

**М. А. КАМЕНСКАЯ**

**ИНФОРМАЦИОННАЯ  
БИОЛОГИЯ**

Москва 2008

## ПРЕДИСЛОВИЕ

*Самая большая беда для науки —  
превратиться в моду  
Стефан Цвейг*

Понятие «информация» проникло во все сферы деятельности человека. Появился термин «инфосфера» — информационные структуры, системы и процессы в науке и обществе. Вместе с тем до сих пор нет единой точки зрения на предмет информатики. Более того, остаются не вполне ясными соотношения (логические, методологические, прагматические) между различными дисциплинами и предметными областями, связанными с информацией.

Футурологи говорят, что XXI в. — это эпоха наук о Жизни. Генная инженерия, биотехнология, расшифровка генома человека и других организмов, разработка новых средств борьбы с болезнями, этические проблемы вмешательства в конструкцию организмов — это не просто мода, а настоящее и будущее человечества.

Упорно предпринимаются попытки применить информационный подход к исследованию биологических систем и биологические аналогии при разработке компьютеров и программных средств (нейронные сети, нейрокомпьютеры). Таким образом, объединяются два направления «передового фронта» — информационные науки и биологические науки. Тем не менее не выработана (и удастся ли ее выработать?) согласованная концепция информации в биологии. Биоинформатику называют наукой XXI в. Однако можно встретить разные представления о том, что такое биоинформатика: компьютерная биология, информационное обслуживание биологических исследований, расшифровка генома и даже — изучение слабоинтенсивных волновых процессов (обеспечивающих обмен информацией между биологическими объектами, а также между ними и окружающей средой).

Предлагаемая вашему вниманию книга названа «Информационная биология», а не «Компьютерная биология» и не «Биоинформатика». Такое более общее название означает, что автор ставит цель рассмотреть и разграничить различные аспекты применения понятия «информация» в науках о Жизни: очертить горизонты информационной биологии, рассказать об основных ее направлениях, о взаимоотношениях информационных дисциплин и наук о Жизни (генетики, эволюционной биологии, биологии развития, нейробиологии, физиологии, иммунологии, фармакологии, экологии).

Именно сейчас ощущается потребность обобщить представления (очень быстро раз-

вивающиеся) о живой системе, получаемые особым современным методом (способом) — с применением динамической теории информации и с помощью информационных технологий.

**ГЛАВА 1**  
**СЕМЕЙСТВО ИНФОРМАЦИОННЫХ НАУК.**  
**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ДИСЦИПЛИНАМИ**

Гораздо легче измерять,  
чем знать, что измеряешь.

*Галилео Галилей*

**1.1. ПОНЯТИЕ «ИНФОРМАЦИЯ»**

Слово «информация» образовано от латинского *«information»* — разъяснение, изложение, ознакомление, представление. Это одно из наиболее общих понятий науки, обозначающее некоторые сведения, совокупность каких-либо данных, знаний и т.п. Понятие «информация» обычно предполагает наличие двух объектов — источника информации и потребителя информации (адресата). В обыденной жизни мы имеем в виду под информацией сведения об окружающем нас мире, воспринимаемые и передаваемые с помощью знаков или сигналов. Такое размытое интуитивное определение отражает широту, многоплановость представлений об информации. Тогда есть ли вообще необходимость в определении понятия «информация»?

Выдающийся специалист в области философии науки, представитель современного критического рационализма Карл Поппер при рассмотрении феномена восприятия человеком окружающего мира не нуждался в термине «информация».

Проводя анализ того, каким образом создается и расширяется человеческое знание (в частности, научное знание) и как происходит взаимодействие между индивидуальным (субъективным) знанием и знанием, передаваемым другим людям (объективным знанием), К. Поппер выдвинул представление о трех мирах: мир физических вещей — *Мир 1*; ментальный мир субъективного знания физического мира — *Мир 2*; мир объективного знания о ментальном мире — *Мир 3* [45]. Личный опыт (индивидуальное мышление, информация в мозге человека) относится к Миру 2, а научное знание и коллективный опыт человечества (внеличностное знание) составляют Мир 3. Если говорить о научном исследовании, то результаты исследования относятся к Миру 2, лежащие в основе исследования теории — к Миру 3, а объекты исследования — к Миру 1.

Эту идею видный теоретик Бертрам Брукс предложил рассматривать как *философскую основу* информационной науки. Согласно К. Попперу, представление о Мире 3 очень важно для того, чтобы понять, как происходит рост знания. Мир 3 существует автономно, независимо от конкретного познающего субъекта, хотя и создается мыслящими существами.

Идея о трех мирах составляет часть более общей теории эволюционной эпистемологии, в

рамках которой Поппер утверждал, что эволюция человека происходит экзосоматически, т.е. в процессе эволюции мозг и память не изменяются. Вместо этого человек создает новые «органы» вне своего тела: письменные принадлежности, пишущие машинки, диктофоны, полиграфические машины, компьютеры.

Мир 3 не совершенен: он включает не только правильные, но и ошибочные теории, ложную информацию. Важным механизмом с точки зрения роста научного знания является предложенный Поппером критерий фальсифицируемости (*falsifiability*), разграничивающий подлинную науку и псевдонауку: для гипотез и теорий следует искать не подтверждающие доводы, а опровергающие (фальсифицирующие) аргументы; знание подвержено ошибкам, оно несовершенно, его всегда можно улучшить. Любое организованное множество высказываний, не допускающее фальсифицируемости, не должно считаться наукой (это и есть разграничивающий критерий). Эрнст Майр (великий эволюционный биолог, недавно скончавшийся в США на 101 году жизни) высказался так: «Совокупность условий, необходимых для жизни, радикальным образом ограничивает количество планет, пригодных для развития живого. Таким образом, существует вероятность, что сочетание и последовательность условий, позволивших возникнуть жизни на Земле, не повторились ни на одной другой планете Вселенной. Я не делаю такого утверждения, оно не было бы научным, поскольку его невозможно попытаться опровергнуть» [76].

Академик Н.Н.Моисеев (специалист, в частности, по компьютерным моделям биосферы) писал: «Во-первых, я полагаю, что строгого и достаточно универсального определения понятия информации не только нет, но оно вряд ли возможно. Во-вторых, это понятие мне представляется в некотором смысле «историческим». Необходимость его введения возникает лишь при описании довольно поздних этапов развития материального мира, лишь тогда, когда в нем зарождается жизнь» [40]. Для нас примечательно, что Моисеев связывал понятие «информация» с живыми организмами.

Обратимся к одному из основоположников информационных наук Ноберту Винеру [11]. «Информация — это обозначение содержания, полученного из внешнего мира в процессе нашего приспособления к нему и приспособливания к нему наших чувств.

Процесс получения и использования информации является процессом нашего приспособления к случайностям внешней среды и нашей жизнедеятельности в этой среде. Потребности и сложности современной жизни предъявляют гораздо больше, чем когда-либо раньше, требования к этому процессу информации, и наша пресса, наши музеи, научные лаборатории, университеты, библиотеки и учебники должны удовлетворить потребности этого процесса, так

как в противном случае они не выполняют своего назначения. Действенно жить — это значит жить, располагая правильной информацией. Таким образом, сообщение и управление точно так же связаны с самой сущностью человеческого существования, как и с жизнью человека в обществе.» Подчеркнем, что Н.Винер относит понятие «информация» к категории процессов.

И еще одно высказывание Винера, часто цитируемое: «Информация есть информация, а не материя и не энергия», т.е. она не принадлежит вещественному миру и, стало быть, на нее не распространяются законы сохранения. Очевидно, в научно-философском плане информацию следует рассматривать в одном ряду с такими понятиями, как материя, энергия, пространство, время. «Информация есть первичное понятие» [24], которое имеет два аспекта: а) связь, т.е. «информация, хранимая, посылаемая и воспринимаемая узлами и передаваемая по каналам»; б) информация, понимаемая «как мера организованности». В обоих аспектах «информация противоположна энтропии». «Понятие информации ничуть не менее понятно, чем понятие энергии; оно только менее привычно» [24].

Таким образом, термин «информация» относится к фундаментальным понятиям, которые в философии называются *категориями*. Такие понятия не поддаются исчерпывающему определению, их смысл и содержание можно раскрывать лишь применительно к тем или иным сферам науки и человеческой деятельности.

Понятие «информация» по-разному трактуется в разных отраслях наук. С общенаучных позиций, информация — это любая совокупность сигналов, воздействий или сведений, которую какая-либо система воспринимает из среды, передает в среду или хранит в себе. До середины XX в. имелись в виду только сведения, передаваемые людьми устно, письменно либо другими способами (с помощью условных сигналов, технических средств и т.д.). В XX в. общенаучное понятие информации стали толковать как *обмен сведениями между людьми, между человеком и машиной, а также между машинами, обмен сигналами в животном и растительном мире, передачу признаков от клетки к клетке, от организма к организму*.

В философском понимании, информация — это алгоритм, или совокупность приемов, правил, характеризующих некое стороннее воздействие на систему, которое изменяет спонтанный ход событий в ней [29].

Что касается научно-технического понятия, то в самом общем виде информация — это сообщение, передаваемое по каналу связи от источника к приемнику. Сообщение передается в материально-энергетической форме — в виде электрических, звуковых, световых и т.п. сигналов. Человек и другие живые организмы воспринимают сообщения посредством органов чувств. Технические приемники информации — это разнообразные регистрирующие и измери-

тельные устройства. В каждом случае прием информации связан с изменением во времени какой-либо величины, характеризующей состояние приемника (рис. 1.1).

«Доступная науке информация всегда появляется в кодированном виде, т.е. в форме сообщения, которое представляет собой последовательность сигналов. В сфере действия кибернетики информация не извлекается из сообщения, а только перекодируется. Если имеются некоторый код А, сообщение а в этом коде и правила перевода кода А в код Б, то можно сообщение а перевести в сообщение р в коде Б, которое можно рассматривать как носитель. Таким образом, информацию можно понимать как инвариант при переводе сообщения в другие коды» [24].

С позиций математики и физики информацией считаются не любые сведения, а лишь те, которые помогают снять или уменьшить неопределенность, существовавшую до их получения; информация — это разность между осведомленностью получателя до и после приема сообщения. Современная динамическая теория информации (см. ниже) останавливается на определении, предложенном Г. Кастлером [26] в 60-е гг. XX в.: информация есть запомненный выбор одного варианта из нескольких возможных и равноправных.

Разнообразие определений понятия «информация» соответствует чрезвычайно широкой области современного применения в науке информационного подхода. Нет и согласия относительно природы, сути самого явления «информация». Одна крайность — представление о том, что информация связана только с человеком и помимо его деятельности (лингвистика, социальные явления) не существует. Другая крайность — так называемая обобщенная теория информации, согласно которой информационные процессы протекают во всех живых и неживых самоорганизующихся системах, как искусственных, так и природных (понятие «самоорганизация» будет рассматриваться в гл. 2).

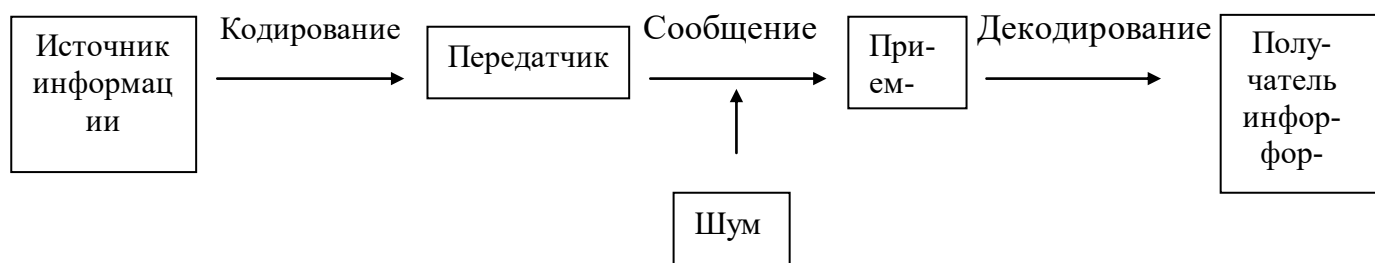


Рис. 1.1. Схема передачи информации (по [2])

В контексте нашего изложения следует подчеркнуть некоторые аспекты современных представлений об информации. Во-первых, это понятие из ряда *процессов*, а не материальных объектов. Во-вторых, оно относится не только к специфической деятельности

человека (психология, общественные науки, лингвистика), но и к организмам как живым системам (биологические науки). В-третьих, следует провести четкую границу между понятиями «информация» и «данные»: информация не идентична чувственно воспринимаемому данным, хотя и зависит от них. Далее мы будем часто обращать внимание на то обстоятельство, что информация связана не столько с самим фактом сообщения, сколько с его семантикой — смыслом, содержанием.

Основная задача этой книги — рассмотреть понятие «информация» применительно к живым системам (см. гл. 3, 4). Но сначала необходимо остановиться на более общих представлениях.

## **1.2. ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИИ**

В 1948 г. сотрудник американской компании «Bell Telephone Laboratories» Клод Элвуд Шеннон (ему тогда было 28 лет) опубликовал в журнале «Bell System Technical Journal» фундаментальную работу «Математическая теория связи». С ее появлением обычно связывают возникновение классической (статистической) теории информации. Именно к этому времени развитие технических систем коммуникации потребовало разработки оптимальных способов передачи информации по каналам связи. Решение соответствующих проблем (кодирование и декодирование сообщений, выбор помехоустойчивых кодов и т.д.) требовало прежде всего ответа на вопрос о количестве информации, которое можно передать в единицу времени, пользуясь данным набором сигналов. Вопрос «Что такое информация?» просто не возникал.

### **1.2.1. Математическая теория связи**

#### **как основа классической теории информации**

Теория информации является, по существу, математической дисциплиной. Однако ее основные положения можно изложить, не прибегая к сложному математическому аппарату. На основе теории Шеннона [60] информацию можно определить как меру того количества неопределенности, которое уничтожается после получения сообщения. Для выражения оптимальной скорости передачи (пропускной способности канала связи) К. Шеннон ввел величину, называемую *количеством информации*. При этом Шеннон не давал определения понятия информации и не рассматривал ее природу.

Для вычисления количества информации ( $Y$ ) в текстовом сообщении из  $N$  символов К. Шеннон ввел следующую формулу:



$$I_N = -N \sum_i^N p_i \log_2 p_i \quad (1)$$

где  $N$  — число букв в данном языке;  $p_i$  — частота встречаемости  $i$ -й буквы ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) в этом языке; перед правой частью формулы поставлен знак «минус», чтобы количество информации было всегда положительным, несмотря на то, что  $\log_2 A < 0$  ( $p_i < 1$ ).

В основе классической теории информации лежит идея о том, что количество информации может быть описано и, значит, измерено с помощью вероятностей, точнее изменений вероятностей. Чем необычнее событие, т.е. чем меньше его вероятность  $p$ , тем значительнее уменьшается неопределенность, когда оно происходит. Если сообщение не изменяет вероятность события для получателя (вероятность  $p = 1$ ), то количество информации равно нулю.

Полученную информацию можно определить как разность между осведомленностью получателя до и после получения сообщения. Информативно только то сообщение, которое уменьшает степень неосведомленности получателя относительно происшедших событий. Полученная информация более точно выражается соотношением

$$I = \log p_a / p_b \quad (2)$$

где  $I$  — полученная информация;  $p_a$  — вероятность события для получателя после прихода сообщения;  $p_b$  — вероятность события для получателя до прихода сообщения. Предположим, человек подбрасывает монету и сообщает результат другому человеку. До того как монета упала, вероятность каждого из двух возможных сообщений о событии («орел» или «решка») равнялась 0,5. После падения монеты вероятность сообщения о реально выпавшем результате стала равна 1.

Таким образом,  $I = -\log 1/2 = \log 2 = 1$  бит.

*Количество информации в сообщении о том, какой из двух равновероятных взаимоисключающих случаев реально имел место (т. е. в сообщении, уменьшающем в два раза количество возможных исходов ситуации), является минимальным и равно 1. Эта единица измерения количества информации называется бит (binary digit).*

Одна из важных проблем теории связи касается максимальной скорости передачи информации по каналу связи при наличии случайного шума (в технических системах это могут быть наводки от электросети, ослабление сигналов из-за повреждения изоляции кабеля, искажение сигналов вследствие удаления источника и т.д.). Эта проблема очень значима для передачи информации в биологических системах, в частности, в нейробиологии. В любой системе связи сообщение, из которого получатель извлекает информацию, состоит из сигнала и шума.

Пусть  $B$  — ширина полосы пропускания канала связи (эта величина определяет диапазон частот, которые могут проходить через систему);  $S$  — эффективная мощность сигнала в приемнике;  $N$  — эффективная мощность шума в приемнике. Максимальная скорость ( $R$ ) передачи информации по каналу определяется мощностью сигнала  $S$  и мощностью шума  $N$ :

$$R = B \log (1 + S/N). \quad (3)$$

Другими словами, максимальная информация, которая может быть передана за время  $T$ , равна  $RT$ , или  $I = BT \log (1 + S/N)$ .

Для снижения ошибки, вызываемой шумом, можно повторять дважды кодовый сигнал каждой буквы сообщения, но тогда при той же скорости передачи сигналов скорость передачи информации уменьшится в два раза.

Информация, дополнительно вводимая в систему в целях повышения ее надежности и защищенности, называется *избыточной*. Избыточность принимается равной разности между 1 и отношением реальной скорости передачи информации к максимально возможной скорости ее передачи; избыточность выражается в процентах. Ее можно рассматривать как меру экономности передачи. К. Шеннон показал, что, пользуясь избыточностью, можно в принципе передать по каналу с шумом любое сообщение сколь угодно надежно. Максимально возможная скорость передачи по данному каналу называется его пропускной способностью.

Концепция Шеннона применима не только к упорядоченным наборам букв или цифр, но и к любой системе связи с конечным числом различных типов сигналов или символов, вообще — к любой ситуации с конечным множеством событий, каждому из которых может быть приписана вероятность.

Важно подчеркнуть, что классическая теория информации имеет дело с относительными вероятностями только таких «событий», как отдельные символы и сигналы, но ничего не говорит о содержании (семантике) информации, передаваемой в сообщении. Текст стихотворения и бессмысленно рассыпанный набор тех же букв содержат одинаковое количество информации, поскольку вероятности появления каждой буквы в обоих случаях одинаковы и оба «сообщения» имеют одинаковую длину. Отдельные символы, передаваемые по каналам связи, сами по себе не несут информации; ее содержат лишь сочетания сигналов или букв, причем вовсе не любые [29].

