто им занимается.

Обычно мы смотрим на планирование городов как на средство создания системы, которая удовлетворяла бы нуждам населения. Но, быть может, планирование городов скорее следует рассматривать как важную творческую деятельность, в которой должны были бы принимать участие различные члены общества, помимо профессионалов?

Как бы там ни было, надеюсь, я достаточно ясно показал, что как форма проекта, так и форма и организация самого процесса проектирования входят как существенные

составляющие в теорию конструирования. Эти вопросы составляют шестую тему предлагаемой мною программы курса теории конструирования:

б. Организация сложных структур и связанные с этим принципы организации процесса конструирования.

Форма представления задачи конструирования

В сделанных выше замечаниях мы далеко не исчерпали всех аспектов зарождающейся науки конструирования. В частности, мало было сказано по вопросу о влиянии на конструирование характера представления задачи. И хотя важность этого вопроса сегодня общепризнанна, у нас почти нет относящихся к нему систематических знаний. Чтобы уточнить, что я имею в виду под понятием «представление», приведу пример.

Есть такая игра, которую я назову «числовым скрэбблом». В нее играют двое с помощью девяти карт — скажем, начиная с туза и кончая девяткой червей. Карты в открытую выкладываются в ряд в центре стола между играющими, после чего игроки могут по очереди брать по одной карте. По правилам игры, нужно собрать на руках такие карты, чтобы число меток («сердец») на них составляло ровно пятнадцать, — прежде чем это сделает противник. Тот, кто первый соберет такие карты, выигрывает. Если же выбраны все девять карт и ни у кого из игроков нет выигрывающего набора, игра заканчивается вничью.

Какова же правильная стратегия в этой игре? Что нужно сделать, чтобы ее отыскать? Если читатель еще не придумал ответа, я покажу, как нужно играть в эту игру, пользуясь простым изменением формы представления. Приводимый ниже магический квадрат, о котором уж упоминалось во второй главе, образован следующими цифрами:

4	9	2
3	5	7
8	1	6

Сумма этих цифр вдоль любой строки, столбца и диагонали составляет 15 и каждая тройка цифр, дающая в сумме 15, образует строку, столбец или диагональ. Поэтому ясно, что набрать нужную комбинацию в числовой скрэббл равносильно тому, чтобы выиграть партию в крестики-

нолики. Как играть в крестики-нолики, большинство знает, следовательно, не составляет труда перевести известные нам выигрывающие стратегии на язык новой игры¹.

Решение задачи как изменение формы представления

Важная роль выбора способа представления известна уже давно. Все мы убеждены в том, что арифметика стала проще благодаря замене римской системы исчисления арабскими цифрами и позиционной системой записи чисел, хотя лично я не знаю ни одной теоретической работы, объясняющей, в чем тут причина².

От формы представления зависит многое, и это очевидно и по другой причине. Вся математика содержит в своих выводах только то, что в неявном виде заключалось в ее исходных положениях. Об этом мы уже говорили в предыдущей главе. Поэтому любой математический вывод можно рассматривать просто как изменение формы представления, делающее явным то, что ранее было истинным, но плохо различимым.

Такой взгляд можно распространить на всю область «решения задач».

Решить задачу — это значит найти такое ее представление, при котором ответ становится очевидным. Если бы на самом деле удалось организовать решение задач таким образом, вопрос о представлении занял бы действительно центральное место. Но если даже изложенная точка зрения слишком категорична, более глубокое понимание того, как создается определенное представление и как оно влияет на решение задач, окажется в любом случае важной составляющей будущей теории конструирования.

¹ Числовой скрэббл не единственная игра, изоморфная крестикам-ноликам. Джон Мичон описал еще одну игру, JAM, которая «дуальна» игре в крестики-нолики в смысле проективной геометрии. Другими словами, то, что в крестиках-ноликах является строкой, столбцом или диагональю, в игре JAM становится точками, а квадратики — отрезками прямых, соединяющих эти точки. Для того чтобы выиграть партию, нужно «заблокировать» (to jam — отсюда и название игры) все отрезки, проходящие через какую-либо точку. Ход состоит в блокировании или захвате одного отрезка. Известны и другие игры, изоморфные крестикам-ноликам.

² Этим вопросом занимался Аллен Ньюэлл, и мне не хотелось бы предвосхищать его выводы.

Пространственное представление

Многие виды синтеза, особенно архитектурное проектирование и техническое конструирование, связаны с пространственными объектами и их размещением в реальном евклидовом двумерном или трехмерном пространстве. Поэтому представление пространства и предметов в нем по необходимости станет одним из центральных разделов науки конструирования. Из наших предыдущих рассуждений о зрительном восприятии читатель, по-видимому, ясно понял, что «пространство» в голове конструктора или памяти машины обладает свойствами, совершенно отличными от тех, которыми оно наделяется, когда его рисуют на бумаге или представляют в трехмерном пространстве.

Такого рода проблемы представления уже привлекли внимание специалистов, занимающихся проектированием с помощью вычислительных машин, — формой кооперирования между машиной и человеком в процессе конструирования. В качестве примера сошлемся на программу SKETCHPAD Айвена Сазерленда [42], позволяющую представлять геометрические фигуры и налагаемые на них условия в виде определенных ограничений, которым они должны удовлетворять.

Геометрические соображения играют также важную роль в наших пока еще немногочисленных попытках полностью автоматизировать проектирование зданий или, скажем, синтез печатных схем. Так, например, Грейсон в системе проектирования поэтажных планов создает внутреннее представление размещения комнат. С его помощью удастся решать, можно ли реализовать на плоскости предложенную схему коммуникаций между комнатами, выбранную согласно принятым критериям планировки, и т. п.

Таксономия представлений

Для лучшего понимания любой совокупности явлений прежде всего необходимо выяснить, что же относится к этой совокупности, то есть построить таксономию соответствующего множества. По отношению к представлениям это еще не было сделано. Мы располагаем лишь отрывочными знаниями о различных способах, с помощью которых можно представлять задачи, и еще более скудными знаниями о значении этих различий.

Чисто прагматически можно сказать, что задачи прежде всего можно описывать словесно, на естественных языках. Часто их удается описать математически, используя стандартные формализмы алгебры, геометрии, теории множеств, математического анализа или топологии. Если задача касается физических объектов, она (или ее решения) может быть представлена в виде поэтажных планов, технических чертежей, макетов и трехмерных моделей. К задачам, в которых имеют дело с действиями, можно подойти с помощью графиков, сетей и программ.

Судя по всему, этот перечень придется расширить. Не исключено, что существует более глубокая и содержательная схема классификации членов данного множества. Но даже если наша классификация неполная и, быть может, в чем-то поверхностная, мы все же можем на ее основе начать построение теории свойств этих представлений. Некоторые разделы бурно развивающейся теории вычислительных машин и языков программирования в состоянии указать нам возможные направления теории представлений — по крайней мере, с ее более формальной стороны [43]. Эти разделы могут послужить для начала и исходным материалом для последней темы нашей программы курса по теории конструирования:

7. Различные представления задач конструирования.

Выводы. Содержание теории конструирования

Основная мысль, которую я старался провести в этой главе, сводится к следующему: уже сегодня существуют некоторые составляющие теории конструирования и имеется солидный запас знаний, теоретических и эмпирических, по каждому из этих разделов.

В ходе составления программы для курса конструирования, или науки об искусственном, которая призвана занять достойное место наряду с программами по естественным наукам во всех технических учебных заведениях, мы пришли к выводу, что в нее должны входить следующие разделы:

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОНСТРУИРОВАНИЯ

1. Теория оценки: теория полезности, теория статистических решений

2. Вычислительные методы:

- а) алгоритмы выбора *оптимальных* альтернатив типа алгоритмов линейного программирования, теории управления или динамического программирования;
- б) алгоритмы и эвристические процедуры выбора *удовлетворительных* альтернатив

ФОРМАЛЬНАЯ ЛОГИКА СИНТЕЗА

3. Императивная и декларативная логики

ПОИСК АЛЬТЕРНАТИВ

4. Эвристический поиск:

факторизация и анализ средств — целей

5. Распределение поисковых ресурсов

ТЕОРИЯ СТРУКТУРЫ И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНСТРУИРОВАНИЯ

6. Иерархические системы

ТЕОРИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗАДАЧ КОНСТРУИРОВАНИЯ

По некоторым небольшим разделам этой программы, например по теории оценки или формальной логике синтеза, можно уже сегодня организовать преподавание в рамках систематической формальной теории. По другим же разделам — а таких большинство — преподавание будет более прагматичным и эмпирическим. Но и в том и в другом случае недопустимо отступление, возвращение к старым методам, которые некогда дискредитировали всю область конструирования и привели к тому, что она исчезла из учебных программ. Действительно, уже сегодня известно немало примеров реальных процессов конструирования самых различных типов, которые не только определены исчерпывающим образом, но и, так сказать, «воплощены» в металл в виде работающих программ для вычислительных машин: алгоритмов оптимизации, процедур поиска, специализированных программ для конструирования электродвигателей, балансировки сборочных линий, выбора портфелей капиталовложений, размещения складских помещений, проектирования шоссежных дорог и т. п.

Так как подобные машинные программы описывают сложные процессы конструирования и проектирования в мельчайших деталях, их можно изучать и анализировать, а также испытывать на моделях. Они образуют мир эмпирических явлений, к которым может обращаться иссле-

дователь процессов конструирования и в которых он пытается разобраться. Эти программы реально существуют, поэтому уже нельзя говорить, что процессы конструирования прячутся за завесу «оценочных суждений» или «личного опыта». Какие бы личные пристрастия или личный опыт ни использовались при создании программ, они теперь воплощены в программах и, следовательно, доступны для наблюдения. Эти программы представляют собой материальное воплощение многих схем, придуманных человеком для исследования сложной внешней среды, в которой он находится, и для поиска путей, ведущих к важным для него целям.

Роль конструирования в интеллектуальной жизни

Я назвал свою тему «теорией конструирования», а учебную программу «программой курса по теории конструирования». Я указал на ее значение в качестве необходимого дополнения к программам по естественным наукам для всестороннего образования инженера или любого другого профессионала, который призван решать задачи, выбирать, конструировать или принимать решения.

Но на теорию конструирования и ее взаимосвязь с другими областями знания можно смотреть и по-другому. Вторая глава этой книги была посвящена психологии, и в частности, взаимоотношениям человека с его внутренней биологической средой. Настоящую главу также можно рассматривать как главу о психологии, об отношениях человека со сложной внешней средой, в которой он старается выжить и преуспеть.

Но значение помещенного в этих главах материала выходит за рамки профессиональной деятельности людей, которых мы называем «конструкторами». Многие из нас сожалеют о том, что в нашем обществе происходит раздвоение культуры. Полагают даже, что различных культур сегодня вовсе не две, а гораздо больше. Но если нас беспокоит такое расхождение, то следует заняться поиском чего-то общего, в равной степени доступного представителям всех культур — некоего ядра, образованного чем-то более значительным, чем погода, спорт, автомобили, забота о детях и их питании, а может быть, даже полити-

ка. Единое понимание нашей зависимости от внешней и внутренней сред, в которых мы живем и действуем, может составить часть этого исключительно важного ядра.

Сказанное может кое-кому показаться экстравагантной претензией. Позвольте мне поэтому обратиться к музыке, чтобы пояснить свою мысль. Музыка — одна из древнейших наук об искусственном, и это признавалось еще греками. Все, что я говорил об искусственном, приложимо и к музыке, к ее сочинению и той радости, которую она нам доставляет, в той же степени, в какой это справедливо для всех областей инженерного искусства, к которым я обращался в иллюстративных целях.

В музыке существует определенная формальная структура. Она имеет небольшое число (но очень важных) контактов с внутренней средой. Другими словами, она способна вызывать сильные эмоции, ее структура улавливается слушателями, а некоторые ее гармонические отношения имеют физическую и физиологическую интерпретацию (хотя эстетическое значение этих интерпретаций остается спорным). Что же касается внешней среды, то, как только мы станем рассматривать задачу музыкальной композиции как задачу конструирования, перед нами возникнут те же задачи оценки, поиска альтернатив и представлений, с которыми связаны все остальные задачи конструирования. При желании мы даже можем приложить к музыке некоторые методы автоматического проектирования на ЭВМ, которые уже используются в других областях конструирования. И хотя музыка, сочиненная вычислительными машинами, еще не достигла заметных высот эстетического совершенства, она уже привлекла к себе внимание композиторов и музыковедов¹.

Несомненно, имеется немало инженеров, лишенных музыкального слуха, равно как и композиторов, плохо знающих математику. И вряд ли удастся отыскать среди инженеров и композиторов — обладающих или не обладающих музыкальным слухом или математическими познаниями — таких, которые смогли бы вести взаимно полезную беседу о содержании своей профессиональной ра-

¹ С экспериментами, начавшимися более десятилетия назад, можно ознакомиться в работе [44]. Эта монография по-прежнему служит прекрасным введением в проблему музыкальной композиции как задачу конструирования. См. также [45].

боты. Но я утверждаю, что принципиально они *могут* вести разговор о процессах «конструирования», или «синтезирования», что пора им почувствовать связывающую их общность творческой деятельности, которой занимаются и те и другие, пора начать обмен опытом, относящимся к этим различным процессам творческого, профессионального конструирования.

Те из нас, кто вплотную соприкасался с развитием современных вычислительных машин, начиная с их зарождения, получили самую различную профессиональную подготовку, в том числе и музыкальную. И мы не могли не отметить возрастающего обмена информацией между представителями различных интеллектуальных дисциплин, так или иначе связанных с вычислительными машинами. Мы радовались этому, ибо это позволяло нам соприкоснуться с новыми мирами познания и преодолевать различия профессионального мышления.

О ломке старых междисциплинарных границ говорилось много, и при этом часто отмечалась роль вычислительных машин и теории информации. Но, конечно же, вычислительная машина — рассматриваемая как физическое устройство или пусть даже только как фрагмент программы — к этому процессу непосредственного отношения не имеет. Я лично предлагаю другое объяснение, и оно сводится к следующему. Возможность обмена информацией между различными областями — существование некоей общей территории — появляется в связи с тем, что все, кто использует вычислительные машины нетривиальным образом, делают это для «конструирования» в широком смысле или для того, чтобы принять участие в процессе конструирования. Следовательно, мы, как конструкторы или как проектировщики процесса конструирования, вынуждены были, как никогда ранее, четко выразить словами, в чем же, собственно, состоит процесс конструирования и что происходит в ходе этого процесса.

Истинным содержанием нового свободного интеллектуального обмена между различными сферами деятельности являются процессы нашего мышления, процессы наших суждений, принятия решений, выбора и созидания. Между различными интеллектуальными сферами происходит обмен идеями о том, каким образом такая система последовательной обработки информации, как человек — или вычислительная машина, или же система человек — ма-

шина с организованным взаимодействием между ними, — может решать задачи и добиваться целей в чрезвычайно сложной внешней среде.

Говорят, для того чтобы познать человечество, нужно познать человека. Но, как я старался показать, человек в том, что касается его разумного поведения, достаточно прост: многие сложности его поведения проистекают из сложности его окружения, из его поисков удачных решений — «конструкций». И если мне удалось убедить читателя в моей правоте, то нетрудно прийти к следующему выводу: в значительной степени для того, чтобы познать человечество, следует познать науку конструирования — и не только как профессиональную составляющую технического образования, но и как основную дисциплину для каждого образованного человека.

Архитектура сложности

В последние годы было выдвинуто несколько предложений о создании «общей теории систем», которая, абстрагируясь от конкретных свойств, присущих физическим, биологическим или социальным системам, оказалась бы приложимой к каждой из них¹. Однако, по мнению ряда ученых, хотя поставленная цель и весьма похвальна, вряд ли можно ожидать, чтобы системы столь различного характера обладали нетривиальными общими свойствами. Метафора и аналогия могут быть очень полезными, но могут и уводить от истины. Все зависит от того, существенно или поверхностно сходство, схваченное в метафоре.

Тем не менее попытка найти нечто общее в самых различных сложных системах не кажется нам такой уж бесперспективной. Совокупность идей, известных под названием кибернетика, образует если не теорию, то по крайней мере определенную точку зрения, доказавшую свою плодотворность в весьма широком диапазоне применений². Она помогла не только разобраться в поведении адаптивных систем, пользуясь понятиями обратной связи и гомеостаза, но и проанализировать приспособляемость с

¹ Среди сторонников общей теории систем выделяются Л. фон Берталанффи, К. Боулдинг, Р. Джерард и Дж. Миллер. Более скептической точки зрения — возможно, слишком скептической в свете настоящей работы — придерживаются Г. Саймон и А. Ньюэлл в статье: Simon H. A., Newell A., Models: the Uses and Limitations, в сб. The State of the Social Sciences, ed. by White L. D., Chicago, Univ. Chicago Press, 1956, pp. 66—83.

² Н. В и е р, Кибернетика, «Советское радио», 1958. Примером вдохновенного предвидения может служить работа Лотки (Lotka A. J., Elements of Mathematical Biology, N. Y., Dover Publ., 1951; впервые была опубликована в 1924 году под названием Elements of Physical Biology).

позиций теории селективной информации [46, 47]. Идеи обратной связи и информации образуют опорную схему для изучения самых разнообразных ситуаций и в этом отношении близки идеям эволюции, релятивизма, аксиоматического подхода и операционализма.

В этой главе мне хотелось бы рассказать о том, что мы начали узнавать о некоторых типах сложных систем встречающихся в науках о поведении. Результаты, о которых пойдет речь, были получены при изучении вполне конкретных явлений, но они могут быть сформулированы таким образом, что в них почти не останется указания на подробности устройства изучавшихся структур. Напротив, они опираются в основном на самый факт сложности рассматриваемых систем и не уточняют ее конкретного содержания. В связи с такой абстрактностью эти теории могут иметь отношение — «применение» было бы здесь слишком сильным словом. — к сложным системам других типов, которые встречаются в социальных, биологических и физических науках.

В ходе изложения я постараюсь всячески избегать технических подробностей, которые читатель при желании легко найдет в литературе. Но каждую теорию я намерен излагать в том конкретном контексте, в котором она зародилась. Я приведу несколько примеров сложных систем из области точных наук, где, как мне кажется, развиваемые теоретические соображения также вполне приложимы. Должен признаться, что мне придется упоминать об областях знаний, в которых я не являюсь специалистом, а возможно, и просто неграмотен. Но я убежден, что читатель без всякого труда отличит примеры, основанные на беспочвенной фантазии или чистом невежестве, от примеров, проливающих некоторый свет на то, каким образом сложность проявляет себя всякий раз, когда мы сталкиваемся с ней в природе.

Я не стану давать здесь формального определения понятия «сложной системы»¹. Грубо говоря, под сложной системой мы понимаем систему, состоящую из большого числа частей и взаимодействующую между собой непростым образом. В таких системах целое больше, чем сумма час-

¹ Уивер в своей работе [48] различает два типа сложности: организованную и неорганизованную. Нас в основном будет интересовать организованная сложность.

тей, не в самом глубоком философском смысле слова, а в том важном прагматическом смысле, что по заданным свойствам частей и их взаимодействиям нельзя правильным образом получить выводы о свойствах системы в целом. Встретившись со сложностями, идейный редукционист может оказаться практическим холистом¹.

Ниже будут рассмотрены четыре различных аспекта сложности. В первом разделе делаются некоторые замечания о частоте, с какой сложность принимает форму иерархии — сложной системы, образованной подсистемами, которые в свою очередь распадаются на подсистемы, и т. д. Второй раздел посвящен теоретическим рассуждениям о зависимости между структурой сложной системы и временем, требующимся на ее формирование в процессе эволюции. В частности, я попытаюсь доказать, что иерархические системы эволюционируют гораздо быстрее, чем неиерархические системы сравнимых размеров. В третьем разделе рассматриваются динамические свойства иерархически организованных систем и показывается, как следует осуществлять их декомпозицию на подсистемы, чтобы стал возможным анализ их поведения. Наконец в последнем, четвертом разделе исследуется взаимосвязь между сложными системами и методами их описания.

Итак, моя главная мысль сводится к тому, что сложность часто проявляется в форме иерархии и что все иерархические системы обладают общими свойствами, не зависящими от конкретного содержания этих систем. Я постараюсь доказать, что иерархия является одной из главных структурных схем, которыми пользуются архитекторы сложности.

Иерархические системы

Под иерархической системой, или иерархией, я понимаю систему, состоящую из взаимосвязанных подсистем,

¹ См. [49]. Так как противоборство редукционизма и холизма является основой разногласий между представителями естественных наук и гуманитариями, мы, исходя из описанного компромисса, можем, видимо, даже надеяться на известные «мирные переговоры» между «воюющими» сторонами. В дальнейшем я почти не буду касаться вопросов сложности в гуманитарных науках в сравнении со сложностью в точных науках. Хочу еще раз подчеркнуть прагматизм моего холизма и категорически отмежеваться от позиции, которую занимает У. Эльзассер [50].

каждая из которых в свою очередь является иерархической по своей структуре, и т. д. до тех пор, пока мы не доберемся до некоторого самого нижнего уровня элементарных подсистем. В большинстве систем, встречающихся в природе, ответ на вопрос о том, где прекратить дробление на части и какие подсистемы считать элементарными, достаточно произволен. Понятием «элементарные частицы» широко пользуются в физике, хотя эти частицы и обладают обескураживающим свойством не оставаться элементарными слишком продолжительное время. Всего лишь два поколения назад уже атомы казались элементарными частицами, сегодня же для физика-ядерщика это сложные системы. Для определенных целей звезды и даже галактики могут считаться элементарными подсистемами астрономии. В одних биологических исследованиях роль элементарной подсистемы будет играть клетка, в других — белковая молекула, а в третьих — аминокислотный остаток.

Одна из проблем, которую нам предстоит решить, как раз и заключается в том, чтобы выяснить: что же позволяет ученому считать элементарной подсистему, которая на самом деле невероятно сложна? Пока же просто примем на веру тот факт, что ученые пользуются этим правом сплошь и рядом, и если они делают это аккуратно и осторожно, то это не приводит к тяжким последствиям.

Этимологически слово «иерархия» имеет более ограниченный смысл, чем тот, который мы здесь в него вкладываем. Обычно этот термин применяют к сложным системам, где каждая из подсистем находится в подчинении, подвластна системе, которой она принадлежит. Точнее, в формальной иерархической организации каждая система состоит из подсистемы — «начальника» и множества подсистем — «подчиненных». Начальник каждой подсистемы в свою очередь является непосредственным подчиненным начальника более крупной системы.

Для нас интерес представляют системы, в которых взаимоотношения между подсистемами сложнее, нежели в формальной организационной иерархии, описанной выше. Нам хотелось бы включить в круг рассматриваемых и такие системы, в которых между подсистемами нет отношения подчинения. (На самом деле у людей даже формальная иерархия существует только на бумаге и между различными частями любой организации имеются связи, не сводящиеся к проявлениям власти.) За отсутствием луч-

шего термина я буду пользоваться словом «иерархия» в этом более широком смысле слова, то есть употреблять его для всех сложных систем, которые можно последовательно разбивать на подсистемы, а выражением «формальная иерархия» — когда мне понадобится воспользоваться этим понятием в его более узком значении¹.

Социальные системы

Я уже приводил пример иерархии одного типа, с которым часто сталкиваются в социальных науках: формальную организацию. Правительства, промышленные компании, учебные заведения — все они имеют ясно различимую структуру ступенчатого дробления. Но формальные организации не являются ни единственным, ни даже чаще всего встречающимся типом социальной иерархии. Почти каждое общество состоит из элементарных ячеек, называемых семьями. Из этих ячеек составляются селения и племена, а из них в свою очередь — более крупные образования и т. д. И если построить граф социального взаимодействия, показывающий, кто и с кем общается, то области взаимосвязей высокой плотности на этом графе определяют довольно строгую иерархическую систему. Групповые образования в этой структуре несложно определить операционным образом с помощью некоторой меры частоты взаимосвязей для этой социометрической матрицы.

Биологические и физические системы

Иерархическая структура биологических систем всем хорошо известна. Если за основной строительный блок взять клетку, то мы увидим, что клетки организованы в ткани, ткани в органы, а органы в системы. От клетки можно двигаться и в другом направлении. Для клеток животного мира удалось выделить ярко выраженные подсистемы: ядро, мембрану, микросомы, митохондрии и т. д.

¹ Для того, что я называю иерархией, не годится принятый в математике термин «разбиение», ибо подсистемы и последующие подмножества в каждой из них определяют разбиения независимо от какой бы то ни было системы отношений между подсистемами. Под «иерархией» я понимаю некоторое разбиение вместе с множеством отношений между полученными частями.