Классическая теория информации не учитывает важность информации, содержащейся в сообщении. Например, количество информации в сообщении о том, что при бросании монеты выпал «орел» или же выпала «решка», не зависит от того, заключалось ли

пары (и насколько значимое для участников) на результат бросания. Таким образом, в теории информации рассматривается не субъективное значение информации (не смысл сообщения, который является предметом семантики), а объективная мера информации. Однако статистическая теория информации все же имеет отношение к семантике, поскольку сообщает, с какой достоверностью можно полагаться на точность полученной информации по сравнению с информацией, посланной по каналу связи.

Итак, концепция Шеннона (математическая теория связи) имеет следующие особенности, которые существенно повлияли на дальнейшее развитие классической (статистической) теории информации [29]. (1) Отсутствует определение понятия «информация». Постулируется участие информации в любом природном и общественном явлении. (2) Термин «количество информации» означает статистическую (частотную) характеристику знаков, составляющих сообщение, т.е. относительные вероятности таких событий, как символы и сигналы. Мерой количества информации, связанной с каким-либо объектом или явлением, может служить редкость его встречаемости или сложность его структуры. (3) Теория не касается содержания (смысла — семантики) информации, передаваемой в сообщении. (4) По отношению к источнику сообщений применяется термин «энтропия».

### **1.2.2. Информация и энтропия**

Понятие «энтропия» (от греческого слова, означающего «поворот», «превращение») было введено в физику в 1865 г. Р.Клаузиусом как количественная мера неопределенности. Согласно второму началу термодинамики, в замкнутой системе, т.е. в изолированной в тепловом и механическом отношении, энтропия либо остается неизменной (если в системе протекают обратимые неравновесные процессы), либо возрастает (при неравновесных процессах) и при состоянии равновесия достигает максимума. Статистическая физика рассматривает энтропию (обозначаемую символом  $S$ ) в качестве меры вероятности пребывания системы в данном состоянии. Л.Больцман отмечал (1894 г.), что энтропия связана с «потерей информации», поскольку энтропия сопровождается уменьшением числа взаимоисключающих возможных состояний, которые остаются допустимыми в физической системе после того, как относящаяся к ней макроскопическая информация уже зарегистрирована.

По аналогии со статистической механикой К. Шеннон ввел в теорию информации понятие энтропии в качестве свойства источника сообщений порождать в единицу времени то или иное число сигналов на выходе. Энтропия сообщения — это частотная характеристика сообщения, выражаемая формулой (1). «Как энтропия есть мера дезорганизации, так

и передаваемая рядом сигналов информация является мерой организации. Действительно, передаваемую сигналом информацию возможно толковать, по существу, как отрицание ее энтропии и как отрицательный логарифм ее вероятности. То есть чем более вероятно сообщение, тем меньше оно содержит информации» [11]. Мера неопределенности — число двоичных знаков, необходимое для фиксирования (записи) произвольного сообщения от конкретного источника, либо среднее значение длины кодовой цепочки, соответствующее самому экономному способу кодирования.

Л. Бриллюэн [7] разработал так называемый негэнтропийный принцип информации, согласно которому информация — это энтропия с обратным знаком (негэнтропия). Бриллюэн предложил выражать информацию ( $I$ ) и энтропию ( $S$ ) в одних и тех же единицах — *информационных* (биты) либо *физических* (эрг/град). В отличие от энтропии, рассматриваемой в качестве меры неупорядоченности системы, негэнтропия — мера ее упорядоченности.

Применяя вероятностный подход, можно рассуждать следующим образом [29].

Допустим, физическая система имеет несколько возможных состояний. Увеличение информации о физической системе эквивалентно фиксированию этой системы в одном определенном состоянии, что приведет к уменьшению энтропии системы, т.е.  $I + S = \text{const}$ . Чем больше известно о системе, тем меньше ее энтропия. При утрате информации о системе возрастает энтропия этой системы. Увеличивать информацию о системе можно, лишь увеличивая количество энтропии в среде вне системы, причем всегда  $\Delta S_e > 0$ .

В соответствии со вторым началом термодинамики энтропия замкнутой системы не может убывать со временем. Получается, что в замкнутой системе (например, в тексте) увеличение энтропии может означать только «забывание» информации, так что сохраняется соотношение  $I + S = \text{const}$ . При этом возникновение новой информации возможно только в открытой системе, где параметры порядка становятся динамическими переменными.

### 1.2.3. Динамическая теория информации

Критика статистической теории информации и динамические представления об информации обобщены в трудах В. И.Корого-дина [29], Д.С.Чернавского [58], И.В.Мелик-Гайказян [38].

Вернемся к определению, предложенному Г.Кастлером [26]: *информация есть случайный и запомненный выбор одного варианта из нескольких возможных и равноправных*. Именно это определение, полагает Д.С.Чернавский [58], позволяет понять такие явления, как возникно-

вание Жизни и механизмы мышления, с естественно-научной точки зрения; кроме того, оно допускает введение меры — количества информации по Шеннону.

Как упоминалось ранее, определение количества информации было предложено раньше, чем определение самой информации. Это было полезно для решения ряда практических задач, но в дальнейшем подмена понятий часто приводила к недоразумениям.

В связи с представлением о количестве информации существуют еще два близких по смыслу понятия. Термин «информационная емкость» применяется по отношению к физическим системам, способным хранить информацию. Вторым термин, близкий первому по смыслу, — «емкость информационной тары» — предложен В.И.Корогодиным [29] и связан с мощностью множества, из которого выбираются варианты. В роли «информационной тары» выступают носители информации — языки, алфавиты, способы фиксации. Для фиксации одного и того же количества информации с помощью разных носителей емкость информационной тары должна быть одной и той же. Процессы генерации, рецепции и обработки ценной информации сопровождаются «переливанием» информации из одной «тары» в другую. При этом, как правило, количество информации уменьшается, но количество ценной информации сохраняется.

### Основные свойства информации.

Свойства информации и их взаимосвязи наиболее полно рассмотрены В.И.Корогодиным [29], И.В.Мелик-Гайказян [38] и Д.С.Чернавским [58].

Свойства, присущие всем видам информации, разделяются на две крупные группы, внутри каждой из которых свойства тесно связаны между собой. Для одной группы ключевым свойством является фиксируемость информации (рис. 1.2, А), а для другой — ее действительность (рис. 1.2, Б). Остальные свойства, входящие в эти группы, можно расценивать как раскрытие, проявление ключевых особенностей в формах, доступных для регистрации.



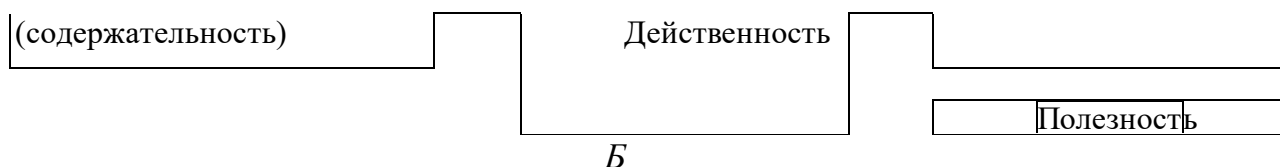


Рис. 1.2. Классификация двух групп (А, В) свойств информации (по [29, 38])

**Фиксируемость информации.** *Фиксируемость* — это свойство, благодаря которому любая информация, не будучи ни материей, ни энергией, может существовать не в свободном виде, а только в зафиксированном состоянии — в виде записи на каком-либо физическом носителе. Способы записи информации на таком носителе всегда условны, т.е. не имеют никакого отношения к ее семантике.

Условность способов фиксации информации означает, что любой из таких способов, никак не связанных с семантикой, тем не менее однозначно обуславливается двумя факторами, тоже не имеющими отношения к семантике, — физической природой носителя и спецификой считывающего устройства той информационной системы, к которой относится данная информация. Фиксация информации всегда представляет собой деформацию (в той или иной степени) носителя, среднее время релаксации которого должно быть больше среднего времени считывания, что ограничивает способы записи информации на том или ином носителе.

В группу, «возглавляемую» свойством фиксации, входят также такие свойства, как инвариантность, бренность, изменчивость, транслируемость, размножаемость и мультипликативность информации.

**Инвариантность** информации по отношению к физической природе ее носителей раскрывается как возможность фиксации информации (записи) на любом языке, любым алфавитом. Ни количество, ни семантика информации не зависят от избранной системы записи или от природы носителя. Инвариантностью определяется возможность осуществлять разные элементарные информационные акты создания, приема, передачи, хранения и использования информации. Отсюда следует, что именно свойство инвариантности лежит в основе возможности расшифровки генетического кода (см. 4.3).

**Бренность** обусловлена тем, что информация всегда зафиксирована на каком-либо физическом носителе. Поэтому сохранность и само существование информации определяется судьбой ее носителя. Свойство бренности позволяет говорить о сроке жизни информации, который зависит от состояния ее носителя. Рано или поздно носитель деформируется и информация исчезает.

**Изменчивость** — свойство информации, ассоциируемое с ее бренностью, другими словами, с сохранностью ее носителя. Исчезновение информации может происходить не только из-за ее разрушения, но и вследствие ее изменения при деформации носителя. Под изменчивостью можно понимать такие преобразования, которые затрагивают количество и (или) семантику информации, но не лишают ее смысла.

**Транслируемость** — свойство, противостоящее бренности информации. Это возможность передачи информации с одного носителя на другой, т.е. размножение информации.

Пусть  $V_p$  — средняя скорость размножения информации в результате трансляции, а  $K_r$  — средняя скорость ее гибели. Тогда жизнеспособность информации ( $L$ ) определяется отношением  $V_p/V_r$ . Если  $L > 1$ , число копий записи будет возрастать. При  $L < 1$  данная информация обречена на вымирание, а при  $L = 1$  состояние нестабильно.

Очевидно, ситуация при  $L > 1$  отвечает проявлению свойства **размножаемости** — прямого следствия транслируемости. В свою очередь, следствием размножения является **мультипликативность**, т. е. возможность одновременного существования одной и той же информации в виде идентичных копий на одинаковых или разных носителях.

**Действенность информации.** Вторая группа свойств информации объединяется ключевым свойством — **действенностью**. Это свойство выявляется следующим образом: будучи включенной в свою информационную систему, информация может быть использована для построения того или иного оператора, который может совершать определенные целенаправленные действия. Оператор, таким образом, выступает в роли посредника, необходимого для проявления действенности информации. Нужно отметить, что реализацию информации в оператор нельзя понимать как «материализацию» информации.

**Семантика (или содержательность)** информации проявляется в специфике кодируемой информацией оператора, причем каждая данная информация однозначно определяет оператор, для построения которого она использована. Однако природа целенаправленного действия такова, что должна повышаться вероятность воспроизведения информации, кодирующей такое действие. Следовательно, семантика информации всегда отражает условия, необходимые и достаточные для ее воспроизведения. Эволюция семантики направлена в сторону улучшения условий воспроизведения информации.

**Полипотентность** информации проявляется в том, что оператор, закодированный данной информацией, может быть использован для осуществления различных действий (т.е. для достижения разных целей). Это свойство не означает семантической не-

однородности информации — семантика любой информации всегда однозначно отображается в операторе. Полипотентность не означает также, что на основании одной и той же информации могут быть созданы несколько разных операторов.

Из свойства полипотентности следуют два вывода. (1) Располагая некоторой информацией или созданным на ее основе оператором, невозможно перечислить все ситуации и цели, для достижения которых с той или иной степенью вероятности они могут оказаться пригодными (бесконечное множество комбинаций «ситуация — цель»). (2) Для достижения одной и той же цели в некоторой ситуации с тем или иным эффектом может быть использовано множество разных информации и основанных на них операторов.

**Полезность** информации предполагает, что она кому-нибудь нужна, может быть с пользой применена для некоторых целенаправленных действий. На основании свойства полипотентности можно утверждать, что полезной может оказаться любая информация. Это делает оправданным запасание информации «впрок». Таким свойством (памятью) обладают организмы с достаточно высокой организацией. Полезность — «потенциальное» свойство, поскольку речь идет о содействии событию, которое еще не произошло.

**Истинность** информации — свойство, которое выявляется в ходе реализации полезности. Критерий истинности — практика. Из свойства полипотентности информации следует относительность ее истинности, т.е. зависимость от ситуации и цели. В том случае, когда целью является трансляция информации (что представляет собой достаточно общий случай), истинность оказывается условием существования информации. Получается, что жизнеспособна только истинная информация. Понятно, что выявление истинности возможно только в том случае, если информация кому-то полезна. А это значит, что для жизнеспособности информации необходимо сочетание ее истинности и полезности, т.е. «гармония объективного и субъективного аспектов информации, отражаемых этими терминами» [29].

**Ценность информации.** В математической теории связи не существует вопроса о возникновении ценной информации и ее эволюции. В современной динамической теории информации это одно из центральных понятий. При этом имеется в виду, что цель задана извне; вопрос о спонтанном возникновении цели внутри самой системы не ставится.

В основе понятия «*ценность*» лежат такие свойства информации, как действенность и полипотентность, а также способ исчисления ценности через приращение вероятности достижения той *цели*, для которой данная информация используется [29]. «Бездейственная» информация обречена на разрушение и гибель. Как уже говорилось, полипотентность ин-



формации соответствует тому, что оператор, являющийся продуктом реализации семантики информации, может быть использован для осуществления самых разных целенаправленных действий. Целенаправленное действие специфично для живых организмов (см. 3.3.4). Имеется в виду переход от «исходной ситуации» к некоторому «заданному» событию (осуществление этого события как «цели» действия) посредством оператора — механизма, применение которого в имеющихся условиях приводит к требуемому результату. Таким образом, целенаправленные действия отличаются от спонтанных изменений только в одном отношении — наличием оператора.

Ценность информации ( $C$ ) можно выразить через отношение  $(P - p)/(1 - p)$ , где  $P$  — вероятность осуществления события цели в данном пространстве режимов при использовании данной информации,  $p$  — вероятность спонтанного (до получения данной информации) осуществления того же события;  $P$  и  $p$  могут изменяться от 0 до 1.

Ценность информации зависит от априорной вероятности достижения цели до получения информации, т. е. от того, какой предварительной информацией уже располагает получатель.

Д.С.Чернавский [58] подчеркивает, что невольное отождествление «просто информации» с ценной и (или) осмысленной приводит к недоразумениям.

### **Генерация и рецепция информации**

*Генерация информации* — это выбор варианта (см. определение информации по Кастлеру), сделанный случайно (без подсказки извне) из многих возможных и равноправных (т.е. из принадлежащих одному множеству) вариантов. Если речь идет о возникновении новой информации, то выбор должен быть именно случайным. Если выбор подсказан на основе уже имеющейся информации, то речь идет о восприятии, рецепции информации. «Запоминаемость» (по Кастлеру) ассоциируется с рецепцией информации.

В работах Н.Винера и К.Шеннона процессам рецепции информации практически не уделялось внимания. От рецептора (получателя) требовалась лишь способность отличать один кодовый символ от другого.

С позиций теории динамических систем *рецепция информации* означает перевод системы в одно определенное состояние независимо от того, в каком состоянии она находилась раньше. В современных технических устройствах рецепция, как правило, осуществляется с помощью электрического или светового импульса. Во всех случаях энергия импульса должна быть больше барьера между состояниями. Переключение за счет сторонних сил называется силовым. Другой способ переключения — параметрический. Он за-

ключается в том, что на некоторое (конечное) время параметры системы изменяются настолько, что она становится моностабильной, т.е. одно из состояний становится неустойчивым, а затем исчезает. Система независимо от того, в каком состоянии она находится, попадает в оставшееся устойчивое состояние. После этого возвращаются прежние значения параметров, система становится мультистабильной, но остается в том состоянии, в которое она была переведена.

Силовое и параметрическое переключения представляют собой рецепцию информации. Различаются лишь механизмы переключения, т.е. рецепции информации. В электронике предпочтение отдается силовому переключению. В биологических системах преимущественно используется параметрическое переключение, которое может быть достигнуто неспецифическими факторами — изменением температуры, pH и др. [58].

В случаях как генерации, так и рецепции способность генерировать или воспринимать зависит от информации, которую уже содержит рецептор или генератор.

### **Критика термодинамических представлений в теории информации**

Начиная с классических работ по теории информации установилась традиция связывать информацию с термодинамической величиной — энтропией (см. 1.2.2). Критика представлений об информации как негэнтропии содержится в трудах Д. С. Чернявского [58], который обращает внимание на необходимость разграничения понятий *макроинформация* и *микроинформация*.

Согласно определению информации по Кастлеру [26], информация есть запомненный выбор, т.е. макроинформация. На физическом языке «запомнить», т.е. зафиксировать информацию, означает привести систему в определенное устойчивое состояние. Таких состояний должно быть не менее двух. Каждое из них должно быть устойчивым, иначе система может самопроизвольно выйти из того или иного состояния, что равносильно исчезновению информации. Простейшая запоминающая система содержит всего два устойчивых состояния и называется *триггер*. Этот элемент играет важную роль во всех информационных системах.

Свойством запоминания могут обладать только макроскопические системы, состоящие из многих атомов. Невозможно что-либо запомнить, располагая одним атомом, поскольку атом может находиться лишь в одном (устойчивом) состоянии, то же относится и к простым молекулам. Наименьшая по своим размерам самая простая система, которая может запомнить только один вариант из двух возможных, — это молекула, способная находиться в двух различных изомерных состояниях, — при условии, что спонтанный переход из одной формы в

другую происходит так редко, что его вероятностью практически можно пренебречь. Примером таких молекул могут служить оптические изомеры, обладающие «правой» и «левой» хиральностью; они различаются по способности содержащих их растворов вращать вправо или влево плоскость поляризации света, пропускаемого через растворы. К таким оптическим изомерам относятся сахара и аминокислоты, содержащие 10 — 20 атомов. Молекулярными триггерами могут служить макромолекулы (в частности, белковые молекулы), способные существовать в нескольких (по крайней мере, двух) конформационных состояниях.

Биологические системы высокого иерархического уровня (клетка, мозг, организм, популяция) тоже, разумеется, могут быть запоминающими. При этом механизм запоминания не всегда сводится к генетическому (т.е. макромолекулярному). Например, клетка (в частности нервная), способная функционировать в двух и более устойчивых состояниях, уже является запоминающим устройством.

Важную роль играет и время запоминания. В устойчивых динамических системах оно, с формальной точки зрения, бесконечно. Триггерное переключение одного состояния на другое возможно лишь за счет стороннего сигнала, что равносильно рецепции информации (см. выше). В реальности возможно спонтанное переключение за счет случайных флуктуации. Итак, макроинформация может содержаться только в макрообъектах. Граница между макро- и микрообъектами проходит на уровне макромолекул, размеры которых имеют порядок нанометров ( $10^9$ - $10^7$ ).