Столь же прозрачна иерархическая структура многих физических систем. О двух главных рядах я уже упоминал: на микроскопическом уровне это элементарные частицы, атомы, молекулы и макромолекулы, а на макроскопическом — системы спутников, планетные системы, галактики и т. д. Материя распределена в пространстве удивительно неоднородным образом. Даже самое близкое к случайному распределение материи в природе, которое удастся наблюдать на примере газов, на самом деле не есть случайное распределение элементарных частиц; это случайное распределение более сложных систем — молекул.

Если принять предложенное выше определение понятия «иерархия», то под него подпадет широкий класс структур разных типов. Согласно этому определению, алмаз устроен по иерархическому принципу, поскольку составляющая его кристаллическая структура из молекул углерода в свою очередь может быть разложена на протоны, нейтроны и электроны. Однако это очень «плоская» иерархия, в ней число подсистем первого порядка для одного кристалла может быть неограниченно велико. По аналогии плоской иерархией является и объем молекулярного газа. Но, придерживаясь обычного словоупотребления, мы стараемся применять слово «иерархия» лишь для систем, которые распадаются на небольшое или умеренно большое число подсистем, каждая из которых может подразделяться на более мелкие. Поэтому обычно мы не думаем об алмазе или газе как об иерархической системе и не используем для них этот термин. Точно так же линейный полимер представляет собой просто-напросто цепочку мономеров независимо от ее длины и на молекулярном уровне может рассматриваться как очень плоская иерархия.

В тех случаях, когда речь идет о формальных организациях, число подчиненных, непосредственно подчиняющихся одному начальнику, называют его шириной управления. По аналогии я буду говорить о широте системы, понимая под этим число подсистем, на которые она распадается. Итак, иерархическая система оказывается плоской на рассматриваемом уровне, если у этого уровня большая широта, то есть если имеется много подсистем. У алмаза большая широта на кристаллическом уровне, но это неверно для более низкого молекулярного уровня.

По большей части мы в развиваемой ниже теории будем рассматривать иерархии с умеренной широтой, но время от времени я буду указывать, в какой степени наши выводы могут (или не могут) быть распространены и на очень плоские иерархии.

Между физическими и биологическими иерархиями, с одной стороны, и социальными иерархиями — с другой, имеется очень существенная разница. Большинство физических и биологических иерархий описывается в терминах их пространственного расположения. Подсистемы клетки обнаруживаются точно так же, как обнаруживаются изюминки в кексе — они относятся к числу «зрительно» дифференцированных подструктур, пространственно локализованных в более крупной структуре. В то же время мы имеем возможность идентифицировать социальные иерархии не путем выяснения, кто с кем живет рядом, а устанавливая, кто с кем взаимодействует. Эти столь разные точки зрения можно примирить между собой, если определять иерархии в терминах интенсивности взаимодействия и заметить, что в большинстве биологических и физических систем относительная интенсивность взаимодействия предполагает и относительную пространственную близость. Одна из интересных характеристик нервных волокон и телефонных линий как раз состоит в том, что они позволяют осуществлять вполне определенные сильные взаимодействия на значительных расстояниях. Пространственная близость играет в структуре системы тем меньшую роль, чем в большей степени для внутреннего взаимодействия используются специальные каналы связи или специальные средства сообщения.

Символические системы

До сих пор я ничего не говорил о системах, принадлежащих к одному очень важному классу: системах, являющихся продуктом символической деятельности людей. Книга — это иерархия точно в том смысле, в каком я пользуюсь этим термином. Обычно она делится на главы, главы на параграфы, параграфы на предложения, которые в свою очередь делятся на главные и придаточные, последние делятся на словосочетания, которые в свою очередь разделяются на слова и т. д. В качестве элементарных единиц можно взять слова, но и слово можно дробить на

меньшие единицы (чем часто занимаются лингвисты). Если книга описательного характера, вместо глав или разделов ее можно разбить на «эпизоды», но так или иначе какое-то деление всегда будет иметь место.

Хорошо известна также иерархическая структура музыкальных произведений с их частями, темами и музыкальными фразами. Труднее описать иерархическую структуру произведений изобразительного искусства, но к этому вопросу я еще вернусь.

Эволюция сложных систем

Позвольте мне вместо введения в предмет эволюции рассказать одну притчу. В давние времена жили два часовых дел мастера, Хора и Темпус, мастерившие прекрасные часы. Репутация каждого из них была выше всяких похвал, и колокольчики на дверях их мастерских звонили не переставая — все новые и новые клиенты добивались их внимания. Но в то время как Хора богател, Темпус становился все беднее, пока вообще не остался без мастерской. В чем же было дело?

Часы, которые выпускали эти мастера, состояли из тысячи деталей каждые. Но Темпус собирал свои часы так, что если ему приходилось оставить их на время незаконченными — чтобы открыть дверь, например, — то часы немедленно разваливались, и их приходилось заново собирать с самого начала. Чем большей популярностью пользовались его изделия, тем чаще звонил колокольчик, и тем труднее становилось мастеру выкроить время для того, чтобы закончить хотя бы одни часы.

Часы, которые мастерил Хора, были ничуть не проще, чем у Темпуса. Но Хора собирал их из блоков. В каждом блоке содержалось около десяти деталей. Десяток таких блоков составлял более крупную подсистему, а из десяти подсистем получались часы. Поэтому, когда Хора вынужден бывал прервать сборку часов, чтобы принять заказ, только очень малую часть работы приходилось начинать сызнова, и он собирал свои часы во много раз быстрее, чем Темпус.

Провести количественный анализ относительной трудности задач Темпуса и Хоры достаточно просто. Предположим, что вероятность вынужденного перерыва в момент,

когда одна деталь как раз добавляется к сборке остальных, равна p . Тогда вероятность того, что Темпус завершит сборку часов, не прерываясь, составляет $(1 - p)^{1000}$, а это очень небольшое число, если только p не меньше 0,001. Каждый перерыв будет равен в среднем потере времени на сборку $1/p$ всех деталей (математическое ожидание числа деталей, собранных до перерыва). Хоре нужно собрать 111 подсистем из десяти деталей каждая. Вероятность того, что его не прервут во время сборки любой из них, равна $(1 - p)^{10}$, а каждый перерыв будет стоить ему всего лишь потери времени на сборку около пяти деталей¹.

Однако если теперь p порядка 0,01, то есть если в одном случае из ста часовщику помешают как раз в тот момент, когда он будет добавлять еще одну деталь к сборке, то, согласно расчету, Темпусу на сборку одного часового механизма потребуется в среднем в четыре тысячи раз больше времени, чем Хоре.

К этой оценке можно прийти следующим образом:

1) на каждые часы Хоре нужно завершить в 111 раз больше сборок, чем Темпусу. Но:

2) при прерывании каждой сборки Темпус теряет в среднем в 20 раз больше времени, чем Хора (время, уходящее в среднем на сборку 100 деталей против 5 у Хоры). Кроме того,

3) из миллиона попыток Темпус закончит сборку только 44 раза ($0,99^{1000} = 44 \cdot 10^{-6}$), в то время как Хоре будут

¹ Джейкобсон [51] впервые попытался применить теорию информации к оценке времени, требующегося на биологическую эволюцию. Термодинамические соображения позволяют оценить величину роста энтропии, сопровождающего декомпозицию сложной системы на ее элементы [52]. Но энтропия есть логарифм вероятности. Следовательно, количество информации (отрицательную энтропию) можно рассматривать как логарифм величины обратной вероятности, так сказать, «невероятности».

Основная идея модели Джейкобсона состояла в том, что математическое ожидание времени, необходимого системе на то, чтобы перейти в определенное состояние, должно быть обратно пропорционально вероятности этого состояния; следовательно, оно экспоненциально возрастает с увеличением информации (негэнтропии) этого состояния.

Двигаясь в этом направлении, но не вводя понятия уровней и подсистем, Джейкобсон пришел к столь большим оценкам времени, требующегося на эволюцию, что подобная эволюция стала казаться весьма маловероятной. Мы в своем анализе идем тем же путем, но особое внимание уделяем устойчивым промежуточным формам, и это приводит к существенно меньшим оценкам.

удаваться девять из каждых десяти ($0,99^{10} = 9 \cdot 10^{-1}$). Поэтому Темпусу придется делать в 20 000 раз больше попыток на одну завершённую сборку, чем Хоре ($9 \cdot 10^{-1} / (44 \cdot 10^{-6}) = 2 \cdot 10^4$). Перемножая все эти дроби, получим окончательно

$$1/111 \times 100/5 \times 0,99^{10} / 0,99^{1000} = 1/111 \times 20 \times 20\,000 \approx 4000.$$

Биологическая эволюция

Какую мораль можно извлечь из этой притчи для случая биологической эволюции? Рассмотрим частично завершённую сборку подсистемы из k элементарных частей как сосуществование k частей в малом объеме (отвлекаясь от их относительной ориентации). Согласно нашей модели, эти части попадают в объем с постоянной скоростью. Но имеется постоянная вероятность p , что все части рассеются прежде, чем добавится еще одна, если только их совокупность не достигла устойчивого состояния. Такого рода предположения не слишком реалистичны. В них, безусловно, не учитывается уменьшение вероятности закончить сборку с увеличением числа ее частей. Поэтому они недооценивают, и, возможно, во много раз, относительные преимущества иерархической структуры.

И хотя в итоге мы не можем всерьез принять полученные численные оценки, мораль, вытекающая отсюда для биологической эволюции, совершенно ясна и однозначна: время, необходимое для того, чтобы в результате эволюции из простых элементов возникли сложные формы, критическим образом зависит от числа и распределения потенциальных промежуточных устойчивых форм. В частности, если существует иерархия потенциально устойчивых «подсистем» с приблизительно одинаковой шириной на каждом уровне, скажем s , то можно ожидать, что время, требуемое на образование каждой подсистемы, будет приблизительно одинаковым на каждом уровне, то есть пропорционально величине $1/(1 - p)^s$. Время же, нужное для сборки системы из n элементов, окажется пропорционально $\log_s n$, то есть числу уровней системы. Можно сказать (скорее в иллюстративных целях, чем в качестве реальной оценки), что время, требуемое на эволюцию многоклеточного организма из одноклеточного, должно быть приблизительно того же порядка, что и время, необходимое для

того, чтобы в результате эволюции из макромолекул получились одноклеточные организмы. Аналогичные соображения справедливы и в отношении эволюции аминокислот в белки, атомов в молекулы и элементарных частиц в атом.

Бесспорно, у каждого профессионального биолога, химика или физика сразу возникнут тысячи возражений против столь упрощенной схемы. Но прежде чем обратиться к предметам, в которых я разбираюсь лучше, мне хотелось бы самому предвосхитить три вопроса, предоставив остальные заботам специалистов.

Во-первых, теория не предполагает никакой целенаправленности, хотя в нашей притче о часовщиках она явно присутствовала. Сложные формы могут возникать из простых и в результате чисто случайного процесса. (Несколько ниже я предложу другую модель, из которой это станет еще яснее.) Направленность же развития возникает из-за того, что время от времени некоторые из зародившихся сложных форм оказываются устойчивыми. Но ведь это не более как принцип выживания наиболее приспособленного или устойчивого, на нашем языке.

Во-вторых, не все большие системы организованы иерархическим образом. Например, большинство полимеров, таких, как нейлон, представляют собой простые линейные цепочки из одинаковых звеньев, мономеров. Однако для наших целей такие структуры позволительно рассматривать как иерархии единичной широты, как предельный случай, ибо цепочка любой длины соответствует состоянию относительной устойчивости¹.

В-третьих, эволюция от простого к сложному не дает никаких указаний относительно направления и величины изменения энтропии системы в целом. Если в ходе этого процесса происходит поглощение свободной энергии, то сложная система будет иметь меньшую энтропию, чем сумма ее элементов. Если же происходит выделение свободной энергии, справедливо обратное. В большинстве биологических систем реализуется именно первая альтернатива и, чтобы не произошло нарушения второго за-

¹ Имеется хорошо развитая теория размеров полимеров, основанная на моделях случайного сцепления [53]. Поскольку все подобразования в теории полимеризации являются устойчивыми, ограничения роста молекул наступают из-за «отравления» оконечных групп посторонними загрязнениями или в результате образования циклов, а не из-за разрыва частично сформированных цепочек.

кона термодинамики, необходим приток свободной энергии, покрываемый солнечным освещением или другим источником энергии. Для эволюционных процессов, о которых мы говорим, состояния равновесия должны быть лишь локально, а не глобально устойчивыми. Они могут быть устойчивыми лишь в установившемся состоянии, то есть только тогда, когда имеется внешний источник свободной энергии¹.

Но так как организм не является энергетически замкнутой системой, невозможно установить направление эволюции, не говоря уже о ее скорости, основываясь лишь на соображениях классической термодинамики.

Все оценки указывают на то, что измеренное в физических единицах количество энтропии, связанное с формированием одноклеточного биологического организма, пренебрежимо мало — порядка 10^{-11} кал/град². «Невероятность» эволюции не имеет никакого отношения к величине энтропии, генерируемой каждой клеточной бактерией в каждом поколении. И то, что в этом смысле количество информации никак не влияет на скорость эволюции, доказывается хотя бы тем, что и для «копирования» одной клетки в репродукционном процессе и для формирования первой клетки в процессе эволюции требуется совершенно одинаковое количество информации.

Существование устойчивых промежуточных форм оказывает на процессы эволюции сложных форм столь же мощное влияние, как и эффект катализаторов на скорости реакций и на стационарное распределение продуктов реакции в открытых системах [55]. Ни в том, ни в другом случае изменение энтропии не дает ключа к разгадке поведения систем.

Решение задач как естественный отбор

Перейдем теперь к некоторым явлениям, не имеющим очевидных связей с биологической эволюцией, — к процессам решения задач человеком. Рассмотрим, например,

¹ Это утверждение неоднократно делалось и раньше, но его следовало бы повторять снова и снова. Подробности можно найти в книге Сетлоу и Полларда [52], в книге Шредингера «Что такое жизнь с точки зрения физики» (М., ИЛ, 1947) и в работе Линшитца [54].

² См. цитированную работу Линшитца [54]. Величина 10^{-11} кал/град соответствует примерно 10^{13} бит информации.

задачу доказательства какой-то сложной теоремы. Этот процесс можно (что часто и делается) описать как поиск в лабиринте. Опираясь на аксиомы и теоремы, доказанные ранее, используют различные преобразования, допускаемые условиями задачи и правилами математики, и получают новые утверждения. Эти последние в свою очередь подвергаются преобразованиям, и так до тех пор, пока благодаря настойчивости и удаче не обнаружат последовательности преобразований, приводящей к цели.

Обычно такой процесс предполагает большое число проб и ошибок. Испытываются различные пути. Некоторые из них отбрасываются, по другим же стараются продвинуться как можно дальше. Но прежде чем решение будет найдено, приходится обследовать многие тупики лабиринта. И чем труднее и оригинальнее задача, тем больше вероятность того, что для ее решения потребуется большое число проб и ошибок. В то же время эти пробы и ошибки не вполне случайны, они выбираются не вслепую. На самом деле здесь происходит строжайший отбор. Внимательно рассматривая все новые утверждения, полученные в результате одноразовых преобразований, пытаются выяснить, приближают ли они нас к достижению поставленной цели. И если кажется, что мы на верном пути, то это подхлестывает поиск в выбранном направлении. Напротив, отсутствие прогресса побуждает отказаться от выбранного пути поиска. Решение задач требует именно селективных проб и ошибок¹.

Процесс распознавания и закрепления ключевых промежуточных результатов играет в решении задач такую же роль, какую устойчивые промежуточные формы играют в процессах биологической эволюции. В самом деле, ничто не мешает нам вернуться к притче о часовщиках и перенести ее идеи на случай решения задач. В решении задач частичные результаты, ясно свидетельствующие об определенном прогрессе в направлении поставленной цели, будут выполнять функцию устойчивых подсистем.

Представим себе, что надо открыть сейф с цифровым замком, имеющим десять наборных дисков на сто различ-

¹ Подробнее см. [56]. Аналогичный взгляд на проблему решения задач содержится в работе Эшби и Ч. Р., Конструкция усилителя мышления, сб. «Автоматы» под ред. К. Шеннона и Дж. МакКарти, М. ИЛ 1958, стр. 215—233.

ных позиций каждый. Сколько времени потребуется на то, чтобы открыть сейф, отыскивая подходящую комбинацию по методу проб и ошибок? Поскольку общее число различных комбинаций равно 100^{10} , разумно предположить, что это произойдет в среднем за время, которое требуется на опробование приблизительно половины этого числа, то есть 50 миллиардов миллиардов комбинаций. Предположим, однако, что наш сейф с дефектом — всякий раз, когда любой из наборных дисков устанавливается в нужное положение, слышен щелчок. Теперь каждый наборный диск можно устанавливать независимо, и после того, как найдено его правильное положение, его не нужно больше трогать, пока идет поиск правильных положений остальных дисков. В этом случае суммарное число комбинаций, которые необходимо попробовать, прежде чем будет найдена нужная, составляет в среднем лишь $10 \times 50 = 500$ комбинаций. Благодаря «подсказкам» (щелчкам) задача открыть сейф из практически невыполнимой превратилась в тривиальную¹.

За последние пять лет мы немало узнали о характере лабиринта, описывающего обычные задания на решение задач — на доказательство теорем, разгадки кроссвордов, игру в шахматы, распределение капиталовложений, балансирование поточных линий и т. д. Накопленные знания подводят нас к следующему выводу: решения человеком задач, от самых примитивных до самых глубокомысленных и изящных, представляют собой не более чем различные комбинации поиска методом проб и ошибок, с одной стороны, и отбора удачных вариантов — с другой. Отбор достигается путем использования различных эмпирических правил, указывающих на то, какой путь нужно опробовать.

¹ Пример с щелкающим сейфом принадлежит Д. П. Саймону. Эшби в своей книге назвал подобную селективность «поэлементным отбором». Существенная экономия времени благодаря иерархизации поиска в примере с щелкающим сейфом по сравнению с притчей о Темпусе и Хоре объясняется следующими причинами: в первом мы имеем дело со случайным поиском правильной комбинации, а во втором детали должны собираться в определенном порядке. Не ясно, какой из двух примеров дает лучшую модель биологической эволюции, но бесспорно, что пример с часовщиками дает чрезвычайно заниженную оценку экономии, достигаемой благодаря иерархизации. С другой стороны, пример с сейфом дает чрезвычайно завышенную оценку, ибо считается, что все возможные сочетания исходных элементов равновероятны.

вать в первую очередь и какие пути кажутся наиболее обещающими. Едва ли нужно придумывать процессы, более сложные, чем те, что встречаются в эволюции органической материи, чтобы объяснить, каким образом происходит сведение грандиозных лабиринтов поиска решения задач к лабиринтам вполне доступных размеров [57].

Источники селективности

Исследуя источники, из которых системы решения задач или эволюционирующие системы черпают свою селективность, то есть способность к отбору, мы обнаруживаем, что во всех случаях селективность удается приравнять к некоторой обратной связи, приносящей информацию о внешней среде.

Рассмотрим сначала случай решения задач. Здесь встречаются два основных типа селективности. Об одном из них мы уже упоминали: исследуются различные пути, отмечаются последствия использования каждого из них, и полученная в результате информация позволяет направлять дальнейший поиск. Аналогично обстоит дело и в органической эволюции. Здесь появляются, хотя бы на очень короткие промежутки времени, различные сочетания. Те из них, которые оказались устойчивыми, служат новым материалом для дальнейшего строительства. Именно информация об устойчивости тех или иных конфигураций, а не о свободной энергии или негэнтропии, получаемых от солнца, направляет процесс эволюции и делает возможным отбор, которым и объясняется скорость эволюции.

Вторым источником селективности в решении задач служит накопленный опыт. Это особенно заметно в тех случаях, когда предстоит решить задачу, аналогичную решавшейся ранее. Уже простые попытки пойти по тому же пути, который ранее привел к успеху, или по сходным путям резко сокращают, а подчас и полностью устраняют необходимость в поиске методом проб и ошибок.

Что же соответствует информации такого рода в случае органической эволюции? Наиболее тесную аналогию с ней представляют процессы воспроизведения. Стоит нам достичь уровня самовоспроизводящихся систем, как открывается возможность копировать любую полученную однажды сложную систему неограниченное число раз. В самом деле, воспроизведение позволяет наследовать

достигнутые характеристики, но только на генетическом уровне. Другими словами, наследовать можно лишь характеристики, приобретенные генами. К проблеме воспроизведения мы еще вернемся.

Выводы. Эволюционное объяснение существования иерархий

Пока нам удалось лишь показать, что в процессе эволюции сложные системы образуются из простейших систем гораздо быстрее в том случае, когда существуют какие-то устойчивые промежуточные формы. Получающиеся в первом случае сложные формы должны быть иерархическими. Теперь нам остается лишь обратить аргументацию, чтобы объяснить, почему в природе среди сложных систем иерархические системы заняли столь доминирующее положение. Причина проста: среди всех сложных систем только иерархии располагают достаточным временем на развитие. Гипотеза, согласно которой любая сложность приобретает иерархическую структуру, не делает какого-либо различия для очень плоских иерархий типа кристаллов, тканей или полимеров и их промежуточных форм. И действительно, среди сложных систем, встречающихся в природе, примеры первого типа можно найти столь же часто, как и примеры второго типа. Более полная теория, чем развиваемая здесь, должна, по-видимому, как-то объяснить причины, определяющие широту этих систем.

Квазиразложимые системы

В иерархических системах следует различать взаимодействия между подсистемами и взаимодействия внутри подсистем, то есть между частями этих подсистем. При этом интенсивность взаимодействия на различных уровнях может быть разных порядков, что часто и наблюдается в действительности. В формальной организации, как правило, большее взаимодействие наблюдается между двумя служащими, работающими в одном отделе, чем между двумя служащими из разных отделов. В органической материи межмолекулярные взаимодействия обычно слабее молекулярных, а молекулярные силы слабее ядерных.

В сильно разреженном газе межмолекулярные силы пренебрежимо малы по сравнению с теми, что связывают

молекулу воедино, так что отдельные частицы можно часто считать независимыми друг от друга. В таких случаях говорят, что системы *разложимы* на подсистемы, образованные отдельными частицами. По мере увеличения плотности газа молекулярные взаимодействия начинают играть все большую роль. Тем не менее в определенном диапазоне плотностей мы можем рассматривать случай разложимости как предельный, как первое приближение. Например, для того чтобы приближенно описывать поведение реальных газов при условии, что они не слишком плотные, можно пользоваться теорией идеального газа. В качестве второго приближения мы переходим к теории *квазиразложимых* систем, в которой взаимодействия между подсистемами считаются слабыми, но не настолько, чтобы ими можно было полностью пренебречь.

Некоторые виды иерархических систем могут приближенно считаться квазиразложимыми. Основные теоретические результаты такого подхода сводятся к следующим двум утверждениям. Во-первых, у квазиразложимых систем кратковременные характеристики поведения каждой составляющей подсистемы приближенно не зависят от кратковременных характеристик поведения остальных составляющих. Во-вторых, долговременные характеристики поведения любой составляющей зависят от поведения остальных частей, но эта зависимость имеет агрегированный характер.

Приведу простейший пример квазиразложимой системы¹. Рассмотрим здание, наружные стены которого обеспечивают идеальную теплоизоляцию от внешней среды. Будем считать эти стены границами нашей системы. Здание разделено на большое число комнат; стены между ними обеспечивают хорошую, но не идеальную теплоизоляцию. Стены комнат являются границами основных подсистем системы. Каждая комната в свою очередь разделена перегородками на кабинеты, но теплоизоляционные свойства перегородок чрезвычайно низкие. В каждом кабинете имеется термометр. Предположим, что в тот момент, когда мы впервые начали наблюдать за нашей

¹ Рассуждения о квазиразложимых системах основаны на работе Г. Саймона и А. Эндо [58]. Рассматриваемый пример заимствован из того же источника. Теория была развита и применена к различным экономическим и политическим явлениям Эндо и Фишером [59] и [60].

системой, температура в различных кабинетах резко отличалась от кабинета к кабинету и от комнаты к комнате, то есть кабинеты в здании находились в состоянии теплового неравновесия. Что мы увидим, когда измерим температуру через несколько часов? Температура кабинетов одной и той же комнаты будет практически одинаковой, чего нельзя сказать о разных комнатах. По прошествии же нескольких дней температура окажется одинаковой почти во всем здании и разность температур между комнатами практически выравнивается.