Что касается *микроинформации*, то она не обязательно ассоциируется с микрочастицами. Любая незапоминаемая информация — это микроинформация. В реальной жизни речь всегда идет о макроинформации, которая в частности подразумевается, когда мы говорим об информации в живых системах. Любое изменение макроинформации, увеличение или уменьшение, сопровождается ростом энтропии, что естественно, поскольку эти процессы необратимы. Количественной связи между изменениями макроинформации и физической энтропии не существует.

### **1.3. ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ НАУК**

На ранней стадии развития (начало XX в.) наука об информации была связана, прежде всего, с распространением научных знаний, потребностью упорядочивать, классифицировать быстро нарастающие потоки научной литературы. Первым трудом в этой области считается «Универсальная библиографическая классификация. Трактат о документации» П.Отле, опубликованный в 1905 г. в Брюсселе.

Техническая революция (конец 30-х—начало 40-х гг. XX в.) сопровождалась появ-

лением специальных журналов по научной информации, выходящих и в наши дни. В названиях некоторых из них до сих пор по традиции сохраняются термины «документация» или «документалистика». Такое название наука об информации имела в ряде западноевропейских языков примерно до начала 1960-х гг. Сейчас документалистика — дисциплина, изучающая лишь документальные формы коммуникации.

В 50-е гг. XX в. появились компьютеры — электронно-вычислительные устройства, выполняющие операции хранения и преобразования информации. Принципиально важная веха — опубликование в 1948 г. книги Норберта Винера «Кибернетика или управление и связь в животном и машине» и статьи Клода Шеннона «Математическая теория связи». В том же году Королевское общество Великобритании провело первую Международную конференцию по научной информации. Именно эти годы считаются временем рождения *информатики*, изучающей все аспекты возникновения, получения, хранения, преобразования, передачи, использования информации. В англоязычном мире новая наука получила название *вычислительная наука* (computer science), а во франкоязычных странах — *информатика* (informatique; от франц. information — информация и automatique — автоматика).

В 1949 г. состоялась Международная конференция по научному реферированию, организованная ЮНЕСКО. В 1952 г. в системе Академии наук СССР был создан Институт научной информации, преобразованный в 1955 г. во Всесоюзный (теперь Всероссийский) институт научной и технической информации (ВИНИТИ).

Середина 1960-х гг. может считаться новым этапом в развитии науки об информации. В качестве названия этого научного направления был предложен термин «информационная наука» («информатика»): information science, informatics (англ.); science de reformation, informatique (фр.); Informationwissenschaft, Informatik (нем.). Именно термин «информатика» прочно вошел в употребление с 1970-х гг. Он появился в названиях многих профессиональных ассоциаций и специальных журналов. Однословный термин более удобен, но имеет более узкий смысл по сравнению с названием «информационные науки» (см. ниже). Параллельно с выделением и становлением информационной науки как новой дисциплины расширялось внедрение компьютеров во все сферы интеллектуальной деятельности. Это требовало решения проблем, связанных с их использованием. Возникла специальная научная дисциплина, получившая в США название «вычислительная наука», т.е. наука о вычислительных машинах (computer science, computing science), во Франции — «informatique» (1962), в Германии — Informatik (1968). Таким образом, название совпадает с русским термином «информатика». Совпадение названий, порождающее недоразумения, означает, что толкования этих терминов

разноречивы. В нашей стране термин «информатика» прижился не сразу. Сначала под информатикой в СССР понимали область применения информации в системах управления, получившую название «кибернетика».

А.П.Ершов в 1986 г. говорил об информатике как о «фундаментальной естественной науке, изучающей процессы передачи и обработки информации». Информатика — наука об информационных моделях, отражающих фундаментальное философское понятие «информация» [21].

В 1998 г. Д.А.Поспелов [47] писал следующее: «С начала 80-х [в нашей стране] содержание того, что скрывается за термином «информатика», ближе всего к тому, что понимают французы, когда говорят о науке, носящей название *informatique*. До этого совокупность научных направлений, называемых теперь информатикой, именовалась по-разному. Сначала объединяющим названием был термин "кибернетика", затем на роль общего названия той же области исследований стала претендовать "прикладная математика"».

Во избежание терминологических трудностей будет разумным прислушаться к предложению американского ученого Фрица Махлупа [74] использовать множественное число: «информационные науки», имея в виду большую группу научных направлений. Тогда информационные науки встают в один ряд с другими обширными семействами дисциплин и областей, объединяемых по предмету исследования, — естественными науками, социальными науками.

Ф. Махлуп опубликовал в 1983 г. подборку встречающихся в литературе названий предметных областей, которые связаны с информацией [74]. В перечень вошли более 30 областей исследования, в том числе: информационная наука, информатика, теория информации, вычислительная наука, вычислительная техника, общая теория систем, системный анализ, теория управления, кибернетика, робототехника, теория автоматов, исследование операций, теория статистических решений, теория игр, распознавание образов, исследование искусственного интеллекта, теория коммуникации, библиометрия, наукометрия, библиотекосведение, лингвистика, психолингвистика, семантика, семиотика, фонетика, наука о речи, лексикология, когнитивные науки, коммуникационные науки, исследования телекоммуникации, исследование живых систем, нейрофизиология, исследование мозга, психобиология, когнитивная нейронаука, исследование генетической информации. Ф.Махлуп рассматривает информационную науку как метанауку, «огромный плавильный котел», который на ранних этапах включал, среди прочих, биологические науки (изучение обработки

информации в живых системах), поведенческие науки (изучение когнитивных процессов), социальные науки. У информационных наук общий объект изучения — информация. В то же время специалисты, работающие в различных информационных науках, толкуют понятие «информация» по-своему (см. 1.1).

#### 1.4. ИНФОРМАТИКА

Как уже говорилось (см. 1.3), термин «информатика» до сих пор часто понимается как синоним названий «информационная наука» и «вычислительная наука» (фр. l'information + automatique = = informatique). Между тем русскоязычное название «информатика» следует считать более близким к англоязычному «informatics», отстраненному по своему содержанию от термина «компьютерные науки». На это может указывать, в частности, то обстоятельство, что в действующей в России «Номенклатуре специальностей научных работников» (согласно которой присуждаются ученые степени) соответствующая группа специальностей обозначена не просто «Информатика», а «Информатика, вычислительная техника и управление». Следовательно, когда речь идет о научной специальности, информатика не поглощает вычислительные и кибернетические направления.

Согласно определению Р.С. Гиляревского [14], *информатика* — это научная дисциплина, предмет исследования которой составляют структура, свойства и закономерности семантической информации, процессы ее сбора, переработки, хранения, поиска и распространения (передачи), а также особенности использования информации различными категориями потребителей. Один из главных объектов информатики — система научной коммуникации, от которой в значительной степени зависят темпы развития науки и техники, а также эффективность всей системы интеллектуальной (информационной) коммуникации в обществе. Информатика изучает предметы и явления, присущие лишь человеческому обществу, и следовательно, является общественной дисциплиной [14]. Такая формулировка четко устанавливает предметную область, «гносеологическую нишу» информатики, отделяя ее от вычислительных наук (математических и технических дисциплин) и естественно-научных информационных направлений.

Говоря о предмете информатики, нужно специально обратить внимание (в связи с многозначностью понятия «информация» — см. 1.1), что эта дисциплина занимается исключительно семантической (т.е. смысловой) информацией. Семантическая информация отличается от вероятностной (шенноновской — см. 1.2.1) информации, которая сосредоточена на знаковом представлении и отстранена от смысла информации. Семантическая информация выражена на естественном языке, ее смысл доступен для логического восприя-

тия. Она является социальной, т.е. циркулирует в обществе. Информатика находит общие закономерности семантической информации, не зависящие от конкретных отраслей ее получения и/или использования, и разрабатывает методы алгоритмического решения типовых информационных задач [14].

Особенно видную роль играет такой вид семантической информации, как *научная информация*; именно в ней все больше и больше заинтересовано общество. Итак, информатика — это междисциплинарная информационная наука, в центре внимания которой находятся семиотические (знаковые) и семантические (смысловые) аспекты информации; информатика складывается из фундаментального и прикладного направлений. Информатику не следует отождествлять с вычислительной наукой.

**Информация и данные.** В нашем контексте очень важно проводимое информатикой четкое разграничение между *семантической информацией* и *данными*. Данные — это факты и идеи, представленные в формализованном виде, позволяющем передавать или перерабатывать их при помощи некоторого процесса и соответствующих технических средств; обычно они записаны на носителях. Информация — это смысл, который человек (или другая живая система) приписывает данным на основании известных ему правил их представления. Примером данных может служить письменное сообщение: грамотному человеку оно передает сведения, а для неграмотного (или не владеющего языком сообщения) остается набором непонятных знаков. Таким образом, информация — это потенциальное свойство данных, которое может быть реализовано одним воспринимающим субъектом, но не другим. Объектом обработки машиной являются данные, а не информация; никакая машина не в состоянии интерпретировать данные (преобразовывать их в информацию), поскольку машина не обладает, в отличие от живой системы, запасом знаний о мире и не может мыслить, как человек. Однако нужно учитывать, что в обиходе слово «информация» часто употребляется вместо слова «данные» как *метафора* — в переносном смысле. Например говорят: «Компьютер обрабатывает информацию»; на самом деле здесь речь может идти только об обработке *данных*.

**Информационная система.** Информация хранится в архивах, библиотеках, карточках, в виде подшивок документов, наборов статистических данных. Скопление, хранилище информации как таковое — еще не информационная система.

*Информационная система* (ИС) — это хранилище информации, снабженное средствами ввода, поиска, размещения и выдачи информации. Информационная система предназначена для сбора, хранения, обработки и поиска информации, необходимой для систе-

мы управления предприятием или любой другой организацией, системы проектирования, учебного процесса и т.д., для удовлетворения потребностей индивидуального потребителя информации. Введение в практику понятия «информационная система» неразрывно связано с развитием механизации и автоматизации хранения и поиска информации. Поэтому данное понятие неотделимо от понятий «автоматизированная информационная система» и «информационно-поисковая система» (см. гл. 2).

Информатика формирует теоретические основы и методы *научно-информационной деятельности* — самостоятельного вида научного труда, о котором мы будем говорить в гл. 2 (уделяя внимание прежде всего информации в области биологии и медицины).

### 1.5. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ НАУКИ

Английское слово «compute», от которого было образовано название вычислительной машины — компьютера, означает то же, что латинское «computare»: определять посредством вычисления, подсчитывать, считать. Вычислительное устройство, позже названное компьютером, было предназначено для манипуляции числами через средство манипуляции символами. Ч.Бэббедж, который изобрел вычислительную машину еще в 1833 г., назвал ее «аналитическим устройством». Названия «компьютер», «ЭВМ» остались и после развития нечисловых задач. Понятие «вычислять» получило расширенное значение. Если мы говорим, что умственные процессы — это вычислительные процессы, то не имеем в виду, что мозг перерабатывает только числа. Под вычислением в данном случае подразумевается то, что мозг и компьютер оперируют символами.

Как отмечалось ранее, название «вычислительная наука» (предпочтительнее множественное число — «вычислительные науки») не следует считать синонимом названий «информационная наука» или «информатика». Очевидно, недоразумение идет от французского словообразования «rinformation + automatique = = informatique». Вычислительная (компьютерная) наука возникла как дисциплина, задачами которой являются разработка, программирование, функционирование и сопровождение универсального цифрового компьютера, тогда как собственно создание компьютеров — цифровых (имеющих дело с дискретными, т.е. прерывистыми числовыми и нечисловыми множествами) и аналоговых (с непрерывной, нелинейной формой кодирования) — входило в компетенцию электротехники [74].

Таким образом, вычислительные науки включают математические, технологические и технические направления, теоретическую работу (создание концептуальных схем, объясняющих работу ЭВМ) и инновационную (поиск новых компьютерных систем и приклад-



ных программ). Теоретическая и инновационная работа основываются на результатах фундаментальных исследований по физике полупроводников, электронике, на классическом статистическом анализе, математической логике.

В последние годы возрастает удельный вес исследований в области логической переработки информации, что невозможно без обращения к смысловой стороне данных. Это явление стало особенно выраженным с началом разработки компьютеров пятого поколения, которые ориентированы на решение проблем искусственного интеллекта и в которых главная роль отводится не базам данных, а базам знаний. Такая тенденция сближает «вычислительную» информатику с «семантической» информатикой [14].

### **1.6. КИБЕРНЕТИКА**

После первой публикации книги Н.Винера в 1948 г. [11] переработанные версии этого классического труда неоднократно издавались позднее под названием «The human use of human beings. Cybernetics and society». По словам Винера, он не нашел тогда готового термина, чтобы обозначить «расширенную теорию сообщений», вышедшую за рамки прежней теории сообщений (которой он занимался, будучи инженером-электротехником). Эта новая область включала «комплекс идей» о сообщениях как средстве управления машинами и обществом. Н.Винер образовал слово «кибернетика» от греческого слова «кибернетес» — рулевой, кормчий; от того же слова произошли слова — правитель, губернатор. В IV в. до н.э. этот термин применил к сфере управления Платон.

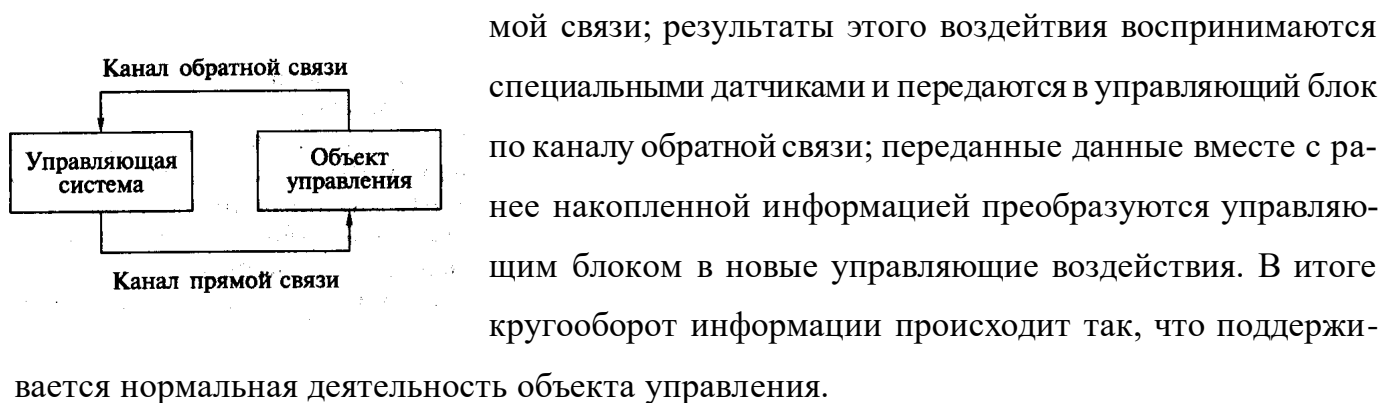
После выхода книги Н.Винера кибернетика быстро завоевала признание. Именно в 1950-е гг. особенно остро встал вопрос о повышении роли управления в стремительно усложняющемся мире. К началу 70-х гг. кибернетика оформилась как самостоятельная наука физико-математического профиля, которая рассматривает аспекты управления в широком спектре сложных систем (природных, технических, общественных). В кибернетике выделились две основные части: наука об аналогиях между живыми и искусственными системами и наука о связи и информации. Труды Н.Винера стимулировали применение теории информации к биологическим явлениям, в частности к процессам, протекающим в центральной нервной системе. Возникло представление о том, что вычислительная машина может считаться наиболее адекватной моделью явлений в нервной системе. Объектом самого пристального внимания кибернетики стал живой организм как управляющая система высокого уровня, различные функции которой ученые и инженеры стремятся воспроизвести в технических устройствах.

Произошло разделение кибернетики на ряд направлений по объекту исследования: техническая кибернетика; биокибернетика (наука об управлении в объектах живой природы);

медицинская кибернетика (создание устройств и систем управления, обеспечивающих эффективные методы и способы лечения). Постепенно научные представления трансформировались. Теперь кибернетика считается разделом информатики, изучающим системы управления.

«Управление предполагает: (а) цель управления; (б) программу управления (программа может предусматривать реакцию на воздействие внешней среды и корректировку управления, т.е. обратную связь); (в) сигналы управления, которые передаются через каналы связи. Таким образом, управление осуществляется посредством связи» [24].

Принципиальная схема действия системы управления представлена на рис. 1.3. Управляющие воздействия поступают от управляющего блока на объект управления по каналу прямой связи;



результаты этого воздействия воспринимаются специальными датчиками и передаются в управляющий блок по каналу обратной связи; переданные данные вместе с ранее накопленной информацией преобразуются управляющим блоком в новые управляющие воздействия. В итоге кругооборот информации происходит так, что поддерживается нормальная деятельность объекта управления.

Рис.1.3. Схема функционирования системы управления

В 1980-е гг. термин «кибернетика» постепенно исчезает из употребления, сохраняясь только в названиях уже сформировавшихся организаций (например, факультет вычислительной математики и кибернетики МГУ). В те же годы направление «кибернетика» перестало употребляться в западных образовательных программах в связи с тем, что стало интерпретироваться как часть общей теории систем и оказалось поглощенным гораздо более широкой программой этой науки. М.А.Арбиб (цит. по [74]) полагает, что «история кибернетики по большей части является также историей когнитивной науки». Сотрудники его группы использовали кибернетику, чтобы обратиться к комплексному изучению человеческого мозга и искусственного интеллекта.

Сейчас термин «кибернетика» используется: (а) как обобщающее обозначение междисциплинарных направлений; (б) как направление теории систем и системного анализа, занимающееся процессами управления, в основном техническими объектами.

## 1.7. КОГНИТИВНЫЕ НАУКИ

Появление когнитивной науки (от лат. *cognoscere* — знать, *cognitio* — знание), или когнитологии, относится к середине XX в. Она осуществляет анализ человеческого разума

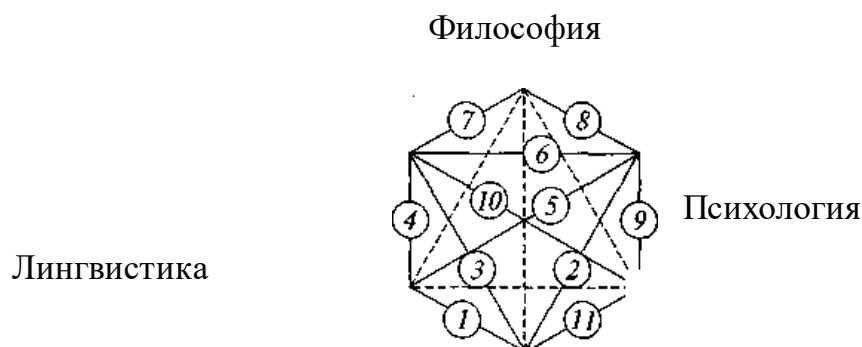
в условиях информационного процесса, исследует «принципы взаимодействия интеллекта с его окружением» [78]. Более поздние определения избегают терминов «разум» (применительно к человеку) и «интеллект» (применительно к компьютеру) и вместо них обращаются к понятиям «умственные способности» и «когнитивные системы» соответственно.