Процесс установления равновесия можно формализовать, воспользовавшись уравнениями тепловых потоков. Полученные уравнения можно представить матрицей их коэффициентов r_{ij} (r_{ij} — скорость теплового потока из i -го объема в j -й на один градус разности температур этих объемов). Если у i -го и j -го объемов нет общих стен, то соответствующее r_{ij} нужно положить равным нулю. Если же у i -го и j -го объемов имеется общая стена и она к тому же принадлежит одной и той же комнате, то r_{ij} должно быть большим. Наконец, если эти объемы разделены стеной комнаты, то r_{ij} будет отлично от нуля, но невелико. Поэтому, группируя объемы, принадлежащие одной и той же комнате, мы можем организовать матрицу коэффициентов таким образом, что все ее большие элементы будут входить в одну из квадратных подматриц, лежащих на главной диагонали основной матрицы. Все остальные элементы матрицы будут либо нулями, либо малыми (рис. 6). В качестве верхней грани таких не попадающих в диагональные подматрицы элементов можно взять некоторое малое число ϵ . Обладающую этими свойствами матрицу условимся называть *квазиразложимой*.

Доказано, что динамические системы, описываемые квазиразложимыми матрицами, обладают сформулированными выше свойствами квазиразложимых систем. В нашем простейшем примере с теплообменом это значит, что в течение коротких промежутков времени в каждой комнате будет устанавливаться равновесная температура (равная средней начальной температуре всех ее кабинетов). Это будет происходить практически независимо от того, что делается в остальных комнатах. В каждой комнате состояние равновесия приблизительно сохранится и на более длительных отрезках времени, в течение которых будет постепенно устанавливаться тепловое равновесие во всем

	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2	C3
A1	—	100	—	2	—	—	—	—
A2	100	—	100	1	1	—	—	—
A3	—	100	—	—	2	—	—	—
B1	2	1	—	—	100	2	1	—
B2	—	1	2	100	—	—	1	2
C1	—	—	—	2	—	—	100	—
C2	—	—	—	1	1	100	—	100
C3	—	—	—	—	2	—	100	—

A1	B1	C1
A2		C2
A3	B2	C3

Р и с . 6. Гипотетическая квазиразложимая система. *A1*, *A2* и *A3* — кабинеты первой комнаты, *B1* и *B2* — второй, а *C1*, *C2* и *C3* — третьей. Элементами матрицы служат коэффициенты теплопроводности между соответствующими помещениями.

здании. После того как некоторое время спустя будет достигнуто тепловое равновесие внутри комнат, для адекватного описания динамики поведения всей системы в целом достаточно будет иметь по одному градуснику на комнату, а надобность в индивидуальных градусниках в каждом кабинете отпадет.

Квазиразложимость социальных систем

С первого взгляда на рис. 6 становится ясным, что квазиразложимость весьма сильно ограничивает вид матрицы. Матрицы, обладающие такими свойствами, будут описывать весьма специфические динамические системы — лишь исчезающе малую часть всех мыслимых динамических систем. Насколько мала эта часть, зависит, конечно, от качества приближения, на котором мы будем настаивать. Если мы потребуем, чтобы ϵ было крайне мало, очень немного динамических систем подпадет под это определение. Но, как мы уже имели возможность убедиться, в природе квазиразложимые системы встречаются достаточно часто. Напротив, гораздо реже можно найти системы, в которых

каждая переменная связана почти со всеми другими частями и все эти взаимодействия практически одинаковой силы.

В моделях экономической динамики к основным переменным относятся цены и количества продуктов. Можно считать эмпирически установленным, что цены на любой наперед заданный продукт и скорость его обмена существенно зависят лишь от цен на несколько других продуктов и их количеств, а также от нескольких агрегированных величин (среднего уровня цен или некоторой глобальной меры экономической активности). В общем случае большие коэффициенты связи наблюдаются для основных потоков сырья и полуфабрикатов как внутри данной отрасли, так и между различными отраслями. Матрица затраты — выпуск для данной экономики, определяющая интенсивности этих потоков, обнаруживает квазиразложимость системы с одной, впрочем, оговоркой. У экономики имеется одна подсистема — подсистема потребления, которая в сильной степени связана с переменными почти всех остальных систем. Поэтому, для того чтобы иметь возможность учитывать особую роль подсистемы потребления в анализе динамического поведения экономики, наше определение квазиразложимости нужно несколько видоизменить.

Весьма наглядно просматривается квазиразложимость и в динамике социальных систем, члены которых постоянно взаимодействуют друг с другом. Заметнее всего это проявляется в формальных организациях, где отношения формального подчинения определяют для каждого члена организации одного начальника и небольшое число непосредственных подчиненных. Разумеется, многие связи в организациях устанавливаются по каналам, отличным от линий непосредственного подчинения. Но по большей части эти каналы ведут от определенного индивидуума к весьма ограниченному кругу начальников, подчиненных и людей одинакового положения. Поэтому границы отдела можно уподобить стенам в нашем примере с теплопроводностью.

Физико-химические системы

Квазиразложимые структуры отчетливо прослеживаются и во многих сложных биохимических системах. Примем за элементы системы ядра атомов и построим матрицу сил

связи между элементами. Элементы матрицы могут быть величинами совершенно различного порядка. Самые большие обычно соответствуют валентным связям, затем идут ионные связи, за ними следует группа водородных связей и, наконец, еще более слабые силы Ван дер Ваальса¹. Если выбрать значение ϵ немного меньше величины, соответствующей валентной связи, система распадется на подсистемы — составляющие ее молекулы. При этом менее интенсивные связи будут соответствовать межмолекулярным взаимодействиям.

Хорошо известно, что высокочастотные колебания большой мощности наблюдаются в физических подсистемах меньших размеров, а низкочастотные колебания — в больших системах, собранных из этих подсистем. Например, частоты излучения, вызванного колебанием молекул, гораздо ниже частот, вызванных колебанием орбитальных электронов атома. Последние же в свою очередь ниже частот излучения ядерных процессов².

Допустимость целого ряда важных приближений, используемых в физике, зависит от квазиразложимости изучаемых систем. Например, термодинамика необратимых процессов требует предположения о существовании макроскопического неравновесия наряду с микроскопическим равновесием [61] в точном соответствии с ситуацией, описанной в нашем примере с теплопроводностью. В квантовой механике многие расчеты основаны на допущении, что слабые взаимодействия можно рассматривать как возмущения систем с сильными взаимодействиями.

¹ Обзор различных классов молекулярных и межмолекулярных сил и соответствующих энергий диссоциации можно найти в цитированной работе Сетлоу и Полларда [52]. Энергии типичной валентной связи имеют порядок 80—100 ккал/моль, водородной связи — 10 ккал/моль. Для ионных связей соответствующая величина лежит где-то посредине, а энергии, связанные с силами Ван дер Ваальса, существенно ниже.

² Типичные волновые числа для собственных колебаний разных систем (волновое число — величина, обратная длине волны и, следовательно, пропорциональная частоте колебаний) выглядят следующим образом (см¹):

натянутая стальная проволока	$10^{-10} - 10^{-9}$
молекулярный спин	$10^0 - 10^2$
молекулярные колебания	$10^2 - 10^3$
орбитальные электроны	$10^4 - 10^5$
ядерный спин	$10^8 - 10^{10}$
поверхностные колебания ядра	$10^{11} - 10^{12}$

Некоторые замечания о широте иерархий

Для того чтобы понять, почему у одних иерархий очень большая широта (например, у кристаллов), а у других маленькая, необходимо подробнее исследовать имеющиеся взаимодействия. В общем случае критическим оказывается вопрос: в какой степени взаимодействие между двумя (или несколькими) подсистемами исключает взаимодействие этих подсистем с другими подсистемами? Обратимся к нескольким примерам из физики.

Рассмотрим газ, состоящий из одинаковых молекул: каждая из них может установить с другой некоторую валентную связь. Предположим, что каждому атому мы можем поставить в соответствие определенное число, указывающее на количество связей, которое он в состоянии одновременно устанавливать. (Это число, очевидно, связано с другим числом, обычно называемым валентностью.) Допустим, что соединились два атома и что полученной паре также можно приписать определенное число внешних связей. Если это число совпадает с числом для отдельных атомов, то процесс установления связей может продолжаться до бесконечности: из атомов будут образовываться кристаллы или полимеры произвольно больших размеров. Если же число связей, на которое способна комбинация, меньше, чем для каждой из составляющих ее частей, то рано или поздно процесс агломерации застынет.

Нам остается лишь привести несколько элементарных примеров. В обычных газах нет тенденции к агломерации, поскольку на многократную связь между атомами «расходуется» вся их способность к взаимодействию. Ведь если атом кислорода имеет валентность 2, то валентность молекул O_2 равна нулю. Напротив, возникновение сколь угодно длинных цепочек односвязных атомов углерода возможно, ибо валентность цепочки из любого числа таких атомов с двумя краевыми группами в точности равна 2.

А что происходит с системой, между элементами которой существуют как сильные, так и слабые взаимодействия и сильные связи исчерпываются в процессе образования комбинаций? В подобных системах процесс образования подсистем будет происходить до тех пор, пока на их создание не будет израсходована вся способность к сильным взаимодействиям. После этого подсистемы начнут сцепляться друг с другом за счет более слабых связей второго

порядка, образуя более крупные системы. Например, в принципе валентность молекулы воды равна нулю, то есть все ее потенциальные валентные связи полностью исчерпаны на взаимодействия атомов водорода и кислорода. Но благодаря своей геометрии молекула становится электрическим диполем. Этим объясняется возникновение слабого взаимодействия между водой и растворенными в ней солями и, как следствие, электролитическая проводимость [62].

Замечено также, что, хотя электрические взаимодействия намного сильнее гравитационных, для систем астрономических масштабов последние гораздо важнее. Это объясняется тем, что электрические силы, биполярные по своей природе, полностью «исчерпываются» на создании меньших подсистем, а в макроскопических областях не обнаруживается значительных расхождений между суммарными положительным и отрицательным зарядами.

В социальных системах, так же как в физических, обычно имеются пределы возможностей одновременного взаимодействия между большим числом подсистем. Эти пределы могут объясняться тем, что человек по своей природе ближе к последовательной системе обработки информации, чем к параллельной. Он в состоянии одновременно вести только один разговор, и, хотя это не ограничивает размера аудитории, на которую рассчитаны средства массовой коммуникации, круг людей, которых можно одновременно вовлечь в большинство других форм социального взаимодействия, решительно сужается. К тому же, помимо требований непосредственного контакта, большинство видов социального взаимодействия предполагает решение задач и налагает обязанности, требующие времени. Например, один человек не может выполнять роль «друга» для слишком большого числа людей.

Вероятно, справедливо, что в социальных системах, как и в физике, высокочастотная динамика присуща подсистемам, а низкочастотная — более крупным системам. Например, принято считать, что горизонт планирования работы руководителя тем больше, чем выше его положение в организационной иерархии.

Вероятно также, что средняя продолжительность взаимодействия между руководителями и средний интервал между такого рода взаимодействиями на верхних уровнях больше, чем на нижних.

Выводы. Квазиразложимость

Итак, мы выяснили, что иерархические системы обладают свойством квазиразложимости. При этом внутрикомпонентные связи оказываются сильнее межкомпонентных. Одним из следствий этого является отделение высокочастотной динамики иерархии (связанной с внутренней структурой составляющих) от низкочастотной динамики (отражающей взаимодействия компонент). Обратимся теперь к некоторым важным следствиям, которые имеет это разделение для описания и понимания поведения сложных систем.

Описание сложности

Если вы попросите кого-либо нарисовать сложный объект, например лицо человека, тот, к кому вы обратились, почти наверняка начнет действовать иерархическим образом¹. Сначала он нарисует контур лица, затем добавит наиболее крупные признаки: глаза, нос, рот, уши и волосы. Если от него потребуют больших подробностей, он начнет прорабатывать детали каждого признака (так, появятся, например, зрачки, веки и ресницы у глаз) до тех пор, пока не исчерпает своих анатомических познаний. Информация об этом объекте хранится в его памяти в иерархически организованном виде по типу общей информации о каком-нибудь предмете.

В том случае, когда информация такого контурного типа, ее несложно пополнять и уточнять, добавляя сведения об отношениях между основными частями или о детализовке каждой из частей в отдельности. Но при такой организации информации нет места для данных об отношениях между деталями разных частей, и они, вероятнее всего, будут потеряны. Отсутствием этих отношений при сохранении главных черт иерархического устройства лица и объясняется одно из самых разительных отличий рисунков ребенка (или человека, не умеющего рисовать) от работ профессионального художника (если речь идет о художнике, который стремится к передаче внешнего сходства).

¹ Дж. Миллер собрал протоколы поведения испытуемых, которым предлагалось нарисовать лицо, и выяснил, что их поведение соответствует описываемому здесь (частное сообщение). См. также [63].

В процессе изучения динамических свойств квазиразложимых систем нам удалось установить, что, представляя эти системы в виде иерархий, мы теряем относительно мало информации. Более мелкие подсистемы, принадлежащие различным частям системы, взаимодействуют лишь через агрегированные характеристики; детальным характером их взаимосвязей можно пренебречь. Изучение взаимодействия двух больших молекул, как правило, не требует подробного исследования сил, возникающих между ядрами атомов, входящих в состав молекул. С аналогичной картиной мы сталкиваемся и при выяснении взаимодействия двух государств: нет необходимости подробно изучать взаимоотношения каждого гражданина одного государства с каждым гражданином другого.

Поэтому тот факт, что многие сложные системы имеют квазиразложимый иерархический характер, значительно облегчает нам понимание таких систем и их составляющих и помогает не только описывать, но и «видеть» эти системы. Впрочем, эту аргументацию можно и обратить: если в мире имеются важные сложные системы неиерархического характера, они, возможно, в значительной степени ускользают от нашего внимания и недоступны нашему пониманию. Исследование их поведения потребовало бы от нас столь детальных знаний и вычисления такого числа взаимодействий их элементарных частей, что это было бы нам попросту не под силу¹.

¹ По-видимому, ошибочность основной посылки Эльзассера [50] состоит именно в том, что в ней полностью игнорируется роль упрощений при описании сложных систем, связанных с иерархической структурой. Так, в своей монографии он пишет:

«Если теперь провести аналогичные рассуждения в отношении реакций ферментов с субстратом белковых молекул, перед нами всплывет следующая картина. На длительных отрезках времени структуры белковых молекул могут оказывать влияние на динамику клетки, то есть на более высокий уровень организации. И хотя это лишь качественные рассуждения, они свидетельствуют о правдоподобности гипотезы, согласно которой в живых организмах (в противовес неорганическим кристаллам) эффекты микроскопических структур нельзя просто усреднять. С течением времени они скажутся на поведении клетки «на любом уровне».

Но, как следует из наших аргументов о квазиразложимости, те аспекты микроструктур, которые влияют на медленные процессы развития органической системы, могут быть отделены от аспек-

Я не стану на страницах этой книги пытаться внести ясность в вопрос, что было раньше — яйцо или курица, другими словами, способны ли мы понимать мир в силу того, что он устроен по иерархическому принципу, или же он кажется нам таковым, так как все, что не имеет иерархического характера, ускользает от нашего понимания. Как я старался выше доказать, первое утверждение хотя бы наполовину соответствует истине (я имею в виду утверждение о том, что эволюционирующая сложность склонна к иерархичности), но, может быть, дело не только в этом.

Простое описание сложных систем

На основании всего сказанного можно было бы полагать, что описание сложной системы само по себе окажется сложной структурой символов. И на деле так вполне может быть. Однако закона сохранения, требующего, чтобы описание было столь же запутанным, как и сам его объект, не существует. В качестве тривиального примера экономного описания сложной системы рассмотрим систему, описываемую следующей двумерной решеткой символов:

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>S</i>	<i>H</i>	<i>I</i>
<i>C</i>	<i>D</i>	<i>O</i>	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>U</i>	<i>J</i>	<i>K</i>
<i>M</i>	<i>N</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>H</i>	<i>I</i>	<i>R</i>	<i>S</i>
<i>O</i>	<i>P</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>J</i>	<i>K</i>	<i>T</i>	<i>U</i>
<i>R</i>	<i>S</i>	<i>H</i>	<i>I</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>M</i>	<i>N</i>
<i>T</i>	<i>U</i>	<i>J</i>	<i>K</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>O</i>	<i>P</i>
<i>H</i>	<i>I</i>	<i>R</i>	<i>S</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
<i>J</i>	<i>K</i>	<i>T</i>	<i>U</i>	<i>O</i>	<i>P</i>	<i>C</i>	<i>D</i>

Обозначим матрицу $\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix}$ через a , $\begin{vmatrix} M & H \\ O & P \end{vmatrix}$ через m , $\begin{vmatrix} R & S \\ T & U \end{vmatrix}$ через r и $\begin{vmatrix} H & I \\ J & K \end{vmatrix}$ через h . Кроме того, обозначим матрицу $\begin{vmatrix} a & m \\ m & a \end{vmatrix}$ через w и $\begin{vmatrix} r & h \\ h & r \end{vmatrix}$ через x . Тогда исходная матрица есть не что иное, как $\begin{vmatrix} w & x \\ x & w \end{vmatrix}$. И если исходная структура описывалась 64 символами, то теперь для ее описания достаточно 35:

$$S = \begin{vmatrix} w & x \\ x & w \end{vmatrix}$$

гов, управляющих более быстрыми процессами клеточного метаболизма. Поэтому не следует терять надежду на то, что все же удастся распутать клубок причинно-следственных связей (см. также [64]).

$$w = \begin{matrix} a & m \\ m & a \end{matrix} \quad x = \begin{matrix} r & h \\ h & r \end{matrix}$$

$$a = \begin{matrix} A & B \\ C & D \end{matrix} \quad m = \begin{matrix} M & N \\ O & P \end{matrix} \quad r = \begin{matrix} R & S \\ T & U \end{matrix} \quad h = \begin{matrix} H & I \\ J & K \end{matrix}$$

Полученная экономия объясняется избыточностью в исходной структуре. Например, в исходном описании структура $\begin{matrix} A & B \\ C & D \end{matrix}$ повторяется четыре раза, поэтому выгодно представить ее единственным символом a .

Если сложная структура абсолютно неизбыточна, то есть если ни один из ее аспектов не выводится из другого аспекта, она является одновременно и простейшим описанием самой себя. Мы можем вскрыть ее, но лишены возможности представить с помощью более простой структуры. Иерархические структуры, о которых мы говорили, обладают очень сильной избыточностью, именно это позволяет описывать их весьма экономным образом. Указанная избыточность может проявляться по-разному. Здесь я остановлюсь лишь на трех возможностях.

1. Иерархические системы обычно образуются из небольшого числа различных подсистем, встречающихся в различных комбинациях и взаимных конфигурациях. В качестве хорошо знакомого примера укажем на белки — их бесконечное разнообразие получается за счет сочетаний всего лишь двадцати различных аминокислот. Точно так же понадобилось менее сотни элементов для того, чтобы построить из них неисчерпаемое разнообразие молекул. Все это позволяет создавать описания из ограниченного словаря элементарных понятий, соответствующих основному набору элементарных подсистем, из которых складываются сложные системы.

2. Как мы имели возможность убедиться, иерархические системы весьма часто обладают свойством квазиразложимости. В связи с этим в описания взаимодействия их частей входят лишь агрегированные свойства. Некоторое обобщение понятия квазиразложимости можно было бы назвать «гипотезой о пустом мире» (ведь в своем большинстве взаимосвязи между различными явлениями весьма слабы), ибо при описании реальности важно учитывать лишь незначительную часть всех существующих взаимодействий. Язык, позволяющий не обращать внимания на нехватку многого, дает нам возможность весьма сжато описывать такой «пустой» мир. Матушке Хаббард не нуж-

но было проверять длинные списки домашней утвари, чтобы убедиться в том, что ее кухонный шкаф пуст.

3. Подходящие методы «перекодирования» нередко позволяют выявить избыточность, которая имеется в системе, хотя и не очевидна. Типичное перекодирование в описаниях динамических систем сводится к тому, что уравнения их траекторий заменяются уравнениями дифференциальных законов, порождающих эти траектории. Другими словами, простота кроется в постоянстве отношений между состоянием системы в любой момент времени и состоянием системы спустя короткий промежуток времени. Так, структуру последовательности 1 3 5 7 9 11... проще всего выразить, заметив, что каждый ее последующий член на 2 больше предыдущего. Но ведь именно такая последовательность, как выяснил Галилей, и описывает скорость катящегося по наклонной плоскости шарика через равные промежутки времени.

Часто утверждают, что цель науки состоит в том, чтобы, воспользовавшись царящей в мире избыточностью, дать простое описание этого мира. Я не стану развивать эту методологическую идею, а постараюсь рассмотреть два типа описаний, которые, по-видимому, помогают нам разобраться в поведении сложных систем. Я буду называть их описанием состояний и описанием процессов.

Описание состояний и описание процессов

«Окружность есть геометрическое место точек, находящихся на равном расстоянии от заданной». «Для того чтобы начертить окружность, вращайте одну ножку циркуля вокруг неподвижной другой до тех пор, пока первая не вернется в исходное положение». Евклид в неявном виде утверждал, что, если осуществить процесс, описанный во втором из приведенных предложений, получится объект, удовлетворяющий определению первого предложения. Итак, первое предложение представляет собой пример описания состояний, а второе — описание процесса.

Эти два способа установления структурных отношений составляют суть нашего опыта. Рисунки, чертежи, большинство диаграмм и химических структурных формул представляют собой описания состояний. Рецепты, дифференциальные уравнения и уравнения химических реакций могут служить примерами описаний процессов. Опи-

дания первого типа представляют мир таким, каким он предстает глазам пассивного наблюдателя. В них содержится критерий, позволяющий опознавать описываемые объекты, чаще всего с помощью их моделирования. Описания же второго типа характеризуют мир как некий объект нашей деятельности, и в них содержатся указания на средства, с помощью которых можно создать или получить объекты, обладающие требуемыми характеристиками.

Различия между картинами мира как объекта пассивного наблюдения и как объекта нашей деятельности определяют основные условия для выживания адаптивных организмов. В организме должны вырабатываться связи между целями, формирующимися в мире пассивного наблюдения, и действиями в мире активной деятельности. И если эти связи осознаны и могут быть словесно выражены, то их описание как раз и образует то, что принято называть анализом средств — целей. Задача адаптивного организма состоит в том, чтобы по заданному желаемому состоянию дел и существующему текущему состоянию определить расхождение между ними, а затем отыскать процесс, который бы устранил это расхождение [65].

Итак, решение задач требует непрерывного перевода описания одной и той же сложной реальности с языка состояний на язык процессов. Платон в своем «Меноне»¹ утверждал, что всякое обучение сводится к запоминанию. Он не мог иначе объяснить, каким образом нам удается найти или распознать ответ задачи, если только мы не знаем его заранее. Но наше двойственное отношение к миру является одновременно и источником и решением этого парадокса. Ставя задачу, мы приводим описание ее решения в терминах состояния. От нас же требуется найти последовательность процессов, преобразующих исходное состояние в состояние — цель. Перевод с языка описания процессов на язык описания состояний позволяет заметить, когда мы добились успеха. Найденное решение действительно является для нас новым, и у нас нет нужды в платоновой теории, согласно которой мы нашли его только потому, что оно уже хранилось в нашей памяти.

Накопленные данные свидетельствуют о том, что деятельность человека, которая носит название решения

¹ П л а т о н, Менон, Сочинения, т. 1, изд-во «Мысль», 1968.

задач, по сути дела является анализом средств — целей и состоит в обнаружении пути, ведущего к требуемому состоянию. Типичный пример: дан чертеж машиностроительной детали, требуется найти соответствующую технологию. Многие виды научной деятельности можно рассматривать в свете этой общей схемы; их задача — по имеющемуся описанию природного явления найти дифференциальные уравнения вызывающих его процессов.

Описание сложности самовоспроизводящихся систем

Задача поиска сравнительно простого описания сложных систем представляет двойкий интерес. Она помогает понять, как человек познает окружающий мир, и одновременно объясняет, благодаря чему возможно воспроизведение сложных систем. При рассмотрении эволюций сложных систем я вкратце коснулся вопроса о роли самовоспроизведения.

Как можно судить на примере атомов с высокими атомными весами и сложных неорганических молекул, эволюция сложности не обязательно должна предполагать самовоспроизведение. Если эволюция от простоты к сложности достаточно вероятна, она будет происходить снова и снова, и в системе установится статистическое равновесие, при котором значительная часть элементарных частиц будет входить в сложные системы.