Одно из ключевых слов когнитивных наук — «представление» (representation); имеется в виду представление самого знания, а не представление некоего объекта с помощью знания. Речь идет, в частности, о представлении знания в терминах компьютерных программ, т.е. каким образом знание используется программой [78].

Упрощая, можно сказать, что когнитивная наука изучает познавательные процессы. Она включает аспекты группы дисциплин, среди которых ведущую роль сейчас играют когнитивная психология, искусственный интеллект, философия познания, нейрофизиология и лингвистика. В качестве приоритетных проблем когнитивных наук называют [78] представление знания, перевод с одного языка на другой, распознавание образов, обучение, решение проблем, планирование.

Как собирается, классифицируется, запоминается информация об окружающем? Как эта информация оформляется в виде мыслей и каким образом результирующее представление составляет основу действия? Как действие координируется посредством коммуникации?

Исторические взаимосвязи различных научных направлений в пределах этой метадисциплины показаны на рис. 1.4. Согласно схеме, разработанной Зеноном Пылишином [78], когнитивная наука — это продукт сотрудничества обширного кластера наук, прежде всего шести базовых дисциплин (в большинстве университетов они представлены факультетами): философия, психология, вычислительная наука, нейронауки, антропология и лингвистика. Свой вклад в когнитивную науку вносят еще одиннадцать междисциплин (И сплошных линий на рис. 1.4); каждая из них — плод взаимодействия между двумя базовыми науками. Прерывистыми линиями на схеме показаны междисциплины, не получившие формального признания в качестве специальностей высшего профессионального образования. Такая сеть взаимодействующих дисциплин соответствует когнитивной науке.



## Компьютерные Антропология науки

### Нейронауки

Рис. 1.4. Схема взаимодействия дисциплин, в результате которого образуется когнитивная наука (по [78]):

1 — кибернетика; 2 — нейролингвистика; 3 — нейропсихология; 4 — моделирование когнитивных процессов; 5 — компьютерная лингвистика; 6 — психоллингвистика; 7 — философия психологии; 8 — философия языкознания; 9 — антропологическая лингвистика; 10 — когнитивная антропология; 11 — исследование эволюции мозга

В физиологии, психологии и технике используется понятие «когнитивная система». С позиций техники — это интеллектуальная система, построенная по типу нервной системы человека и пытающаяся имитировать ее возможности в организации сложного поведения при решении интеллектуальных задач.

**Когнитивная психология.** Когнитивная психология (психология мышления, познания) возникла в конце 1950 — начале 1960-х гг. в ответ на распространение бихевиоризма (от англ. *behavior* — поведение) — методологии, утверждавшей, что психология должна быть ограничена изучением только наблюдаемого поведения, в понятиях стимулов и реакций, формирования навыков, интеграции этих навыков и т.д., без обращения к таким терминам, как «сознание», «психические состояния», интроспективно проверяемые «переживания», «образы» и т.п.

Нервная система человека включает когнитивную и аффективную системы. Когнитивная система отвечает за восприятие информации о среде, получаемой через посредство сенсорных рецепторов, за структурирование и хранение этой информации в виде знаний в кратковременной и долговременной памяти, за организацию ментальных (разумных) процессов преобразования информации при решении интеллектуальных задач, связанных с абстрагированием, принятием решений, планированием сложного поведения и т.д. Аффективная система организует действия по реализации выработанных когнитивной системой планов; она управляет всеми эффекторами человеческого организма — мышцами, железами внутренней секреции, органами пищеварения, кровоснабжением органов и тканей и т.д.

Сущностное свойство когнитивных систем — способность к адаптации. При этом для адаптируемости возможны три временные шкалы: 1) короткая шкала, когда система

меняет свое поведение в ходе решения каждой встречаемой проблемной ситуации; 2) более длинная, когда система научается, т.е. адаптируется на более длительный срок, так что адаптация действенна при вновь возникающей ситуации; 3) самая длинная шкала, когда интеллектуальная система «развивается», причем эволюция может быть биологической, социальной, либо той и другой.

**Модели творческой деятельности.** Следует остановиться на психологических моделях (гипотезах) творческой деятельности человека [46] — это важно с точки зрения науки об искусственном интеллекте (см. 1.9).

Одна из моделей творческой деятельности называется *лабиринтной*. Согласно этой гипотезе, путь от исходных данных к решению задачи лежит через лабиринт возможных вариантов. Решение задачи сводится к целенаправленному перебору альтернативных путей в лабиринте с оценкой успеха после каждого шага. Однако для некоторых задач лабиринтный путь либо не существует, либо возможных способов решения слишком много. Например при игре в шахматы лабиринт возможностей (т.е. число мыслимых партий игры) настолько велик, что сознательный целенаправленный перебор вариантов невозможен в течение приемлемого времени. Поэтому современные шахматные программы используют не только эту процедуру, но и метапроцедуры, связанные с другими моделями мышления.

Основу другой модели — *ассоциативной модели мышления* — составляет метапроцедура ассоциативного поиска и ассоциативного рассуждения. Предполагается, что решение неизвестной задачи основывается на уже решенных задачах, чем-либо с ней сходных, так что способ ее решения должен быть близок к тому, который ранее помог решить подобную задачу. Ассоциативный поиск — это попытка найти в памяти ранее встречавшуюся ситуацию, похожую на условия новой задачи. При этом понятие «ассоциация» в психологии шире, чем просто понятие «сходство». Ассоциативные связи могут возникать и по контрасту (противопоставление одного другому), и по смежности (если некоторые явления возникали в рамках одной и той же ситуации либо происходили одновременно или с небольшим сдвигом по времени). Метапроцедура ассоциативного поиска и рассуждения помогла создать эффективные программы в распознавании образов (см. 1.10), в классификационных задачах и в обучении компьютеров. Однако несмотря на длительное исследование ассоциативной модели, не удалось создать стройную теорию ассоциативного поиска и ассоциативного рассуждения. Исключение составляет важный, но (с точки зрения психологии, а не нейрофизиологии — см. 3.6.9.) частный класс ассоциаций — условные рефлексy.

Еще одна модель мышления, называемая *модельной гипотезой*, опирается на идею внутреннего представления проблемной области, на знание о ее особенностях, закономерностях, процедурах действия. Согласно модельной гипотезе, мозг человека содержит модель проблемной ситуации, в которой ему надо принять решение. В модельной гипотезе основными метапроцедурами становятся представление знаний, рассуждения, поиск релевантной (связанной с данной ситуаци-

ей) информации, пополнение и корректировка имеющихся знаний. Именно эти метапроцедуры составляют ядро интеллектуальных возможностей современных программ и программных систем, ориентированных на решение творческих задач. В совокупности с метапроцедурами целенаправленного поиска в лабиринте возможностей, ассоциативного поиска и рассуждения они образуют арсенал интеллектуальных средств современных интеллектуальных систем, которые часто называются системами, основанными на знаниях [46].

Профессиональную задачу так называемых инженеров по знаниям (когнитологов) составляет проведение управляемой аргументированной дискуссии групп экспертов с целью извлечения знаний в конкретной предметной области.

## 1.8. СИСТЕМЫ

Понятие «система» — трудно определяемое и постигается в существенной мере на уровне интуиции, однако оно очень важно как в информационных, так и в биологических науках. Не случайно в группе информационных дисциплин «Номенклатуры специальностей научных работников» единственной специальностью, по которой в России возможно присуждение ученой степени в области биологии или медицины, является именно системный анализ (05.00.01): вследствие многообразия и сложности взаимосвязей в организации живых организмов для их эффективного изучения требуется некоторая общая стратегия, такая как системный анализ (или теория систем).

В переводе с греческого слово «система» («состав») означает составное, соединенное из частей. Понятие используется, когда нужно охарактеризовать объект как нечто целое (единое), сложное, о чем невозможно дать сразу полное представление, изобразив его графически или описав математическим выражением [13]. Это понятие из категорий теории познания, теории отражения.

Одним из важнейших основоположников концепции системы и теории систем стал в 1930-е гг. Л. фон Берталанфи, биолог по основной профессии. По Берталанфи [6], система — это «комплекс взаимодействующих компонентов» или «совокупность элементов, находящихся в определенных отношениях друг с другом и средой». В первые годы становления теории систем широко использовался термин «системный подход», который означал методологическое направление философии, а также применялся как синоним понятия «комплексный подход». По мнению ряда авторов [74], теория систем вышла из теории управления Н.Винера.

Определения изменялись по мере развития теории систем и практического применения понятия. В первых определениях основное внимание уделялось тому, что система — это элементы (части, компоненты) и связи между ними. При этом система — не простая

совокупность элементов и связей того или иного вида, а включающая только те элементы и связи, которые находятся в области пересечения друг с другом. Термины «компоненты» — «элементы», «связи» — «отношения» обычно употребляются как синонимы (особенно в переводах определений). Но строго говоря, «компонент» — более общее понятие, чем «элемент», оно может означать совокупность элементов. Понятие «связь» определяют как ограничение степени свободы элементов. Иногда связь рассматривается как частный случай отношения, иногда — наоборот.

Эволюция определения понятия «система» шла по следующему пути: элементы и связи —> цели -> наблюдатель -> язык наблюдателя. Необходимо учитывать взаимодействия между изучаемой системой и исследователем. Система есть отображение на языке наблюдателя (исследователя, конструктора) объектов, отношений и их свойств в решении задач исследования, познания [13].

В 1970-е гг. был введен термин «системные исследования», который объединяет прикладные научные направления, связанные с исследованием и проектированием сложных систем: исследование операций, кибернетика, системотехника, системология и другие направления, **опирающиеся на теорию систем.**

### **1.8.1. Классификации систем**

Системы классифицируются по различным признакам: по виду отображаемых объектов (биологические, технические, экономические и т.д.); по виду научного направления, используемого для их моделирования (математические, химические, физические и др.); по уровням сложности; по степени и характеру организованности; открытые и закрытые и т.д.

**Сложные системы и большие системы.** Большие системы (по размерам, по количеству элементов) и сложные системы (по сложности связей, алгоритмов поведения) — это разные классы систем. Понятие «большая» связывается с величиной системы, а понятие «сложная» — со сложностью отношений, алгоритмов или сложностью поведения.

*Большая система* состоит из априорно выделенных подсистем, и исследовать ее невозможно иначе, как по подсистемам. Вместе с тем, объект (систему) можно описать на одном языке, т.е. с помощью единого метода моделирования, хотя и по частям, по подсистемам; для изучения объекта (исследования, проектирования) достаточно одного наблюдателя (не по их числу, а по однородности их специализации и квалификации, например, инженера).

*Сложная система* строится для решения многоцелевой, многоаспектной задачи; отражает объект с разных сторон в нескольких моделях, каждая из которых имеет свой язык,

так что для их согласования нужен особый «метаязык»; включает не подлежащие сравнению аспекты; имеет сложную, составную цель или даже разные цели; в одной системе одновременно присутствуют многие разнородные структуры (например, технологическая, административная, функциональная, коммуникационная и др.); для изучения сложной системы необходимо несколько наблюдателей принципиально разной квалификации.

Более строгое определение сложной системы опирается на понятие алгебраической сложности. В определенных пределах систему можно описать как строку, или последовательность данных. Если задана строка данных, то должна существовать компьютерная программа и множество начальных данных, по которым эта программа может вычислить всю строку данных. Минимальная длина программы и множества начальных данных и служит мерой алгебраической степени сложности.

**Открытые и закрытые системы.** Л.Берталанфи ввел два понятия, составляющих пару: «открытая система» и «закрытая система» [6]. Основная отличительная характеристика открытой системы — способность обмениваться со средой массой, энергией и информацией. Одна из наиболее интересных особенностей состоит в том, что в открытых системах проявляются «парадоксальные» термодинамические закономерности, которые противоречат второму началу термодинамики.

Второй закон термодинамики, сформулированный для закрытых систем, характеризует систему ростом энтропии, стремлением к неупорядоченности, разрушению. Этот закон проявляется и в открытых системах (например старение биологических систем). Однако в открытых системах, в отличие от закрытых, возможен «ввод энтропии», ее снижение. «Подобные системы могут сохранять свой высокий уровень и даже развиваться в сторону увеличения порядка сложности» [6], т.е. в них проявляется закономерность самоорганизации (хотя Берталанфи об этом еще не говорил). Именно поэтому для системы управления так важен обмен информацией со средой. Одно из принципиальных отличий открытых систем от закрытых в том, что закрытые системы оперируют понятием «цель» как внешним по отношению к системе, а в открытых, развивающихся системах цели не задаются извне, а формируются внутри системы на основе соответствующих закономерностей целеобразования.

Предполагается, что закрытые (замкнутые) системы полностью изолированы от среды (с точностью до чувствительности модели). Однако представление о полной изоляции системы условно, поскольку все явления и процессы в природе и обществе взаимосвязаны. (Здесь мы встречаемся с примером того, что многие физические законы, в отличие от био-



логических, справедливы лишь для условных моделей.)

### **1.8.2. Системный анализ .**

В конце 1980-х гг. в учебные планы вузов страны был введен предмет *системный анализ*: приложение системных концепций к функциям управления, связанным с планированием. Как уже упоминалось выше, по специальности «Системный анализ» возможно присуждение ученой степени в области биологических и медицинских наук.

Характеристика этого направления такова [13]. 1. Системный анализ применяется, когда задача (проблема) не может быть сразу представлена и решена с помощью формальных, математических методов, т. е. когда имеют место большая начальная неопределенность проблемной ситуации и многокритериальность задачи. 2. Системный анализ уделяет внимание процессу постановки задачи, используя не только формальные методы, но и качественный анализ. 3. Системный анализ опирается на основные понятия теории систем и на философские концепции, лежащие в основе исследования общесистемных закономерностей. 4. Системный анализ объединяет специалистов разных областей знания, помогая коллективному принятию решения. 5. Для исследования и принятия решения требуется разработка методики системного анализа, определяющей последовательность этапов проведения анализа и методы их выполнения. 6. Системный анализ изучает процессы целеобразования (не смешивая цели со средствами, учитывая изменение целей со временем) и разработки средств работы с целями (в том числе разработку методик структуризации целей). 7. Основной метод системного анализа состоит в расчленении большой неопределенности на более обозримые части, лучше поддающиеся исследованию (что и соответствует понятию «анализ»), при сохранении целостного (системного) представления об объекте исследования и проблемной ситуации (благодаря понятиям «цель» и «целеобразование»). Особенности 1—4 свойственны всем направлениям системных исследований, а особенности 5—7 уточняют отличия системного анализа от других системных направлений. В деятельности специалиста по системному анализу (системного аналитика) можно выделить три основных этапа: всестороннее изучение проблемы с выделением ее составных частей и их формализацией; поиск пути решения проблемы (в том числе с помощью математических методов); реализация полученных результатов на практике (в идеале — без возникновения новых проблем).

### **1.8.3. Мультиагентные системы**

Мультиагентными называются системы, предназначенные для организации взаимодействия с разнородными источниками информации [13]. Такие системы появились в ре-

зультате интенсивного развития гетерогенных сетей (сетей, построенных на основе использования неоднородных вычислительных, коммуникационных, информационных ресурсов и технологий). Мультиагентные системы применяются в целях ускорения сбора и обработки информации.

*Агент* — это вычислительная система, которая реализуется на основе концепций, наиболее применимых к человеку. На практике — это вычислительная система с набором свойств, в совокупности обеспечивающих относительно интеллектуальное поведение. Основные характеристики агентов: реактивность, активность, коммуникативность, автономность, рассудительность, обучаемость.

*Реактивность* — способность агента к выполнению определенных действий при поддержке его взаимодействия с окружающей средой (окружением, внешним миром). В зависимости от характера соответствующих процессов возможны 3 варианта сопряжения действий агента со средой: жесткая схема сопряжения действий по заготовленному плану, гибкая схема сопряжения по заготовленному плану и априорно неопределенная схема действий по причине отсутствия модели среды.

*Активность* — способность агента к целенаправленному поведению для достижения заданной цели, устанавливаемой самостоятельно или извне; сложно организованный агент может обладать инициативностью определенного характера.

*Коммуникативность* — способность агентов взаимодействовать между собой и с людьми в целях обмена информацией; на более высоком уровне в мультиагентных системах может проявляться способность к сотрудничеству (кооперации) агентов для совместного решения задач.

*Автономность* — способность агента функционировать независимо от внешних управляющих воздействий при решении целевых задач; высокой автономности агентов благоприятствует адаптивность алгоритмов работы, обучаемость, поддержка действий при неполной информации, способность работать в стохастических средах.

*Рассудительность* — способность агента действовать в соответствии с имеющимися в его распоряжении знаниями.

*Обучаемость* сводится к способности приобретать и использовать новые знания.

Концепция мультиагентных систем используется в современном имитационном моделировании (см. 4.6.2). Их преимуществом являются возможности асинхронных вычислений, а также создания сложной иерархии компонентов, имитирующих изучаемую систему, что позволяет максимально приблизить в модели взаимодействие и развитие как отдель-

ных индивидуумов, так и более крупных их групп, к той форме, в какой это протекает в реальной жизни.

## 1.9. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Идеи создания устройств, помогающих человеку в его мыслительной деятельности, — идеи «искусственного разума» витали в течение многих веков. Однако оформление искусственного интеллекта (ИИ) в качестве самостоятельного направления науки произошло только в XX в. после появления ЭВМ и создания кибернетики. Название новой междисциплинарной науки — *искусственный интеллект* (ИИ) впервые прозвучало в 1956 г. на семинаре «Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence» в Дартмутском колледже (США). Следует отметить, что английское слово «intelligence» в буквальном переводе означает скорее не интеллект, а способность рассуждать разумно.

Один из пионеров этой новой области Марвин Минский перечислял задачи науки об ИИ, объединяющие ее с другими дисциплинами: «Вместе с вычислительной наукой мы пытаемся понять, как действуют и взаимодействуют информационные процессы. С философией нас объединяют проблемы памяти, мышления, разума, ощущений. С лингвистикой мы разделяем проблемы отношений между предметами, символами, словами и значениями. Вместе с психологами мы интересуемся восприятием, памятью и т.п., а также теориями структуры «Эго» и целостности личности». И далее: «Искусственный интеллект вышел из кибернетики 40-х годов в надежде, что ее методологические ограничения можно преодолеть с помощью новых идей вычислительной науки, особенно — если осознать, что научный интерес заложен в самих программах, а не в их приложениях. Период кибернетики представляется мне поиском простых, эффективных, общих принципов, которые послужили основанием для теории интеллекта» (цит. по [46]).

После того как в конце 40-х—начале 50-х гг. XX в. появился компьютер, выяснилось, что это не просто быстро работающее средство для математических вычислений, но машина, с помощью которой можно решать логические задачи, сочинять тексты и музыку, играть в шахматы и так далее. Одним словом, компьютер позволяет автоматизировать такие виды деятельности, которые называются *интеллектуальными* и всегда считались доступными только человеку.

### 1.9.1. Может ли машина мыслить?

Этот сакраментальный вопрос (имеющий не только математический и технический,

но и философский аспект) нельзя не затронуть при рассмотрении искусственного интеллекта. Иначе говоря, каков критерий интеллектуальности? Этот вопрос тревожил умы многих видных ученых, среди которых А.Тьюринг (по-видимому, он впервые выдвинул этот вопрос в литературе в 1950 г.), А.И.Берг, А.А.Ляпунов и др.

А.Тьюринг (1912— 1954) сформулировал первый критерий интеллектуальности (тест Тьюринга): ИИ должен имитировать речь человека. В самом деле, всякая мыслительная деятельность человека в момент своего выражения проходит через вербальную стадию, значит, естественно требовать того же и от искусственного интеллекта. Однако простота и естественность теста Тьюринга обманчива: одна проблема — имитация лепета младенца, но проблема совсем иной сложности — имитация лекции профессора. Тест Тьюринга охватывает широкий спектр проблем: понимание языка и смысла, знание логики, математики, физики и т.д. Интеллектуальность заключается не только и не столько в способности демонстрировать знания, сколько в способности самообучаться и решать новые задачи.

На вопрос «Могут ли машины думать?» А.А.Ляпунов в 1954 г. дал такой ответ: «...создается впечатление, что машина может думать, что работа машины заменяет интеллектуальную деятельность человека и даже что машина в интеллектуальном отношении превосходит человека. ... То обстоятельство, что машина выполняет работу, которую человек заставляет ее делать, трактуется как сознательное действие машины. В конце концов, какая разница между работой такой машины и работой какого-либо станка? Ведь если бы винты или гайки делать вручную, то тоже должно было бы работать очень много людей для того, чтобы сделать то, что делает машина, но никто не говорит о том, что станок заменяет человеческий мозг. Всем ясно, что станок управляется человеком. Совершенно с такой же степенью очевидности можно заявить, что если вычислительная машина делает что-то полезное и разумное, то она делает это не потому, что сама думает, и не потому, что сама может сделать какой-то творческий акт, а потому, что предварительно думал человек, что человек составил программу, т.е. перевел на определенный специальный язык свои задачи, в некотором принципиальном отношении свои задачи решил. Машина только реализует замысел человека.» (Доклад на заседании методологического семинара Энергетического института АН СССР) [36].

### **1.9.2. Задачи науки об искусственном интеллекте**

Развитие представлений об искусственном интеллекте прошло несколько этапов. Сначала это был «черный ящик», который в зависимости от состояния информационных

входов изменяет не только параметры своего функционирования, но и сам способ своего поведения, причем способ поведения зависит не только от текущего состояния информационных входов, но также и от предыдущих состояний. Затем искусственный интеллект стал рассматриваться как компьютерная модель мышления человека. И наконец, искусственный интеллект — это самоокупающийся компьютерный инструмент, усиливающий деятельность человека по генерации и принятию решений. Современные интеллектуальные системы представляют собой сложные программно-аппаратные комплексы, в состав которых всегда входит ЭВМ.

Выберем в качестве определения науки об искусственном интеллекте следующую формулировку: *дисциплина об имитации и усилении рассуждений, а также о восприятии и переработке информации посредством компьютера* [14].

По словам теоретика постиндустриализма О.Тоффлера, включение компьютера в процесс обучения приводит к повышению интеллектуальных способностей индивидуума в такой же мере, в какой промышленная революция увеличила его физическое могущество.

Объект науки об искусственном интеллекте — метапроцедуры, используемые при решении человеком задач, традиционно называемых интеллектуальными, или творческими. Однако в то время как когнитивная психология (см. 1.7) исследует эти метапроцедуры применительно к мышлению человека, наука об ИИ создает их программно-аппаратные модели. При этом ставится цель создания компьютерами «программирующих программ»: машина должна находить решения задач в определенной предметной области. В качестве основных методов в науке об ИИ применяются разнообразные программные модели и средства, вычислительный эксперимент, теоретические модели. Интенсивно разрабатываются новые средства для решения задач ИИ: искусственные нейросети, «молекулярные машины», голографические системы и др.

Какие проблемы изучает наука об ИИ? Назовем основные [46]:

1) представление знаний — разработка способов формализации и последующего ввода в память компьютера знаний из различных предметных областей; обобщение и классификация накопленных знаний; использование знаний при решении задач;

2) моделирование рассуждений — изучение и формализация различных схем человеческих умозаключений, используемых в процессе решения разнообразных задач, создание эффективных программ для реализации этих схем в компьютерах;

3) диалоговые процедуры общения на естественном языке, обеспечивающие контакт между интеллектуальной системой и человеком-специалистом в процессе решения задач;

4) планирование целесообразной деятельности — разработка методов построения программ сложной деятельности на основании знаний в предметной области, хранящихся в интеллектуальной системе;

5) обучение интеллектуальных систем в процессе их деятельности, создание комплекса средств для накопления и обобщения в них умений и навыков;

6) интеллектуальный анализ данных.

В практику деятельности человека активно внедряются такие виды интеллектуальных систем, как экспертные системы (см. ниже), интеллектуальные информационные системы (например, системы машинного перевода), интеллектуальные роботы и др. С наукой об ИИ непосредственно связаны когнитивная психология, психолингвистика, компьютерная лингвистика, эвристические методы, робототехника, распознавание образов, искусственные нейросети.

### 1.9.3. Рассуждения. Логика

Любой вид человеческой деятельности связан с рассуждением. В науке об искусственном интеллекте термин «рассуждение» используется в его общечеловеческом смысле как понятие естественного языка, нестрогое и неоднозначное. Однако есть вид рассуждений, который является объектом изучения специальной науки — логики, определяется строго научно и широко используется в интеллектуальных системах.

*Логика* — это наука, изучающая методы доказательств и опровержений, т.е. методы установления истинности или ложности одних высказываний (утверждений) на основе истинности или ложности других высказываний. Математическая логика — это современная форма логики, которая полностью опирается на формальные математические методы [46]. В формальных системах, изучаемых логикой, в качестве оценок выступают оценки истинности тех или иных утверждений. В классической двоичной логике таких оценок две: истинно либо ложно. В многозначной логике к этим двум оценкам добавляются другие.

Утверждения, которым всегда можно приписать некоторую из двух оценок истинности, принято называть высказываниями. Логика, оперирующая высказываниями, называется исчислением высказываний. Кроме исчисления высказываний классическая логика изучает исчисление предикатов [46].

Достоверный вывод еще не считается формальной моделью, в которую укладываются человеческие способы рассуждений. В обыденной жизни мы часто сталкиваемся с ситуацией замены полного вывода его заключительной, «усеченной» частью, поскольку не имеем возможности воспроизвести полный вывод, хотя уверены, что в принципе он суще-

ствуется. Такая уверенность может быть основана на авторитетных мнениях, на эмпирическом опыте (на том, что подобные выводы делались и раньше и не сопровождались плохими последствиями) и т.д. Одним словом, когда рассуждение человека по форме своей является «усеченным» выводом, это означает, что его знания не содержат ничего противоречащего этому выводу.

Такие нестандартные рассуждения наука об искусственном интеллекте относит к широкому кругу *немонотонных рассуждений*. Под монотонностью понимается следующее: если некоторое утверждение получено в цепочке вывода, ведущей от исходной системы аксиом, то, что бы ни происходило потом, это утверждение остается выведенным. В связи с этим говорят, что формальная система описывает полностью некоторый замкнутый в себе и неизменный мир утверждений [46].

В реальной жизни такое невозможно: человек не имеет исчерпывающих знаний об окружающем мире и, следовательно, не обладает полной системой аксиом, описывающих закономерности этого мира. Частичные знания порождают и неполную систему правил вывода. А если учесть, что мир динамичен, то утверждения, принимаемые в конкретный момент как истинные, могут оказаться ложными при получении новых сведений,

К немонотонным относятся все рассуждения, которые опираются на ограниченный запас знаний, на неполные знания, на веру. Весь этот огромный пласт рассуждений не укладывается в классическую схему достоверного (дедуктивного) вывода, характерного для формальных систем.

Еще один класс рассуждений называется *правдоподобными рассуждениями*. Они могут маркироваться такими словами и словосочетаниями, как: вероятно, можно предположить, часто, бывает что, время от времени и т.п. Сюда относятся индуктивные, вероятностные рассуждения, рассуждения о гипотезах, которые несомненно важны в обучении, поиске решения, накоплении информации о проблемной области.

Существуют и другие классы человеческих рассуждений. Для их изучения методами искусственного интеллекта необходимо создание формальных моделей. В уже созданных экспертных системах реализуются не только достоверные логические выводы, но и правдоподобные рассуждения, а также иные немонотонные рассуждения. Разработаны программы для рассуждений по аналогии и ассоциации.

#### **1.9.4. Эвристические методы.**

Для выполнения многих задач (игры, сочинение стихов и т.д.) не существует точных методов. В таких случаях используются так называемые *эвристики* — догадки, приемы,

опирающиеся на прошлый опыт решения родственных задач, на человеческие знания, интуицию [46]. В большинстве случаев эвристика — это прием, позволяющий сокращать количество просматриваемых вариантов при поиске решения задачи. Примером может служить игра в шахматы: человек пользуется эвристическими приемами выработки решений, поскольку продумать весь ход игры от начала до конца практически невозможно из-за слишком большого числа вариантов.

Между эвристиками и навыками нет строгой границы. Можно сказать, что навыки — это эвристики, ставшие автоматическими, вытесненные из сферы сознания (пример — бросание мяча в баскетбольную корзину или удар кием по бильярдному шару), еще не сформулированные на уровне словесного описания.

Методы решения с помощью эвристик называются *эвристическими*. Эвристические рассуждения строятся преимущественно на использовании аналогии и неполной индукции. Важно отметить, что такие методы не всегда приводят к результату и не гарантируют оптимального решения, в них может содержаться доля неверной информации. Однако эвристики содержат богатый опыт человеческого умения, который специалисты в области искусственного интеллекта стремятся передать интеллектуальным системам, например роботам. Важную роль в развитии эвристических методов в середине XX в. сыграло введение понятия «правдоподобное рассуждение». Эвристическое рассуждение стали считать предварительным правдоподобным рассуждением, направленным на решение задачи.

Изучение проблем эвристики связано с более общей проблемой создания систем искусственного интеллекта (см. 1.9.5). В широком смысле, эвристика — это раздел психологии, раскрывающий природу мыслительной деятельности человека при решении различных задач, независимо от их конкретного содержания. В качестве обобщающего названия для методов, используемых в работе с экспертами (например, «мозговая атака» типа знаменитой телеигры «Что, где, когда?»), был предложен термин «методы, направленные на активизацию интуиции и опыта специалистов».

### **1.9.5. Интеллектуальные системы**

Интеллектуальную систему (ИнтС) можно определить как компьютерную систему для решения классов задач, которые либо не могут быть решены человеком в реальное время, либо их решение требует автоматизированной поддержки или дает результаты, сопоставимые по информативности с решениями человека [53]. Компьютер в диалоговом режиме усиливает комбинаторное мышление человека.

Какого рода задачи решаются с помощью интеллектуальных систем? Эти задачи не-



корректны в том смысле, что они требуют применения формализованной эвристики (см. 1.9.4) и не предполагают полноты знаний, являющихся исходными посылками при решении этих задач. Применяемые эвристики должны приближенно отображать некоторые аспекты интеллекта: способность упорядочения данных и знаний с выделением в данных существенных параметров в соответствии с реализуемой целью; способность к рассуждению как синтезу различных познавательных процедур, включая эмпирическую индукцию, аналогию и дедукцию; способность к выдвижению гипотез; способность отвечать на вопрос «почему?»; способность к обучению на основе положительных и отрицательных примеров; фальсифицируемость (*falsifiability* — см. 1.1); способность к адаптации в соответствии с изменением множества фактов и знаний [53].

Эти способности аппроксимируются благодаря специфической архитектуре компьютерной интеллектуальной системы (ИнтС) [53]:

ИнтС = Решатель задач + Информационная среда + + Интеллектуальный интерфейс,  
где Решатель задач = Рассуждатель + Вычислитель + Синтезатор; Информационная среда = База фактов (БФ) + База знаний (БЗ); Интеллектуальный интерфейс = Диалог + Представление результатов (включая графику) + Научение работе с системой.

*Рассуждатель* — это подсистема, реализующая логические средства решения задач, посредством которых формализуется соответствующая эвристика. Результат такой формализации — различные типы рассуждения, например приближенные рассуждения, использующие аппарат нечетких множеств; индуктивные рассуждения, использующие антиунификацию, которые осуществляются посредством индуктивного логического программирования; рассуждения, образованные синтезом различных познавательных процедур (например индукции, аналогии, абдукции и дедукции). Основным инструментом Решателя, реализуемый в Рассуждателе, — это правдоподобные рассуждения, формализующие эвристику решения задач и адекватные цели применения ИнтС.

*Вычислитель* применяется к числовым данным с использованием численных методов, релевантных целям ИнтС (например, к таким методам относятся различные статистические методы анализа данных, квантовохимические расчеты для прогнозирования биологической активности химических соединений и др.).

*Синтезатор* выбирает стратегии, адекватные не только цели ИнтС, но и состоянию базы фактов, а также результатам предыдущих применений Решателя.

*Информационная среда* образована базой фактов и базой знаний.

БФ — это представление элементарных событий некоторого фрагмента изучаемой

предметной области. БЗ — подсистема представления знаний. Причем понятие «знание» теперь относится не только к сфере философии и философской логики, ибо для создания БЗ требуется характеристика идеи «знание в компьютерной системе». Обычно для компьютерных систем выделяют три типа знаний: декларативные, процедурные и концептуальные.

Декларативное знание ИнтС — это системы утверждений, в частности характеристика предметной области; это также утверждения, в имплицитном виде выражающие правила вывода Рас-суждателя. Под процедурным знанием понимают задание алгоритмов и их комбинаций, применяемых в решателе задач для достижения цели; это стратегии решения задач, образованные посредством комбинирования различных видов рассуждений и вычислений. Концептуальным знанием ИнтС является множество утверждений и определений понятий, характеризующих принципы создания ИнтС. Это метатеоретическое знание, которым руководствуются создатели ИнтС.

### 1.9.6. Предметная область и представление знаний

В науке об искусственном интеллекте предметной областью называют совокупность предварительных знаний, необходимых для автоматизации процессов решения задач. Информационной моделью предметной области может служить база данных (см. 2.8). Каждая предметная область имеет свои специфические методы решения задач. Знания о предметной области и способах решения в ней задач разнообразны. Чаще всего знания подразделяются на декларативные и процедурные.

*Процедурные знания* — это описания последовательности действий, применяемых при решении задач (например, технические инструкции, словесные записи алгоритмов, программы для компьютеров). *Декларативные знания* — все другие знания, не являющиеся процедурными. Это, например, статьи в словарях и энциклопедиях, формулировки научных законов и т.д. Процедурные знания отвечают на вопрос «Как сделать X?», тогда как декларативные знания — скорее на вопросы «Что такое X?», «Какие связи есть между X и Y?» и т.п.

Чтобы ввести знания о предметной области в память компьютера (который обязательно входит в состав интеллектуальной системы), необходимо представить их в такой форме, которую бы понимала машина, так же как понятны ей записи на языках программирования. Для этого существуют специальные языки представлений знаний. На ранних этапах развития интеллектуальных систем широко использовались логические модели языков представления знаний. В современных системах предпочитают языки, опирающиеся на продукционную и на сетевую модели, часто на их сочетание [46].

*Продукционная модель* основана на системах продукций. В наиболее простом виде

продукция состоит из имени (например, порядковый номер в системе продукций) и ядра. Ядро — основная часть продукции, имеет вид: «Если А, то В». Приведем примеры ядра: «Если вспыхнул пожар, то звоните по телефону 01»; «Если плохо себя чувствуете, то обращайтесь к врачу». В этом примере А и В представляют собой действие. Возможны и другие варианты ядра продукции, так что при помощи ядра можно представлять весьма разнообразные знания, как декларативные, так и процедурные, хотя сама форма продукций удобна для задания именно процедурных знаний. Из примеров видно, что ядро состоит из двух частей: посылки и следствия. Если А (посылка) имеет место, то В (следствие) тоже реализуется или может быть реализовано. Таким образом, знания, заключенные в ядрах продукции, носят характер правил, описывающих некоторые процедуры. Поэтому продукции часто называют продукционными правилами, а интеллектуальные системы, в которых используются продукции, — системами, основанными на правилах.

Кроме имени и ядра, продукция может содержать вспомогательные элементы, такие как имя сферы (предметная область, к которой относятся знания), предусловие, условие для ядра, постусловие. Условие определяет, в каких ситуациях можно использовать ядро продукции. Например, не при любом случае плохого самочувствия целесообразно обращаться к врачу, и не к любому врачу. Продукция, в которой кроме ядра есть и условие, имеет вид: «При выполнении условия С имеет место: если А, то В».

*Сетевая модель представления знаний* основана на идее о том, что любые знания (текст) о реальном мире можно представить в виде совокупности взаимосвязанных объектов (или понятий, т.е. некоторых порций информации) и связей (отношений) между ними, причем число базовых отношений меньше 300, все остальные отношения выражаются через базовые в виде их комбинаций. Эта гипотеза составляет основу утверждения, что семантические сети могут служить универсальным средством для представления знаний в интеллектуальных системах. Понятиям и объектам, встречающимся в тексте, соответствуют вершины сети, а отношения между объектами представлены в виде дуг, связывающих определенные вершины.

Семантические сети — эффективное средство представления знаний, однако для них свойственны неоднозначность представления знаний и неоднородность связей. Чтобы унифицировать форму представления знаний, в системах искусственного интеллекта используются фреймы.

### 1.9.7. Фреймы

Термин «фрейм» (от англ. *frame* — рамка, структура) введен М.Минским. Это структура данных для представления стереотипных ситуаций. Фрейм соответствует минимально воз-

можному описанию сущности какого-либо явления, события, ситуации, процесса или объекта. «Минимально возможное» означает, что при дальнейшем упрощении описания теряется его полнота, оно перестает определять ту единицу знаний, для которой предназначается.