Однако если существование какой-то вполне определенной сложной системы увеличивает вероятность создания другой системы, в точности ее повторяющей, то упомянутое равновесие между сложными системами и не входящими в них элементами сразу даст резкий крен в пользу сложности. А если мы располагаем достаточно ясным и полным описанием какого-то объекта, то такое описание позволяет воспроизвести сам объект. Каков бы ни был конкретный механизм воспроизведения, это описание дает нам всю необходимую для этого информацию.

Но, как мы уже имели возможность убедиться, описание сложных систем принимает самые различные формы: это может быть описание состояния или описание процесса, чертеж или рецепт. Соответственно процессы воспроизведения могут организоваться вокруг источника информации как первого, так и второго типа. Скорее всего сложная система служит как бы собственным описанием, то есть

формой, позволяющей отливать копии. Например, согласно одной из наиболее правдоподобных современных теорий о воспроизведении дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), молекула ДНК имеет вид двойной спирали с согласованными половинами (каждая из них существенно «отрицательна» по отношению к другой). Раскручиваясь, спираль дает возможность одной своей половине выполнить роль формы для воспроизведения другой половины.

Однако в свете данных о влиянии ДНК на механизм обмена в организме позволительно думать, что воспроизведение посредством прямого копирования — это лишь один из происходящих процессов. Принято считать, что ДНК служит формой-матрицей не только для самой себя, но и для родственного вещества — рибонуклеиновой кислоты (РНК). Последняя в свою очередь служит матрицей для белков. Но, согласно современным теориям, белки участвуют в процессах обмена не таким «формовочным» методом, а выступая в качестве катализатора, влияющего на скорость реакций в клетках. В то время как РНК представляет собой как бы чертеж для белков, белки являются как бы рецептом для процессов обмена¹.

Онтогенез повторяет филогенез

ДНК, находящаяся в хромосомах организма, содержит некоторую, а возможно, и почти всю информацию, необходимую для того, чтобы определить его развитие и жизнедеятельность. И если современные теории хотя бы приблизительно верны, то эта информация фиксируется не в виде описания состояния, а в виде определенной последовательности «инструкций», относящихся к строению организма и поддержанию его жизнедеятельности с помощью продуктов питания. Выше я образно называл описания процессов рецептами, но с таким же успехом их можно сравнивать и с машинными программами, ибо последние представляют собой последовательность команд, управляющих созданием взаимосвязей между символами. Позволю себе развернуть некоторые последствия этого сравнения.

¹ В монографии Анфинсена [66] можно найти подробное изложение материала, затронутого нами здесь в предельно упрощенном виде. Интересные замечания о механизмах описания процессов, которые могли бы определять молекулярные структуры, имеются также в работе Патти [67].

Если с точки зрения отношения к деятельности организма генетический материал является программой, то это программа с весьма специфическими и необычными свойствами. Во-первых, она принадлежит к числу самовоспроизводящихся (о возможном механизме копирования для этого случая мы уже говорили). Во-вторых, это программа, развивавшаяся в ходе эволюции. Возвращаясь к нашей притче о Хоре и Темпусе, мы можем предположить, что многие из предков этой программы были в свою очередь жизнеспособными программами, программами ее подсистем.

В состоянии ли мы строить какие-либо умозаключения о структуре этой программы? В биологии распространен общий принцип, который сформулирован столь четко и лаконично, что мы с нелегким сердцем отказались бы от него, даже если бы он не подтверждался фактами: онтогенез повторяет филогенез. Другими словами, каждый организм в процессе своего развития проходит через стадии, напоминающие некоторые из предшествующих ему эволюционных форм. Тот факт, что у зародыша человека на определенной стадии развития имеются жаберные щели, которые впоследствии видоизменяются и используются для других целей, служит хорошо известным примером этого. Однако, как подчеркивают биологи, этот принцип не следует понимать буквально — онтогенез повторяет лишь наиболее значительные аспекты филогенеза, и притом весьма приближенно. Но эти оговорки не должны заслонить собой основное, а именно: этот общий принцип, рассматриваемый как весьма грубое приближение, оказывается справедливым и позволяет обобщить весьма существенные факты развития биологических организмов. Каким же образом можно интерпретировать эти факты?

Один из способов решения сложной задачи состоит в том, чтобы свести ее к уже решенной задаче, то есть показать, что именно предстоит сделать, чтобы от решения первой части задачи перейти к следующей. Проиллюстрируем нашу мысль примером. Если бы в начале нынешнего столетия нам потребовалось обучить рабочего, как делать автомобили, то, наверное, проще всего было бы объяснить ему, что для этого нужно переделать коляску: убрать оглобли и добавить двигатель и систему передач. Точно так же и генетическая программа могла изменяться в ходе эволюции за счет новых процессов, которые преобразуют

простые формы в более сложные (подобно тому, как бластула преобразуется в гастролу).

Поэтому генетическое описание отдельной клетки может полностью отличаться от генетического описания состоящего из таких клеток многоклеточного организма. Размножение посредством клеточного деления потребует как минимум некоторого описания состояния (например, ДНК) и, если можно так выразиться, простой «интерпретирующей программы». Последняя отвечает за создание копий этого описания как части более крупного процесса копирования, воплощающегося в делении клеток. Но такого механизма, очевидно, недостаточно для того, чтобы объяснить сопровождающие развитие процессы дифференциации клеток. Поэтому естественнее предположить, что рассматриваемый механизм основан на описании процессов и более сложном процессе интерпретации, который обеспечивает поэтапное создание взрослого организма. При этом каждый этап развития соответствует действию оператора на предшествующем этапе.

Вопрос о взаимосвязи упомянутых двух описаний представляется более сложным. Несомненно, они связаны между собой; мы знаем достаточно о генетически-ферментных механизмах, поэтому нетрудно показать, что они играют главную роль и в процессах развития, и в метаболизме клетки. Но, исходя из приведенных выше рассуждений, такое описание должно обладать иерархической структурой, или быть квазиразложимым. Нижние уровни этой иерархии управляют быстрыми, «высокочастотными» динамическими процессами, протекающими в отдельных клетках, а верхние — «низкочастотными» процессами развития многоклеточного организма.

Если не считать самого факта повторения филогенеза, такая организация генетических программ подтверждается лишь единичными фактами. Однако имеющиеся данные и не противоречат выше высказанным идеям¹.

Научившись отделять генетическую информацию, управляющую метаболизмом клеток, от генетической инфор-

¹ Имеется немало фактов, убедительно свидетельствующих о том, что последовательные гены в хромосоме определяют ферменты, управляющие последовательными этапами синтеза белка (см. обзор [68]). Данные о дифференцированной деятельности генов в различных тканях и на разных этапах развития рассматриваются Голлом

мадии, управляющей развитием дифференцированных клеток в многоклеточных организмах, мы, как уже было показано выше, невероятно упростили бы задачу теоретического исследования.

Принцип, согласно которому в эволюционирующей системе, использующей для воспроизведения язык процессов, онтогенез будет частично повторять филогенез, может найти применение не только в биологии. Его с таким же успехом можно применить и в педагогической деятельности. Во многих дисциплинах, особенно в научных областях, где развитие идет чрезвычайно быстро, путь от элементарных курсов до специализированных в значительной мере повторяет развитие идей самой изучаемой науки. К счастью, такое повторение редко оказывается буквальным, по крайней мере не чаще, чем в биологии. В химии нам не приходится изучать теорию флогистона, чтобы затем опровергнуть ее. (Впрочем, я не уверен, что не смогу привести примеров из других областей, где поступают именно таким образом.) Но пересмотр программ, освобождающий нас от наслоений прошлого, происходит нечасто и весьма болезненно. К тому же он не всегда желателен — частичное повторение пройденного во многих случаях может привести к стремительному броску в новое.

Выводы. Описание сложности

Насколько сложной (или простой) кажется нам структура, в значительной степени зависит от того, как мы ее описываем. Большинство сложных структур, встречающихся в мире, в невероятной степени избыточно, и этой избыточностью можно воспользоваться, чтобы упростить их описания. Но чтобы получить возможность упрощения, необходимо найти правильное представление.

В развитии современной науки центральную роль сыграл принцип замены описаний состояний описаниями процессов. Динамические законы, принимающие вид сис-

в работе [69]. Наконец, очень похожая на предложенную, но получившая дальнейшее развитие модель была самостоятельно построена Платтом [70]. Механизм такого рода не является единственным способным управлять развитием с помощью описания процессов. Индукция в том виде, в каком она понимается в теории Спимана, основывается на описании процесса, в котором метаболизм в уже сформировавшихся тканях управляет следующим этапом развития

тем дифференциальных или разностных уравнений, в большинстве случаев позволили достаточно просто описывать сложное. Выше я старался показать, что эти свойства научного поиска не случайны и весьма важны. Связь между описанием состояний и описанием процессов играет важнейшую роль для всякого адаптивного организма, для возможности целенаправленного воздействия на окружающую его среду. При современном уровне понимания генетических механизмов создается впечатление, что даже для описания самих себя многоклеточные организмы находят в генетически закодированной программе — описании процессов — экономный и полезный способ представления.

Заключение

В ходе рассуждений нам пришлось иметь дело с почти пугающим разнообразием объектов, но без этого немислимо было бы постичь свойства, общие для самых разных видов сложных систем. В этой небольшой книге я пытался доказать, что один из путей создания нетривиальной теории сложных систем ведет через разработку теории иерархий. Эмпирически установлено, что большинство сложных систем, встречающихся в природе, оказываются иерархическими по своей структуре. А теория утверждает, что в мире, где сложное развивается из простого, сложные системы скорее всего будут иерархическими. Что же касается их динамики, то иерархии обладают свойством квазиразложимости, сильно упрощающим изучение. Квазиразложимость к тому же облегчает описание поведения сложных систем и позволяет понять, как при ограниченных возможностях удастся хранить всю информацию, необходимую для их развития и самовоспроизведения.

В науке и технике изучение систем привлекает все большее внимание. Это объясняется в большей степени насущной потребностью в синтезе и анализе сложности, нежели успешным развитием совокупности знаний и методов, относящихся к сложным явлениям. И будем надеяться, что это не просто кратковременная мода. Но тогда зарождающееся новое направление должно быть наполнено содержанием, и исследования, намеченные в этой книге, открывают один из путей поиска этого содержания.

1. Simon H. A., *Administrative Behavior*, 1960, p. 252.
2. Simon H. A., *Models of Man*, N. Y., Wiley, 1957.
3. Simon H. A., *The Architecture of Complexity*, *Proc. Am. Phil. Soc.* (December 1962).
4. Minsky M. L., *Computation: Finite and Infinite Machines*, Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 1967, ch. 1—4. Есть русский перевод: М. Минский, *Вычисления и автоматы*. М., «Мир», 1971.
5. Wilkes M., *Computers Then and Now*, *J. Ass. Comput. Machinery*, 15, 1—7 (January 1968).
6. Wos L., Robinson G. A., Carson D. F. and Shalla L., *The Concept of Demodulation in Theorem Proving*, *J. Ass. Comput. Machinery*, 14, 698—709 (October 1967).
7. Feigenbaum E. A. and Feldman J. (eds.), *Computers and Thought*, N. Y., McGraw-Hill, 1963.
8. Simon H. A., *Motivational and Emotional Controls of Cognition*, *Psychol. Rev.*, 74, 29—39 (1967).
9. Simon H. A., *An Information-Processing Explanation of Some Perpetual Phenomena*. *Brit. J. Psychol.*, 58, 1—12 (1967).
10. Bartlett F., *Thinking*, N. Y., Basic Books, 1958.
11. Newell A., *Studies in Problem Solving: Subject 3 on the Cryptarithmic Task DONALD + GERALD = ROBERT*, Pittsburgh, CIT, 1966.
12. Simon H. A. and Gregg L. W., *Process Models and Stochastic Theories of Simple Concept Formation*, *J. Math. Psychol.*, 4, 246—276 (June 1967).
13. Newell A. and Simon H. A., *Overview: Memory and Process in Concept Formation*, в кн. *Concepts and the Structure of Memory*, ed. by Kleinmütz B., N. Y., Wiley, 1967, ch. 11, pp. 241—262.
14. Bruner J. S., Goodnow J. J. and Austin G. A., *A Study of Thinking*, N. Y., Wiley, 1956.
15. Gregg L. W. and Simon H. A., *An Information-Processing Explanation of One-Trial and Incremental Learning*, *J. Verb. Learning and Verb. Behavior*, 6, 780—787 (1967).
16. Simon H. A. and Feigenbaum E. A., *An Information-Processing Theory in Verbal Learning*, *J. Verb. Learning and Verb. Behavior*, 3, 385—396 (1964).