В основу теории представления знаний с помощью фреймов положена концепция о том, что знания о мире должны строиться не в результате сбора разрозненных фактов об отдельных событиях, а в виде достаточно большой совокупности определенным образом сформированных данных — фреймов, представляющих собой модели стереотипных (часто повторяющихся) ситуаций. При этом ситуация понимается в обобщенном смысле — действие, рассуждение, зрительный образ, повествование и т. д. Фрейм представляет собой не одну конкретную ситуацию, а наиболее характерные, основные моменты ряда близких ситуаций, принадлежащих одному классу. Наряду с явной информацией фрейм содержит неявные, скрытые, подразумеваемые сведения. Теория представления знаний с помощью фреймов претендует на объяснение ряда особенностей мышления человека. Фреймы различны по происхождению — одни из них человек усваивает неосознанно в процессе развития (например восприятие характерных черт лица), другие приобретаются в процессе обучения.

Фрейм имеет имя (название), состоит из стандартных элементов — *слотов* и может изображаться в виде цепочки: Фрейм = <слот 1> <слот 2> ... <слот  $n$ >. Например, фрейм «Битва» [46]: Битва = <кто?> <с кем?> <когда?> <где?> <результат>. Исключение любого слота делает фрейм принципиально неполным, иногда бессмысленным, не соответствующим названию фрейма.

Фрейм можно представить графически в виде сети из узлов со связями между ними. Каждый узел соответствует определенному понятию, которое может быть, а может и не быть, задано в явном виде. В последнем случае его можно конкретизировать путем согласования данного фрейма с некоторой конкретной ситуацией во внешнем мире. Узлы, не заданные в явном виде, образуют нижние уровни графовой структуры, а на верхних уровнях располагаются понятия, которые всегда справедливы в отношении ситуации, представляемой данным фреймом. Возможно объединение группы фреймов в систему. Фрейм может содержать детали, отсутствующие в конкретной ситуации. Во многих случаях это позволяет восстанавливать картину реальности по ее фрагментам. Если выбранный фрейм не удастся согласовать с реальностью, то происходит обращение к специальной сети поиска информации, с помощью которой происходит соединение систем фреймов. Подобная сеть позволяет найти другие способы представления знаний о фактах, аналогиях и другой информации, которую можно использовать для согласования с реальностью.

### 1.9.8. Экспертные системы

Наиболее известный и распространенный вид интеллектуальных систем — экспертные системы (ЭС). Разработка первых ЭС началась в 1960-е гг.

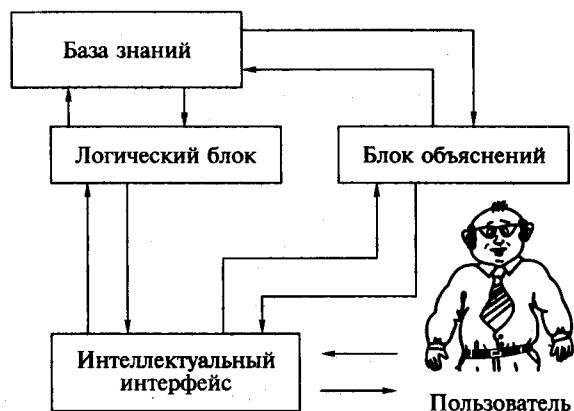
Экспертной системой считается программный комплекс или устройство, которые при решении задач, трудоемких для эксперта-человека, получают результаты, не уступающие по качеству и эффективности решениям, получаемым экспертом. Иногда об экспертных системах говорят как о человеко-машинных системах, компетентных (умеющих решать некоторые задачи) в некоторой узкоспециальной области или как о вычислительной системе, в которую включены знания специалистов о некоторой предметной области и которая в пределах этой области способна принимать экспертные решения. Если трактовать деятельность экспертной системы как вычислительную процедуру, помогающую человеку, то задачи создания экспертной системы не отличаются от задач искусственного интеллекта, т.е. создание экспертных систем — это ступень развития искусственного интеллекта. Однако появление экспертных систем представляет собой переход от парадигмы *поиска* все более эффективных и универсальных эвристик к парадигме *разработки* способов представления неформализованных знаний специалиста-эксперта, приемов и неформальных правил, которыми он пользуется при принятии решений. На основе этой парадигмы разработаны диагностические и консультативные системы.

Таким образом, первая особенность экспертных систем заключается в том, что они ориентированы на пользователей, сфера деятельности которых далека от программирования, искусственного интеллекта и вообще — от математики и логики. Экспертная система помогает такому пользователю в его повседневной работе. Общение с ней должно быть для пользователя таким же рутинным, как, например, управление телевизором. Во-вторых, экспертные системы содержат знания профессионалов-экспертов (например врачей или юристов) в форме, пригодной для восприятия теми, кто таких знаний не имеет. В-третьих, экспертные системы обладают объяснительными функциями — ни в каких других интеллектуальных системах, кроме обучающих, такой функции нет. Это означает, что в экспертной системе предусмотрены не только простые средства общения между машиной и человеком, но и средства

доведения хранимых знаний до специалиста вместе с необходимыми пояснениями.

Рис. 1.5. Типовая структура экспертной системы

Типовая структура экспертной системы



состоит из четырех блоков [46] (рис. 1.5). Поскольку это типичная человеко-машинная система, она содержит *интеллектуальный интерфейс*, обеспечивающий диалог с пользователем на привычном ему языке. В состав интеллектуального интерфейса могут входить средства визуализации, с помощью которых на экране дисплея воспроизводятся необходимые чертежи, схемы и т.п. Общение с пользователем происходит в режиме «вопрос — ответ», причем вопросы может задавать как пользователь, так и система. Такое общение происходит с помощью специальной схемы управления диалогом, которая находится в *логическом блоке*. Он осуществляет все необходимые операции с репликами пользователя, информацией из *базы знаний* и ответными репликами системы. Специфический компонент экспертных систем — *блок объяснений*. К этому блоку обращается пользователь, если решение, полученное им после консультации с экспертной системой, не удовлетворит его. Блок объяснений покажет пользователю, как именно система прошла по пути от исходного запроса к решению, ответит также на вопрос о том, почему рекомендуется данное решение, а не другое. Наконец, экспертная система ответит пользователю на вопросы о значении новых для него терминов. Для этого система обращается к энциклопедической информации, хранящейся в базе знаний, логический блок находит статью относительно запрашиваемого термина и выдает ее текст пользователю.

На основе представленной стандартной схемы (рис. 1.5) существуют два типа экспертных систем: 1) системы, базирующиеся на представлении знаний; 2) машинные обучающие системы, которые автоматически улучшают и расширяют свой запас знаний. Отличие экспертных систем от систем машинной обработки Данных и от традиционных информационных систем заключается в том, что экспертные системы не характеризуются готовым алгоритмом поиска, а обеспечивают эвристический поиск с символьным представлением данных и символьным логическим выводом. С точки зрения символьного представления информации и логического вывода, к экспертным системам приближаются информационно-логические системы. Но еще раз обратим внимание, что важной дополнительной характеристикой экспертной системы является ее способность по требованию объяснять свою линию рассуждений в форме, непосредственно понятной пользователю.

На практике экспертные системы используются прежде всего как «системы-советчики» в ситуациях, когда специалист сомневается в правильности выбираемого решения. База знаний системы содержит (по сравнению с памятью пользователя) гораздо более глубокие и полные сведения о предмете. Другой вид экспертных систем — «системы-подсказчики». Они служат для работы в оперативном режиме (например, при аварии), когда у человека нет времени на обдумывание и выбор правильного решения и мешает состояние стресса. В такой экстремальной

ситуации (например, в отделении неотложной медицинской помощи) экспертная система в отличие от человека ничего не забывает, все учитывает и ничего не путает. Даже если ее знания не больше, чем у специалиста, работающего с ней в паре, она имеет существенное преимущество в скорости и точности реакции.

Наконец, еще один класс экспертных систем рассчитан, в отличие от классических экспертных систем, не на пользователя-новичка или даже среднего специалиста в определенной сфере деятельности, а на самого эксперта-профессионала. Это так называемые системы автоматизации научных исследований. Они способны на основе частных знаний эксперта выявить в эмпирическом материале скрытые связи и закономерности. Подобные ситуации возникают в разделе органической химии, связанном с разработкой новых лекарственных соединений. Как известно, существует связь между химическим строением молекулы вещества и его влиянием на живой организм. Традиционный подход заключался в том, чтобы синтезировать химические соединения, испытывать их на экспериментальных животных, затем проверять в ходе клинических испытания на людях. Теперь уже известные сведения о соотношении между химической структурой и биологической активностью закладываются в базу знаний экспертной системы, с которой работает специалист (см. 4.4).

### 1.9.9. Робототехника

Робот отличается от всех других интеллектуальных систем (например, от экспертных систем) тем, что он функционирует в реальной среде. Из нее он получает информацию о текущей ситуации, и на нее же направлены его действия. Поэтому робот имеет две системы, обеспечивающие его контакты с внешней средой: систему восприятия (или сенсорную систему) и систему воздействия (или эффекторную систему). Остальные системы организуют целесообразное функционирование робота.

Роботы должны действовать там, где условия работы неблагоприятны для человека (шахты, химическое производство, работа с радиоактивными веществами, работа под водой, в безвоздушном пространстве, в космосе и т.д.). Цель робототехники — создать такие устройства, которые могли бы полностью заменить человека при выполнении возможно большего числа операций. Для этого роботы должны быть способны принимать сообщения, оценивать свое окружение, строить планы своих действий, выполнять эти планы и контролировать свои действия. Процесс эволюции роботов от поколения к поколению состоит в углублении и совершенствовании этих функций.

Выделяют четыре поколения роботов. 1. *Программные роботы* действуют по многократно повторяемой жесткой программе. 2. *Адаптивные роботы* отличаются тем, что у них

имеются простейшие «органы чувств» — разнообразные датчики (тактильные, световые, тепловые). ЭВМ, встроенная в робот, обрабатывает сигналы от датчиков и формирует сигналы управления, при использовании которых робот выполняет заложенную в его память задачу. Такие работы могут подстраиваться под изменения, возникающие в их рабочем пространстве. 3. *Интеллектуальные роботы* тоже имеют «органы чувств», но кроме этого обладают определенной долей интеллекта. Они способны распознавать образы (см. 1.10), обучаться, принимать решения, составлять планы и т.п. Это специализированные автоматы, рассчитанные на выполнение определенного круга операций (например, промышленные роботы). 4. *Интегральные роботы*, или суперроботы, — это автономные автоматы, способные выполнять сложные и разнообразные операции, самонастраиваться и менять программу своих действий в зависимости от ситуации.

### 1.9.10. Интеллектуальный анализ данных

Активно развивается раздел науки об искусственном интеллекте, получивший название «интеллектуальный анализ данных». Каковы его отличительные особенности по сравнению с более привычным направлением систем искусственного интеллекта — экспертными системами (см. 1.9.8)?

Экспертная система имеет конечный характер, в нее человек-эксперт исходно закладывает определенные знания, которые «вынимаются», «извлекаются» из нее. Заполнение базы знаний — деятельность, пограничная между информационной и интеллектуальной. На начальном этапе развития экспертных интеллектуальных систем теоретики и разработчики полагали, что проблему получения знаний можно успешно решить посредством диалога когнитолога с экспертом в прикладной области. Однако выявился парадокс, теперь ставший общеизвестным: чем выше квалификация специалиста, тем в меньшей мере он способен объяснить свои рассуждения (когнитивный процесс в данном случае переходит с вербального уровня на интуитивный).

Что касается системы интеллектуального анализа данных, то в процессе работы с ней *порождается* новое знание, которое исходно не было введено в нее. Подход таков: если специалист в прикладной области не может изложить ход своих мыслей при принятии решений, то пусть за него это попытаются сделать компьютерные программы. От специалиста требуется лишь демонстрация образцов в виде наборов данных, с «привязанными» к ним результирующими суждениями эксперта (обучающая выборка).

Итак, основная идея интеллектуального анализа данных состоит в том, что из неупорядоченных и неформализованных данных можно посредством различных формальных методов



(перерабатывающих эти данные с помощью некоторых алгоритмов в интерпретируемые результаты) извлечь в явном виде такие знания, которые до применения этих методов были скрыты в массиве данных [53].

### **Обнаружение знаний (Knowledge Discovery) :**

В англоязычной литературе в связи с интеллектуальным анализом данных часто употребляется термин «*knowledge discovery in databases*» — *обнаружение знаний в базах данных*, под которым имеют в виду какой-либо нетривиальный процесс идентификации достоверных, новых, потенциально полезных и хорошо понимаемых шаблонов (паттернов, образцов) в данных. Кратко перечислим этапы этого процесса: накопление «сырых» данных, отбор, подготовка, преобразование данных, поиск закономерностей в данных, оценка, обобщение и структурирование найденных закономерностей.

В конце 1970-х гг. появился термин «*data mining*». Его переводят как «добыча», «раскопка», «извлечение данных» [19, 20]. В современной трактовке под извлечением данных понимают этап процесса обнаружения знаний в базах данных («*knowledge discovery in databases*»), состоящий в применении специфических алгоритмов порождения паттернов, добытых из имеющегося множества фактов — базы данных, или хранилища данных. Иногда в литературе понятия «*data mining*» и «*knowledge discovery in databases*» встречаются как синонимы.

База данных, или хранилище данных (*data warehouse*), — интегрированный накопитель данных, собранных из других систем, как оперативных, так и унаследованных. Различные хранилища имеют следующие общие признаки. Данные объединяются вокруг базовых понятий, используемых в конкретной сфере деятельности. Данные очищаются от ошибок, агрегируются и представляются в виде, понятном конечному пользователю. Процесс создания хранилища является итеративным: архитектура хранилища со временем меняется в зависимости от откликов пользователей и закономерностей, обнаруженных соответствующими методами. Итак, данные, собранные в хранилище, характеризуются предметной ориентированностью, интегрированностью, поддержкой хронологии и неизменяемостью.

Основные этапы процесса обнаружения знаний в базах данных [53] следующие: 1) выбор предметной области и релевантного знания для реализации целей конечного пользователя компьютерной системы; 2) отбор исходного множества данных (базы фактов) и подмножества переменных, которые необходимы для извлечения нового знания из базы фактов; 3) уточнение данных и предобработка: выбор основных операций над данными так, чтобы это способствовало уменьшению «шума»; 4) редукция данных: выявление полезных особенностей данных, чтобы представление данных было адекватным решению задач, соответствующих цели обнаруже-

ния знаний; 5) определение задачи извлечения данных, т.е. спецификация процесса обнаружения знаний как классификации, кластеризации и т.д.; 6) выбор алгоритмов, реализующих извлечение данных для поиска шаблонов (паттернов) в данных. Этот выбор должен быть согласован с моделями и параметрами представления данных; 7) процесс извлечения данных: поиск шаблонов (паттернов) в форме, интересной для пользователя (правила классификации и кластеризации, регрессия, деревья решений и т.д.); 8) оценка, обобщение и структурирование найденных закономерностей с возможным повторением этапов 1 — 7 для дальнейшей итерации.

Таким образом, процесс обнаружения знаний представляет собой использование алгоритмов извлечения данных (data mining). Для выделения некоторых шаблонов (паттернов, образцов) из баз фактов в соответствии с формулируемыми критериями принятия результатов при условии необходимой предобработки, формирования выборок из базы фактов и некоторых ее преобразований [53].

### **Извлечение данных (Data Mining)**

Понятие «извлечение данных» приобрело особенно высокую популярность примерно с первой половины 1990-х гг. в связи с тем, что вследствие бурного развития технологий записи и хранения данных на человечество обрушились колоссальные потоки «информационной руды» в самых разных сферах. В этой ситуации выявились ограничения традиционной математической статистики, долгое время претендовавшей на роль основного инструмента анализа данных. Главное ограничение статистических методов — концепция усреднения по выборке, приводящая к операциям над несуществующими величинами (типа «средней температуры по больнице»).

Современные процедуры извлечения данных соответствуют следующим условиям: 1) данные имеют неограниченный объем; 2) данные разнородны (количественные, качественные, категориальные); 3) результаты процедур должны быть конкретными и понятными; 4) инструменты для обработки «сырых» данных должны быть простыми в использовании.

В основу технологий извлечения данных положена концепция шаблонов (паттернов) и зависимостей, отражающих фрагменты многоаспектных взаимоотношений среди данных. Поиск паттернов производится автоматическими методами, которые не ограничены рамками априорных предположений о структуре выборки в виде распределений значений анализируемых показателей. Важно, что разыскиваемые паттерны должны отражать неочевидные, неожиданные (unexpected) регулярности в глубинном пласте «скрытых знаний» (hidden knowledge), которые необходимо грамотно «раскопать».

Итак, технология извлечения данных (data mining) — это процесс отыскания в сырых

данных ранее неизвестных, нетривиальных, практически полезных, доступных для интерпретации знаний, нужных для принятия решений в различных сферах деятельности человека [19].

Методы извлечения данных позволяют выделять пять стандартных *типов закономерностей* [19]. Если несколько событий связаны друг с другом, то имеет место *ассоциация*. Цепочка событий соответствует *последовательности*. С помощью *классификации* выделяются признаки, характеризующие группу, к которой принадлежит объект; выделение осуществляется путем анализа уже классифицированных объектов и формулирования некоторого набора правил. *Кластеризация* отличается от классификации тем, что группы не заданы заранее; средства Data Mining самостоятельно выделяют различные однородные группы данных. Разнообразные системы *прогнозирования* основаны на исторической информации, хранящейся в базах данных в виде временных рядов. Если удастся построить шаблоны (паттерны), адекватно отражающие динамику поведения целевых показателей, то с их помощью можно предсказать будущее поведение системы.

### ***Классы систем Data Mining (извлечения данных)***

Data Mining представляет собой мультидисциплинарную область, реализующую разнообразные методы и алгоритмы, такие, как прикладная статистика, распознавание образов, нейросети, теории баз данных и др. Многие системы Data Mining интегрируют сразу несколько подходов.

**Статистические методы.** Последние версии почти всех известных статистических пакетов включают не только традиционные статистические методы, но и элементы извлечения данных. Однако основное внимание в них все же уделяется классическим методикам — корреляционному, регрессионному, факторному анализу и др. [48].

Принципиальный недостаток статистических пакетов, ограничивающий их применение в Data Mining, — это статистическая парадигма, в которой исследователь оперирует усредненными характеристиками выборки, часто лишенными смысла, когда речь идет о реальных сложных природных процессах [20]. Методы математической статистики оказались полезными главным образом для проверки уже сформулированных гипотез (verification-driven data mining) и для «грубого» разведочного анализа, составляющего основу оперативной аналитической обработки данных (online analytical processing, OLAP). Так называемые «многомерные методы» типа дискриминантного, факторного и других подобных видов анализа приходят к конечному результату через операции над фиктивными векторами средних значений, а также ковариационными и корреляционными матрицами, поэтому полученные с их помощью результаты могут быть неточны и подчас грешат отсутствием смысла. В качестве наиболее мощных и распро-

страненных статистических пакетов называют [20, 48] STATISTICA, SAS (компания SAS Institute), SPSS, STATGRAFICS (Manugistics), STADIA и др.

**Нейронные сети.** Этот большой класс систем основан на идее, что нейроны можно имитировать довольно простыми автоматами, а вся сложность мозга, гибкость его функционирования и другие важные качества определяются не столько свойствами самих нейронов, сколько связями между ними (принцип коннек-Ционизма, от англ. *connection* — связь). Аналогия между искусственными нейросетями и природным мозгом, разумеется, достаточно грубая. Нейросети состоят из связанных между собой простых элементов — формальных нейронов. Каждый из нейронов — своего рода усилитель с большим числом входов и одним выходом. Принцип коннекционизма включает следующие представления: 1) система однородна (элементы одинаковы и очень просты, все действия определяются структурой связей; 2) надежная система из ненадежных элементов и «аналоговый ренессанс» (использование простых аналоговых элементов); 3) «голографические» системы (при разрушении случайно выбранной части система сохраняет свои полезные свойства).

В большинстве нейросетей используется несколько стандартных архитектур, причем нас интересуют только нейронные сети, синхронно функционирующие в дискретные моменты времени: все нейроны срабатывают разом. Существуют две базовые архитектуры.

В слоистых сетях нейроны расположены в несколько слоев. Нейроны первого слоя получают входные сигналы, преобразуют их и через точки ветвления передают нейронам второго слоя. Далее срабатывает второй слой и так далее до  $k$ -го слоя, который выдает выходные сигналы для интерпретатора и пользователя. Если не предусмотрено иное, каждый выходной сигнал  $i$ -го слоя подается на вход всех нейронов  $(i+1)$ -го слоя. Число нейронов в каждом слое может быть любым, и оно не связано с числом нейронов в других слоях. Особенно распространены трехслойные сети.

В полносвязных сетях каждый нейрон передает свой выходной сигнал остальным нейронам, включая самого себя. Выходными сигналами сети могут быть все или некоторые выходные сигналы нейронов после нескольких тактов функционирования сети. Все входные сигналы подаются всем нейронам.

Одна из распространенных архитектур нейросетей, которая может применяться в исследованиях с извлечением данных, — многослойный перцептрон с обратным распространением ошибки. Это иерархическая сеть, где входы каждого нейрона более высокого уровня соединены с выходами нейронов нижележащего слоя. На нейроны самого нижнего слоя подаются значения входных параметров — сигналы, которые передаются в следующий слой, ослабляясь или

усиливаясь в зависимости от числовых значений (весов), приписываемых межнейронным связям. В результате на выходе нейрона самого верхнего слоя вырабатывается некоторое значение, которое рассматривается как ответ — реакция всей сети на введенные значения входных параметров. Для применения сети ее нужно сначала натренировать на уже имеющихся данных, для которых известны и значения входных параметров, и правильные ответы на них. Тренировка состоит в подборе весов межнейронных связей, обеспечивающих наибольшую близость ответов сети к известным правильным ответам. Основным недостатком нейросетевого подхода состоит в том, что необходим очень большой объем обучающей выборки. Кроме того, даже натренированная нейронная сеть — это «черный ящик». Во-первых, топология нейросетей задается исходя из эвристических соображений. Во-вторых, в натренированных нейросетях со сложной топологией веса сотен и тысяч межнейронных связей не поддаются анализу и интерпретации человеком [20]. Целям и задачам извлечения данных соответствует подход, связанный с разработкой так называемых самоорганизующихся (растущих или эволюционирующих) *булевых нейросетей*, структура которых поддается расшифровке в виде логических высказываний. Однако этот подход тоже страдает недостатками, которые присущи эволюционным алгоритмам

**Системы рассуждений на основе аналогичных случаев.** Идея систем (case based reasoning — CBR) внешне проста: чтобы сделать прогноз на будущее или выбрать правильное решение, эти системы находят в прошлом близкие аналогии имеющейся ситуации и выбирают тот ответ, который был для них правильным [19]. Поэтому метод называют еще методом ближайшего соседа (nearest neighbour), а в последнее время получил распространение также термин «memory based reasoning». В центре внимания находится то обстоятельство, что решение принимается на основании всей информации, накопленной в памяти. Главный недостаток систем CBR в том, что они вообще не создают каких-либо моделей или правил, обобщающих предыдущий опыт; в выборе решения они основываются на всем массиве доступных данных, поэтому невозможно сказать, на основе каких конкретных факторов CBR-системы строят свои ответы. Другой серьезный недостаток — произвол, допускаемый CBR-системами при выборе меры «близости». От этой меры решающим образом зависит объем множества прецедентов, которые нужно хранить в памяти для достижения удовлетворительной классификации или прогноза. Кроме того, безосновательно распространять общую меру близости на выборку данных в целом.

**Методы поиска логических закономерностей в данных.** Требованиям подхода Data Mining в наибольшей мере удовлетворяют методы поиска логических закономерностей в данных. Их результаты чаще всего выражаются в виде правил *if-then* (*если-то*) и *when-also* (*когда-*

также). С помощью таких правил решаются задачи прогнозирования, классификации, распознавания образов, сегментации БД, извлечения из данных «скрытых» знаний, интерпретации данных, установления ассоциаций в БД и т.д. Логические методы работают в условиях разнородной информации. Их результаты эффективны и прозрачны для восприятия. Далее рассмотрены основные подходы к поиску логических закономерностей в БД.

**Деревья решений** (decision trees). Деревья решений (выводов) — это одна из классических областей машинного обучения и один из самых популярных подходов к изображению логических закономерностей в данных. Алгоритмы построения деревьев решений используются большинством современных аналитических приложений в классе Data Mining. Примерами служат процедуры CHA1D (chi square automatic interaction detection), CART (classification and regression trees), ID3 (Interactive Dichotomizer — интерактивный дихотомайзер).

Дерево представляет собой иерархическую структуру, в которой вершины соответствуют компонентам, а дуги — связям. Обычно дерево располагается на плоскости следующим образом: наверху — корень дерева (1-й уровень иерархии), изображающий систему в целом или центр подчинения; ниже на одной горизонтали — компоненты 2-го уровня, непосредственно связанные с корнем; на следующей горизонтали — компоненты 3-го уровня, связанные с компонентами 2-го уровня, и т.д. От каждого компонента на верхний уровень идет только одна дуга — именно поэтому граф такой структуры называется деревом. Листья этого дерева соответствуют нижним компонентам структуры. Путь от любой вершины к корню — единственный и определяется списком содержащихся в нем вершин. Чтобы принять решение, к какому классу отнести объект или ситуацию, требуется ответить на вопросы, стоящие в узлах дерева, начиная с корня. На вход системы построения деревьев решений поступают описания положительных и отрицательных примеров, которые задаются множествами значений признаков. Все вершины дерева (за исключением корня и листьев) помечены признаками, ребра деревьев помечены значениями признаков (например 0 или 1 в случае бинарных признаков), каждый лист помечен классом + или -; примеры со всеми значениями признаков на пути, ведущем от корня к дереву, принадлежат к определенному классу, + либо -.

В случае такого варианта деревьев решений, как система ID3, основу составляет алгоритм CLS [19]. Он циклически разбивает обучающие примеры (записи БД) на классы в соответствии с переменной (полем), у которой наибольшая классифицирующая сила. Каждое подмножество примеров, выделяемое такой переменной, вновь разбивается на подклассы с использованием следующей переменной с наибольшей классифицирующей способностью и т.д. Разбиение заканчивается, когда в подмножестве оказываются объекты лишь одного класса. В ходе

процесса образуется дерево решений. Пути движения по этому дереву с верхнего уровня на самые нижние определяются логическими правилами в виде цепочек конъюнкций. Вычисляются значения функционала *прироста информации* (information gain — IG), или *негэнтропии*, для каждой вершины дерева и каждого признака, еще не выбранного выше по ветви дерева. Алгоритм последовательно продлевает ветви дерева, на каждом шагу выбирая признак с наибольшим приростом информации: этот признак «сильнее всего разделяет» объекты классов «+» и «-». Продлевание ветви прекращается, когда очередные выбранные признак и его значение, вместе со значениями признаков, выбранными ранее, однозначно классифицируют примеры, разделяя их на классы «+» и «-». Часто процедуру заканчивают раньше для того, чтобы избежать переобучения (overfitting), т.е. ситуации, когда полученное решающее правило, которое безошибочно классифицирует примеры из обучающей выборки, совершает много ошибок на тестовых выборках.

Недостаток деревьев решений состоит в том, что они реализуют наивный принцип последовательного просмотра признаков и не способны находить «лучшие» (наиболее полные и точные) правила в данных.

**Генетические алгоритмы.** Генетические алгоритмы — популярный вариант эволюционных алгоритмов. Они являются прежде всего средством решения разнообразных комбинаторных задач и задач оптимизации, но входят также и в стандартный набор инструментов Data Mining. Основой для создания генетических алгоритмов считается модель биологической эволюции и методы случайного поиска; производится имитация механизмов наследственности, изменчивости и естественного отбора в живой природе. Генетические алгоритмы работают со специально закодированными данными решаемой задачи — хромосомами (строками), состоящими из элементарных логических высказываний (генов). Все множество таких комбинаций называют популяцией хромосом. Для поиска оптимального решения вводится способ сопоставления хромосом — функция жизнеспособности, определяющая показатель качества, ценность строки (хромосомы). Вся работа генетического алгоритма направлена на поиск строки с максимальной жизнеспособностью, которая и станет решением задачи.

Популяция обрабатывается с помощью процедур репродукции, изменчивости (мутаций), генетической композиции. Наиболее важными среди этих процедур являются случайные мутации в индивидуальных хромосомах, обмен генами между хромосомами (кроссинговер) и рекомбинация генетического материала индивидуальных родительских хромосом (аналогично гетеросексуальной репродукции), миграции генов. Мутация состоит в том, что у случайно выбранной хромосомы изменяется один или несколько генов, в результате чего изменяются свой-

ства всей хромосомы. Отбор заключается в выборе пары «родителей» для последующего скрещивания. В ходе совершения процедур на каждой стадии эволюции получается популяция со все более совершенными индивидуумами, пока не будут выполнены заданные условия.

Генетические алгоритмы привлекательны тем, что их удобно распараллеливать. Например, можно разбить «поколение» на несколько групп и работать с каждой из них независимо, обеспечивая время от времени межгрупповой обмен несколькими хромосомами. Однако генетические алгоритмы имеют ряд серьезных недостатков. В частности, процесс создания исходного набора хромосом, критерии отбора хромосом и используемые процедуры являются эвристическими и не гарантируют нахождения «лучшего» решения. Как и в живой природе, эволюция может «заклиниться» на какой-либо непродуктивной ветви. И наоборот, два неперспективных «родителя», который будут исключены из эволюции генетическим алгоритмом, могут оказаться способными через несколько итераций произвести высокоэффективного потомка. Это особенно заметно при решении высокоразмерных задач со сложными внутренними связями. Генетические алгоритмы «капризны» в настройке и трудоемки при решении задач поиска логических закономерностей в данных. Генетические алгоритмы не составляют серьезной конкуренции деревьям решений и алгоритмам ограниченного перебора при решении задач поиска логических закономерностей в данных, несмотря на то, что оба последних метода тоже имеют свои принципиальные недостатки.

**Алгоритмы ограниченного перебора.** В середине 1960-х гг. М. М. Бонгард предложил алгоритмы ограниченного перебора для поиска логических закономерностей в данных. С тех пор метод показал свою эффективность при решении многих задач из самых различных областей. Эти алгоритмы вычисляют частоты комбинаций простых логических событий в подгруппах (классах) данных [20]. Примеры простых логических событий:  $X = C_1$ ;  $X < C_2$ ;  $X > C_3$ ;  $C_4 < X < C_5$  и др., где  $X$  — какой-либо параметр (поле),  $C_i$  — константы. Ограничением служит длина комбинации простых логических событий (у Бонгарда она была равна 3). На основании сравнения вычисленных частот в различных подгруппах данных делается заключение о полезности той или иной комбинации для установления ассоциации в данных, для классификации, прогнозирования и т.д.

Представителем подхода, реализующего ограниченный перебор, является система WizWhy предприятия WizSoft (<http://wizsoft.com>). Разработчики WizWhy выделяют следующие свойства системы: выявление BCEX if-then-правил; вычисление вероятности ошибки для каждого правила; определение наилучшей сегментации числовых переменных; вычисление прогностической силы каждого признака; выявление необычных феноменов в данных; ис-



пользование обнаруженных правил для прогнозирования; выражение прогноза в виде списка релевантных правил; вычисление ошибки прогноза; прогноз с учетом стоимости ошибок. Дополнительные достоинства системы таковы: на прогнозы системы не влияют субъективные причины; пользователям системы не требуются специальные знания в области прикладной статистики; вычисления более точны и быстры, чем у других методов Data Mining.

В специальном исследовании [20] были выявлены существенные недостатки известных систем для поиска логических правил. Все известные системы делают принципиальную ошибку уже на первом шаге своей работы. Алгоритмы построения деревьев решений наивно пытаются найти наилучший признак (корень дерева), который оптимальным образом разделяет выборку на части. Никакие математические ухищрения не способны исправить основной дефект подобного подхода, связанный с тем, что признак вырывается из целостной системы описания многомерного объекта (записи базы данных). В системах перебора принципиальная ошибка первого шага связана с поиском «оптимальной» сегментации количественных признаков. Нельзя найти наилучшее разбиение количественных признаков на интервалы, рассматривая каждый признак изолированно от всей системы признаков. Отмеченная проблема «первого шага» является производной от главной ключевой проблемы поиска if-then-правил в данных. Эта проблема связана с тем, что в принципе мы имеем здесь дело с задачей полного перебора комбинаций элементарных логических условий. Считается, что данная задача при высокой размерности пространства признаков не может быть решена за приемлемое время в обозримом будущем даже с помощью суперкомпьютеров. Поэтому известные подходы к поиску if-then-правил вынуждены использовать те или иные эвристические ограничения, и их результаты нередко представляют собой усеченные фрагменты истинных регулярностей в данных — «осколки знаний».

Поскольку заранее нельзя предугадать, какие интервалы исходных признаков (элементарные события) окажутся наилучшими для искомых if-then-правил, первый шаг работы алгоритма, претендующего на высокий результат, должен заключаться в максимально мелком (с учетом доступных вычислительных мощностей) разбиении исходных признаков на интервалы. Это, конечно, касается главным образом количественных признаков. По-видимому, нет иного пути для решения задачи сегментации признаков.

Эффективность какой-либо системы для поиска if-then-правил определяется способностью находить за приемлемое время лучшие (наиболее полные при заданной точности) правила для каждой записи базы данных. По мнению В.А.Дюка [19, 20], эта способность является главным критерием для оценки систем извлечения данных.

*Система Deep Data Diver*

В.А.Дюк [19, 20] предлагает новую систему нахождения логических закономерностей — Deep Data Diver ([www.datadiver.nw.fu](http://www.datadiver.nw.fu)), которая будет рассмотрена в гл. 4 применительно к задаче медицинского прогнозирования. Принцип системы основывается на представлениях специальной локальной геометрии. В этой геометрии каждый многомерный объект существует в собственном локальном пространстве событий с индивидуальной метрикой. За счет свойств локальных пространств комбинаторная проблема поиска логических закономерностей получает геометрическое истолкование. Технология такого поиска основывается на модифицированном аппарате линейной алгебры с использованием процедуры самоорганизации данных и эффекта информационного структурного резонанса.

Основные характеристики системы таковы [19]: 1) нахождение «лучших» (наиболее полных при заданной точности if-then-правил для каждой записи базы данных; 2) минимальные ошибки при решении задач классификации и распознавания; 3) построение и тестирование классификаторов данных на основе if-then-правил; 4) построение «нечетких» if-then-правил; 5) построение дендрограмм и исследование метаструктуры множества правил; 6) линейная зависимость времени работы алгоритма поиска от объема данных; 7) отсутствие ограничений на тип данных; 8) работа в условиях любого количества пропусков в данных; 9) работа в условиях «засоренных» данных; 10) использование приема «данные + шум», способствующего выявлению устойчивых закономерностей в данных; 11) нахождение непериодических шаблонов сложной формы в числовых и символьных рядах; 12) возможность распараллеливания в процессе поиска if-then-правил.

### **ДСМ-метод автоматического порождения гипотез**

С конца 1970-х гг. группа исследователей под руководством В. К. Финна во Всероссийском институте научной и технической информации РАН (ВИНИТИ) успешно продвигается в разработке логико-комбинаторного метода автоматического порождения гипотез — ДСМ-метода [52, 53, 67], получившего название от имени английского мыслителя Джона Стюарта Милля. Ядро ДСМ-метода составляют схемы правдоподобного вывода, описанные Дж. С. Миллем на рубеже XIX в. в виде концепции индуктивных методов и обобщенные, уточненные, расширенные средствами современной математической логики. ДСМ-метод формализует тип рассуждения с процедурно порождаемыми фальсификаторами, расширяющий возможности исследователя для построения аргументации на достаточном (в определенном смысле) основании в условиях неполноты информации, и представляет собой логико-комбинаторный метод обнаружения причинно-следственных зависимостей на основе правдоподобных рассуждений. Правдоподобные рассуждения типа ДСМ объединяют индукцию на эмпирических данных,

рассуждения по аналогии, конструктивную абдукцию и дедуктивные выводы.

Процедуры ДСМ-метода автоматического порождения гипотез (индукция, аналогия и абдукция, а также способ оценивания гипотез) адекватны ДСМ-онтологиям, т.е. предметным областям. ДСМ-метод автоматического порождения гипотез применим к таким открытым предметным областям (например фармакология, токсикология — см. 4.4.3), в которых знания слабо формализованы, а данные либо хорошо структурированы, либо допускают структуризацию, так что отношение сходства фактов может быть определено. Эти предметные области должны содержать положительные и отрицательные результаты относительно некоторых явлений или множеств свойств. Знания об этих предметных областях в неявном виде должны содержать причинно-следственные зависимости как положительного характера (событие приводит к эффекту), так и отрицательного характера (событие не позволяет эффекту возникнуть) [52, 53, 67].

ДСМ-рассуждение имеет такую структуру аргументации, что порождаемые положительные гипотезы принимаются, если есть аргументы «за» (гипотезы о положительных причинах исследуемых эффектов — т. е. причинах проявления этих эффектов) и отсутствуют аргументы «против» (гипотезы об отрицательных причинах, не допускающих возможность проявления исследуемых эффектов). Двойственная картина существует для принятия отрицательных гипотез, «запрещающих» проявление некоторых эффектов у соответствующих объектов.