17. Feigenbaum E. A. and Simon H. A., A Theory of the Serial Position Effect, *Brit. J. Psychol.*, 53, 307—320 (1962).
18. Feigenbaum E. A., An Information-Processing Theory of Verbal Learning, Thesis (unpubl.), Pittsburgh, CIT, 1959.
19. Ebbinghaus H., Über das Gedächtnis, 1885.
20. Bugelski B. R., Presentation Time, Total Time and Mediation in Paired-Associate Learning, *J. Exp. Psychol.*, 63, 409—412 (1962).
21. Miller G., The Magical Number Seven, Plus or Minus Two, *Psychol. Rev.*, 63, 81—97 (1956). Есть русский перевод в сб. «Инженерная психология», М., «Прогресс», 1964.
22. Waugh N. C. and Norman D. A., Primary Memory, *Psychol. Rev.*, 72, 89—104 (1965).
23. Shepard R. N., Recognition Memory for Words, Sentences and Pictures, *J. Verb. Learning and Verb. Behavior*, 6, 156—163 (1957).
24. Dansereau D. F. and Gregg L. W., An Information Processing Analysis of Mental Multiplication, *Psychonom. Sci.*, 6, 71—72 (1966).
25. McLean R. S. and Gregg L. W., Effects of Induced Chunking of Temporal Aspects of Serial Recitation, *J. Exp. Psychol.*, 74, 455—459 (1967).
26. Skinner B. F., Science and Human Behavior, 1953, p. 266.
27. De Groot A. D., Perception and Memory Versus Thought: Some Old Ideas and Recent Findings, в кн. Problem Solving, ed. by Kleinmütz B., N. Y., Wiley, 1966, pp. 19—50.
28. Chomsky N., Three Models for the Description of Language, *IRE Trans. Inform. Theory*, IT-2, № 3 (September 1956). (Есть русский перевод в «Кибернетическом сборнике», вып. 2, М., ИЛ, 1961, стр. 237—266.) Newell A. and Simon H. A., The Logic Theory Machine, там же.
29. Greenberg H. (ed.), Universals of Language, Cambridge, MIT Press, 1963, pp. 58—90.
30. Katz J. J., The Philosophy of Language, N. Y., Harper, 1966, pp. 240—282.
31. Coles L. S., Syntax Directed Interpretation of Natural Language, Thesis, CIT, 1967.
32. Simon H. A., The Logic of Rational Decision, *Brit. J. Phil. Sci.*, 16, 169—186 (1965).
33. Simon H. A., The Logic of Heuristic Decision Making, в кн. The Logic of Decision and Action, ed. by Rescher N., Pittsburgh, Univ. Press, 1967, pp. 1—35.
34. Jørgensen J., Imperatives and Logic, *Erkenntnis*, 7, 288—296 (1937—1938).
35. Montague R., Logical Necessity, Physical Necessity, Ethics and Quantifiers, *Inquiry*, 4, 259—269 (1960).
36. Hintikka J., Modality and Quantification, *Theoria*, 27, 119—128 (1961).
37. Greenblatt R. D., Eastlake D. E. and Crocker S. D., Greenblatt Chess Program, Proc. Fall Joint Computer Confer., Anaheim, Calif., 1967, pp. 801—810.
38. Mannheim M. L., Hierarchical Structure: A Model of Design and Planning Processes, Cambridge, MIT Press, 1966. Есть рус-

- ский перевод: Мангейм М. Л., Иерархические структуры, М., «Мир», 1970.
39. Baylor G. W. and Simon H. A., A Chess Mating Combinations Program, *Proc. Spring Joint Computer Confer.*, Boston, 28, 431—447 (1966).
 40. Alexander C., Notes on the Synthesis of Form, Cambridge, Harv. Univ. Press, 1967.
 41. Amarel S., On the Mechanization of Creative Processes, *IEEE Spectrum*, 3, № 4, 112—114 (April 1966).
 42. Sutherland I. E., SKETCHPAD, Man-Machine Graphical Communication System, *Proc. AFIPS Spring Joint Computer Confer.*, Baltimore, 1963, pp. 329—346.
 43. Minsky M. L., Computation: Finite and Infinite Machines, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1967. Есть русский перевод: Минский М., Вычисления и автоматы, М., «Мир», 1971. См. также Iverson K. E., A Programming Language, N. Y., Wiley, 1962.
 44. Hillier L. A. and Isaacson L. M., Experimental Music, N. Y., McGraw-Hill, 1959.
 45. Reitman W. R., Cognition and Thought, N. Y., Wiley, 1965, ch. 6. Есть русский перевод: Рейтман У., Познание и мышление, М., «Мир», 1968.
 46. Shannon C. and Weaver W., The Mathematical Theory of Communication, Urbana, Univ. Illinois Press, 1949. Есть русский перевод в сб. Шеннон К., Работы по теории информации и кибернетике, М., ИЛ, 1963.
 47. Ashby W. R., Design for a Brain, N. Y., Wiley, 1952. Есть русский перевод: Эшби У. Р., Конструкция мозга, М., «Мир», 1964.
 48. Weaver W., Science and Complexity, *Am. Scient.*, 36, 536 (1948).
 49. Platt J. R., Properties of Large Molecules That Go Beyond the Properties of Their Chemical Sub-groups, *J. Theor. Biol.*, 1, 342—358 (1961).
 50. Elsasser W. M., The Physical Foundation of Biology, N. Y., Pergamon Press, 1958.
 51. Jacobson H., Information, Reproduction and the Origin of Life, *Am. Scient.*, 43, 119—127 (January 1955).
 52. Setlow R. B. and Pollard E. C., Molecular Biophysics, Reading, Mass., Addison-Wesley, 1962, pp. 63—65.
 53. Flory P. J., Principles of Polymer Chemistry, Ithaca, Cornell Univ. Press, 1953, ch. 8.
 54. Linschitz H., The Information Content of a Bacterial Cell, в кн. Information Theory in Biology, ed. by Quastler H., Urbana, Univ. Illinois Press, 1953, pp. 251—262.
 55. Кассер Н., Some Physico-chemical Aspects of Biological Organization, Appendix, в кн. The Strategy of the Genes, Lond., Allen and Unwin, 1957, pp. 191—249.
 56. Newell A., Shaw J. C., and Simon H. A., Empirical Explorations of the Logic Theory Machine. *Proc. West. Joint Computer Confer.*, N. Y. (February 1957), Chess-Playing Programs and the Problem of Complexity, *IBM J. Res. and Developm.*, 2, 320—335 (October 1958). Есть русский перевод обеих статей в сб. «Вычислительные машины и мышление», М., «Мир», 1967.

57. Newell A. and Simon H. A., Computer Simulation of Human Thinking, *Science*, 134, 2011—2017 (December 1961).
Есть русский перевод в сб. «Кибернетика и живой организм», Киев, 1964, стр. 17—30.
58. Simon H. A. and Ando A., Aggregation of Variables in Dynamic Systems, *Econometrica*, 29, 111—138, 117—118 (April 1961).
59. Fisher F. M., On the Cost of Approximate Specification in Simultaneous Equation Estimation, *Econometrica*, 29, 139—170 (April 1961).
60. Fisher F. M. and Ando A., Two Theorems on *Ceteris Paribus* in the Analysis of Dynamic Systems, *Am. Polit. Sci. Rev.*, 61, 103—113 (March 1962).
61. De Groot S. R., Thermodynamics of Irreversible Processes, N. Y., Interscience Publ., 1951, pp. 11—12.
62. Pauling L., General Chemistry, 2nd ed., San Francisco, Freeman, 1953, ch. 15.
63. Gombrich E. H., Art and Illusion, N. Y. Pantheon Books, 1960, pp. 291—296.
64. Platt J. R., *Perspectives in Biol. and Med.*, 2, 243—245 (1959).
65. Simon H. A. and Newell A., Simulation of Human Thinking, в кн. Management and the Computer of the Future, ed. by Greenberger M., N. Y., Wiley, 1962, pp. 95—114.
66. Anfinsen C. B., The Molecular Basis of Evolution, N. Y., Wiley, 1959, ch. 3, 10.
67. Patee H. H., On the Origin of Macromolecular Sequences, *Biophys. J.*, 1, 683—710 (1961).
68. Hartman P. E., Transduction: A Comparative Review, в кн. The Chemical Basis of Heredity, ed. by McElroy W. D. and Glass B., Baltimore, Johns Hopkins Press, 1957, pp. 442—454.
69. Gall J. G., Chromosomal Differentiation, в кн. The Chemical Basis of Development, ed. by McElroy W. D. and Glass B., Baltimore, Johns Hopkins Press, 1958, pp. 103—135.
70. Platt J. R., A «Book Model» of Genetic Information Transfer in Cells and Tissues, в кн. Horizons in Biochemistry, ed. by Kasha M. and Pullman B., N. Y., Acad. Press (в печати).
71. Ernst G. W. and Newell A., GPS: A Case Study in Generality and Problem Solving, N. Y., Acad. Press, 1969.

ОГЛАВЛЕНИЕ

О СЕРИИ <<НАУКИ ОБ ИСКУССТВЕННОМ>>	1
ПРЕДИСЛОВИЕ	5
ГЛАВА I. МИР ЕСТЕСТВЕННОГО И МИР ИСКУССТВЕННОГО	9
ГЛАВА II. ПСИХОЛОГИЯ МЫШЛЕНИЯ. КАК ИСКУССТВЕННОЕ ВРАСТАЕТ В ЕСТЕСТВЕННОЕ	34
ГЛАВА III. НАУКА О КОНСТРУИРОВАНИИ. КАК СОЗДАВАТЬ ИСКУССТВЕННОЕ	70
ГЛАВА IV. АРХИТЕКТУРА СЛОЖНОСТИ	103
БИБЛИОГРАФИЯ	138

Издательство УРСС

специализируется на выпуске учебной и научной литературы, в том числе монографий, журналов, трудов ученых Российской Академии наук, научно-исследовательских институтов и учебных заведений.



Уважаемые читатели! Уважаемые авторы!

Основываясь на широком и плодотворном сотрудничестве с Российским фондом фундаментальных исследований и Российским гуманитарным научным фондом, мы предлагаем авторам свои услуги на выгодных экономических условиях. При этом мы берем на себя всю работу по подготовке издания — от набора, редактирования и верстки до тиражирования и распространения.

Среди вышедших и готовящихся к изданию книг мы предлагаем Вам следующие:

Серия «Науки об искусственном»

Гаазе-Рапопорт М. Г., Поспелов Д. А. От амёбы до робота: модели поведения.

Арбиб М. Метафорический мозг.

Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика.

Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем.

Жилин Д. М. Теория систем: опыт построения курса.

Тарасевич Ю. Ю. Математическое и компьютерное моделирование.

Тарасевич Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы.

Плохотников К. Э. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

Мышкис А. Д. Элементы теории математических моделей.

Ворожцов А. В. Путь в современную информатику.

Потапова Р. К. Речь: коммуникация, информация, кибернетика.

Потапова Р. К. Тайны современного Кентавра. Речевое взаимодействие.

Потапова Р. К. Новые информационные технологии и лингвистика.

Потапова Р. К. Речевое управление роботом.

Хомский Н., Миллер Дж. Введение в формальный анализ естественных языков.

Бахтияров К. И. Логика с точки зрения информатики.

Организационное управление и искусственный интеллект. Под ред. Арлазарова В. Л.

Управление информационными потоками. Под ред. Арлазарова В. Л., Емельянова Н. Е.

Попков Ю. С. Теория макросистем. Равновесные модели.

Вайдлих В. Социодинамика: системный подход к математическому моделированию социальных наук.

Информационные технологии и вычислительные системы. Гл. ред. Емельянов С. В. № 2–3, 2002, № 1–4, 2003.

Поппер К. Р. Объективное знание. Эволюционный подход.

Поляков С. Э. Мифы и реальность современной психологии.

Грегори Р. Л. Разумный глаз.

Пенроуз Р. НОВЫЙ УМ КОРОЛЯ. О компьютерах, мышлении и законах физики.

По всем вопросам Вы можете обратиться к нам:
тел./факс (095) 135-42-16, 135-42-46
или **электронной почтой URSS@URSS.ru**
Полный каталог изданий представлен
в **Интернет-магазине: <http://URSS.ru>**

Издательство УРСС

*Научная и учебная
литература*