Автоматизация ДСМ-рассуждений осуществляется в специально создаваемых Решателях задач, образованных тремя подсистемами — Рассуждателем, Вычислителем и Синтезатором. Рассуждатель реализует ДСМ-рассуждения, Вычислитель осуществляет процедуры обработки численных данных, а Синтезатор осуществляет взаимодействие Рассуждателя и Вычислителя [53]. Следовательно, решение задач по извлечению зависимостей из эмпирических данных реализуется специально создаваемыми интеллектуальными системами, а не отдельными программами или пакетами программ. В интерактивном режиме применения ДСМ-метода используемые идеи могут уточняться и преобразовываться в понятия. Таким образом, ДСМ-метод автоматического порождения гипотез является важным видом интеллектуального анализа данных.

Вернувшись к одному из самых популярных подходов к изображению логических закономерностей в Data Mining — к алгоритмам построения деревьев решений, следует упомянуть, как деревья решений, погруженные в так называемые полупроизведения дихотомических шкал, сопоставляются с ДСМ-гипотезами [31]. 1) Гипотезы соответствуют «наиболее осторожным» (наиболее частым) классификаторам, совместным с обучающей выборкой: они являются

наименее общими обобщениями описаний положительных примеров. 2) Кратчайшие пути из корней дерева решений в листья соответствуют «самым смелым» (или «самым различающим») классификаторам: будучи кратчайшими возможными правилами, они являются самыми обобщающими описаниями положительных примеров. В то же время нет гарантий, что для данной обучающей выборки существует такое дерево решений, когда минимальные гипотезы являются замыканиями путей решений, соответствующих ветвям дерева.

Завершая раздел об интеллектуальном анализе данных, следует перечислить признаки принадлежности программ анализа данных к интеллектуальным системам [52]: 1) способность программы упорядочивать данные по степени их существенности; 2) наличие логических средств порождения гипотез и вывода следствий; 3) способность к «рефлексии» — оценке своих результатов; 4) умение отвечать на вопрос «почему» при объяснении полученных результатов (например посредством абдукции); 5) способность реализовывать формализованную эвристику (например, синтез познавательных процедур — индукции, аналогии и абдукции); 6) наличие средств индуктивного (машинного) обучения; 7) способность адаптации к предметной области, т.е. способности сохранять формальную структуру применяемых стратегий (комбинаций процедур) при изменении структур данных и добавлении дескриптивных аксиом, отражающих предметную область. Интеллектуальные системы типа ДСМ применяются для прогнозирования свойств структурированных объектов в БД с неполной информацией для задач экспериментальной фармакологии и клинической фармакологии, а также биохимии (прогнозирование биологической активности и путей метаболизма веществ — см. 4.4.3), технической диагностики (распознавание дефектов изделий), социологии (порождение детерминант социального поведения), информационного поиска (автоматическая классификация).

### **1.10. РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ**

Теория распознавания была заложена в 1950-х — начале 60-х гг. (М.М.Бонгард, И. М. Гельфанд) как раздел кибернетики и уже вышла за рамки этой науки, приняв масштабы самостоятельного математического направления. «Распознавание образов» — это перевод с английского термина «pattern recognition», где «pattern» означает «шаблон», «образец», «образ». Под образом здесь понимается совокупность образцов, класс образцов, чем-то близких друг другу. Задача состоит в том, чтобы распознать данный неизвестный образец (объект, явление, ситуацию, процесс) и установить, к какому классу (образу) этот объект можно отнести («неизвестный зверь — кошка или мышка?»). Таким образом, направление связано с разработкой теоретических основ и практической реализацией устройств и систем, предназначенных для распознавания неизвестных объектов, явлений, ситуаций, процессов [58].

Примером распознавания может служить постановка медицинского диагноза. Прежде всего врач определяет симптомы и признаки болезни (см. 2.9), т.е. собирает так называемую апостериорную информацию о состоянии пациента. Затем врач сопоставляет ее с известными ему признаками заболевания — априорной информацией, полученной в ходе обучения в институте и в результате накопленного опыта, и содержащейся в его памяти. В итоге такого сопоставления врач определяет состояние пациента — болен он или нет, а если болен, то чем именно, т. е. ставит диагноз (распознает болезнь). Естественно, что чем больше априорной информации о каждой болезни врач в состоянии удержать в своей памяти, тем точнее он может поставить диагноз. Правда, достаточно трудно сказать, в чем состоит процесс сопоставления апостериорной информации о конкретном пациенте с априорными описаниями различных заболеваний; иначе говоря, какими алгоритмами распознавания пользуются врачи при постановке диагноза. В этом процессе принимают участие знания, опыт, память о прецедентах, а подчас — интуиция, озарение (инсайт).

Какова роль логического и интуитивного в распознавании образа (в постановке диагноза) [58]? Без интуиции человека распознавание не осуществимо. Действительно, исходных признаков достаточно много и часто число их комбинаций (конъюнкций) часто бывает факториально велико. При логическом подходе необходимо перебрать все конъюнкции, что недоступно ни человеку, ни компьютеру. В реальности выбор значимых признаков и их конъюнкций берет на себя врач, используя свой опыт и интуицию. Для формулирования решающего правила также необходимы интуиция врача и тезаурус программиста (знание языка, на котором построен конечный алгоритм).

Логическое распознавание имеет ряд достоинств (но и некоторые недостатки) [58]. 1) Нет необходимости делать переборы, что существенно ускоряет процесс. 2) Решающее правило позволяет провести интерполяцию внутри обучающего множества. При этом множество признаков, объектов, диагнозов их дискретного переходит в непрерывное. 3) Появляется возможность экстраполировать решающее правило за пределы обучающего множества. Экстраполяция всегда содержит гипотетический элемент. Если он оказывается оправданным, тогда логическое распознавание дает большие преимущества. Если он не оправдан, то логическое распознавание ведет к ошибке. При интуитивном распознавании объектов <sup>в</sup> не данного множества человек обращается к другим обучающим множествам и проверяет, действует ли там то же решающее правило. Это более длинный путь, но и более надежный. 4) Логическое распознавание допускает тиражирование, т.е. передачу решающего правила другим людям и использование его, минуя этап обучения. Пример — учебники по медицинской диагностике. 5) При формулировании ре-

шающего правила происходит свертка информации, количество ее уменьшается (поскольку детали опускаются). Но ценная информация сохраняется. Можно сказать, что решающее правило выглядит как абстракция по сравнению с интуитивным распознаванием. Это важно, когда человек имеет дело сразу с несколькими обучающими множествами. Запомнить процедуры распознавания во всех них практически невозможно, но запомнить решающие правила — реально. Следует подчеркнуть, что при логическом распознавании не возникает новая ценная информация, происходит лишь обработка воспринимаемой информации и выделение из нее ценной.

### 1.11. СЕМИОТИКА

*Семиотика* — наука о знаках — появилась в начале XX в. Ее основателем считается американский логик и философ Ч. С. Пирс, который и предложил ее название. Уже изначально семиотика представляла собой метанауку, особую надстройку над рядом наук, оперирующих понятием знака. Семиотика исследует знаковые системы, составляющие которых (знаки) могут иметь самую разнообразную природу, лишь бы в них можно было выделить три составляющие, которые связаны между собой *договорными* отношениями: синтактику (или план выражения), семантику (или план значения) и прагматику (или план использования).

Следует пояснить на примере [46], что означает договорность отношений, которыми связаны знаки. Допустим, у подпольной организации есть явка для встреч — квартира в городе. Прежде чем войти в квартиру, связной должен посмотреть на окно. Если на окне стоит определенный цветок — можно входить. Если стоит другой цветок — в квартире никого нет. Если цветок отсутствует — явка провалена. Так договорились подпольщики. Роль знака в этой ситуации играет цветок. Вид цветка или его отсутствие — синтак-тика знака, т. е. способ, которым знак выражен в действительности. О значении знака (семантике) только что было сказано. Прагматика очевидна: либо в квартиру можно войти, либо следует прийти позднее, либо немедленно уйти и сообщить членам организации о провале явки. (А что бывает, если забыть о знаке, напомним судьба профессора Плейшнера в фильме «Семнадцать мгновений весны».) Договорность всех составляющих знака делает знаковые системы чрезвычайно гибкими, способными обеспечить любые потребности пользователей таких систем. В этом основное отличие знаковых (семиотических) систем от строгих формальных систем, лежащих в основе логики (и математики).

В семиотике *знак* — материальный объект, которому при определенных условиях (образующих знаковую ситуацию) соответствует некоторое «значение», которое может быть чем угодно — реальной либо вымышленной вещью, явлением, процессом, абстрактным понятием. Знак имеет следующие свойства: 1) способность обозначать не единичный объект или конкрет-

ное явление, а целое их множество. Существует понятие «объем знака» (например объем знака «растение» больше по сравнению с объемом знака «дерево»); 2) способность вызывать у человека представления о характере обозначаемого знаком объекта или явления.

В семиотике нет общепризнанной классификации знаков. Наибольшее распространение получили два деления: 1) естественные знаки, ассоциирующиеся с природным объектом (например, «туча — знак дождя») и искусственные знаки, изобразительные (иконические), ассоциирующиеся с вещью в силу своего сходства, а также символы, или «условные знаки», не имеющие природно обусловленной связи и являющиеся таковыми только в силу «соглашения»; 2) языковые и неязыковые знаки.

Что такое с точки зрения семиотических представлений программа, написанная на некотором языке программирования для вычислительной машины? Способ ее написания на том или ином языке — это план ее выражения, т.е. синтактика программы, рассматриваемой как знак. Программисты отвлекаются от семантического аспекта обрабатываемой информации и рассматривают лишь ее знаково-структурный аспект, т.е. воспринимают информацию как цепочки символов, над которыми в компьютере должны производиться определенные действия для получения требуемого результата. Семантика программы (план выражения) — это ее смысловое содержание (какую именно задачу призвана решать данная программа и какое содержание заключено в каждой ее строке). Прагматика реализуется процессом ее выполнения на компьютере и обеспечивается конструкцией компьютера.

Теория знаковых систем позволяет установить аналогии в функционировании разнообразных систем как естественного, так и искусственного происхождения.

### 1.12. СИНЕРГЕТИКА

*Синергетика* — междисциплинарное научное направление, которое исследует общие закономерности в процессах образования, устойчивости и разрушения упорядоченных временных и Пространственных структур в сложных неравновесных системах Различной физической природы (физические, химические, биологические, социальные системы). Использование термина «синергетика» не является однозначным. Поэтому в теории систем предпочтение отдается обобщающему термину «самоорганизация», хотя используются и достижения синергетического подхода. В последнее время синергетика часто трактуется как *теория самоорганизации*.

Термин «синергетика» (от греч. «совместный, согласованно действующий») ввел немецкий физик Г.Хакен для обозначения нового междисциплинарного направления — теории самоорганизации [55]. По Хакену, модель самоорганизации — это *кооперация компонентов* для выхода на новый уровень развития. Термин подчеркивает принципиальную роль кооперативных

взаимодействий в возникновении и поддержании процессов самоорганизации в различных открытых системах. Процессу самоорганизации противоположен процесс деградации. Самоорганизация сложных систем составляет особую проблему, непосредственно связанную с понятием информации [5, 25, 38, 58]. О теории самоорганизации применительно к биологическим системам см. 3.3.5.

И. Пригожий пришел к идеям синергетики на основе анализа химических реакций, хотя и не использовал этот термин. Теоретическая основа его моделей — нелинейная термодинамика. Пригожий ввел понятие диссипативных структур (за эти работы он получил Нобелевскую премию по химии), возникающих при разрушении прежней и появлении из неупорядоченных однородных состояний качественно новой организации за счет *диссипации* (от лат. *dissipatio* — разгонять, рассеивать) энергии, использованной системой, и получения из среды новой энергии. Упорядоченные образования, возникающие в ходе диссипативных процессов, Пригожий назвал диссипативными структурами; они неустойчивы, и может возникнуть процесс последовательного перехода простейшей диссипативной структуры во все более упорядоченные. Точки, удаленные от состояния термодинамического равновесия, в которых возможно возникновение качественно новых структур, названы *точками бифуркации* (раздвоения, «выбора» пути развития или деградации системы).

Обязательное условие возникновения диссипативных структур — обмен энергии со средой (возможен обмен и энергией, и веществом), рассеяние использованной системой энергии и ввод новой (Пригожий назвал ее *отрицательной энтропией*), т.е. открытость системы. Впоследствии для исследования нелинейных термодинамических процессов были введены понятия: *динамический хаос*, *устойчивость неравновесных систем*, *аттрактор*.

*Аттрактор* буквально означает «притягивающее множество» (от англ. *attract* — притягивать, привлекать) — особое состояние равновесия, возникающее в динамических системах на уровне появления неустойчивостей и точек бифуркации. Аттракторы появляются, например, при исследовании фазовых переходов, полей, представляющих собой суперпозицию осцилляторов с континуумом частот, в которых наблюдаются резонансы при кратности определенной частоты.

Развитие биосферы характеризуется крайней неустойчивостью. Как и всякая существенно нелинейная динамическая система, биосфера способна развиваться в целом ряде аттракторов, образом которых может служить странный аттрактор Лоренца, а не классические аттракторы, которые изучает теория динамических систем. История биосферы представляется как цепь постоянных переходов из одного аттрактора в другой.



1. Термин «информация» относится к фундаментальным понятиям, которые в философии называются *категориями*. *Информация* — это обозначение содержания, полученного из внешнего мира в процессе нашего приспособления к нему и приспособливания к нему наших чувств. *Информация* — это разность между осведомленностью получателя до и после приема сообщения.

2. «Математическая теория связи» (концепция К. Шеннона) имеет следующие особенности, которые существенно повлияли на дальнейшее развитие классической (статистической) теории информации, (а) Отсутствует определение понятия «информация». Постулируется участие информации в любом природном и общественном явлении, (б) Термин «*количество информации*» означает статистическую (частотную) характеристику знаков, составляющих сообщение, т.е. относительные вероятности таких событий, как символы и сигналы. Мерой количества информации, связанной с каким-либо объектом или явлением, может служить редкость его встречаемости или сложность его структуры, (в) Теория не касается *содержания* (семантики) информации, передаваемой в сообщении. Не рассматривается вопрос о возникновении *ценной* информации, (г) По отношению к источнику сообщений применяется термин «*энтропия*».

3. Современная динамическая теория информации основывается на определениях информации как *запомненного выбора одного варианта из нескольких возможных и равноправных*, а также информации как *оператора* (алгоритма, или инструкции), который, будучи помещен в соответствующее пространство режимов, может совершать те или иные целенаправленные действия.

4. *Генерация информации* — это случайный выбор варианта из многих возможных и равноправных (т.е. принадлежащих одному множеству) вариантов. *Рецепция (запоминание) информации* означает перевод системы в одно определенное состояние независимо от того, в каком состоянии она находилась раньше.

5. К основным свойствам информации относятся: фиксируемость (и связанные с ней инвариантность, брэнность, изменчивость, транслируемость), действенность (и связанные с ней семантика, полипотентность, полезность, истинность), ценность.

6. Развитие информационных наук шло от документалистики к таким современным направлениям, как информатика, вычислительные науки, системы искусственного интеллекта.

7. *Информатика* — это научная дисциплина, предмет исследования которой составляют структура, свойства и закономерности семантической информации, процессы ее сбора, переработки, хранения, поиска и распространения (передачи), а также особенности ее использования

различными категориями потребителей. Один из главных объектов информатики — *система научной коммуникации*, от которой в значительной степени зависят темпы развития науки и техники, а также эффективность всей системы интеллектуальной (информационной) коммуникации в обществе.

8. Понятие «*вычислительные науки*» не следует считать синонимом названий «информационные науки» или «информатика». Вычислительные науки включают математические, технологические и технические направления, теоретическую работу (создание концептуальных схем, объясняющих работу ЭВМ) и инновационную (поиск новых компьютерных систем и прикладных программ).

9. *Кибернетика* — наука об «управлении и связи в живом организме и машине» (Н.Винер). Сейчас термин «кибернетика» используется как: а) обобщающее обозначение междисциплинарных направлений; б) название направления теории систем и системного анализа, занимающегося процессами управления, в основном техническими объектами.

10. *Когнитивная наука* изучает познавательные процессы. Это группа дисциплин, среди которых ведущую роль играют когнитивная психология, искусственный интеллект, философия познания, нейрофизиология, лингвистика. Приоритетные проблемы когнитивных наук: представление знания (в частности, в терминах компьютерных программ), перевод с одного языка на другой, распознавание образов, обучение, решение проблем, планирование.

11. Понятие «*система*» используется, когда нужно охарактеризовать объект как нечто целое (единое), сложное (о чем невозможно дать сразу полное представление), показав его, изобразив графически или описав математическим выражением. *Системный анализ* — единственная специальность в разделе информационных дисциплин (05.13.00) «Номенклатуры специальностей научных работников», по которой в России возможно присуждение ученой степени по биологическим и медицинским наукам.

12. *Искусственный интеллект* — дисциплина об имитации и усилении рассуждений, а также о восприятии и переработке информации посредством компьютера. Интеллектуальную систему можно определить как компьютерную систему для решения классов задач, которые либо не могут быть решены человеком в реальное время, либо их решение требует автоматизированной поддержки, либо их решение дает результаты, сопоставимые по информативности с решениями человека.

13. Основная идея *интеллектуального анализа данных* состоит в том, что из неупорядоченных и неформализованных данных можно посредством различных формальных методов (перерабатывающих эти данные с помощью некоторых алгоритмов в интерпретируемые ре-

зультаты) извлечь в явном виде такие знания, которые до применения этих методов были скрыты в массиве данных. Под *обнаружением знаний* в базах данных («knowledge discovery in databases») имеется в виду какой-либо нетривиальный процесс идентификации достоверных, новых, потенциально полезных и хорошо понимаемых шаблонов (паттернов, образцов) в данных. Под *извлечением данных* («data mining»; иногда употребляется как синоним «knowledge discovery in database») понимают этап процесса обнаружения знаний в базах данных, который состоит в применении специфических алгоритмов порождения паттернов, добытых из имеющегося множества фактов — базы данных, или «хранилища данных».

14. *Распознавание образов* — самостоятельное математическое направление (исходно — раздел кибернетики), связанное с разработкой теоретических основ и практической реализацией устройств и систем, предназначенных для распознавания неизвестных объектов, явлений, ситуаций, процессов.

15. *Семиотика* исследует знаковые системы, в которых можно выделить три составляющие: синтактику, семантику и прагматику. Знаки могут иметь самую разнообразную природу.

16. *Синергетика {теория самоорганизации}* — междисциплинарное научное направление, которое исследует общие закономерности в процессах образования, устойчивости и разрушения упорядоченных временных и пространственных структур в сложных неравновесных системах различной физической природы (физические, химические, биологические, социальные системы).

