

XIII  
390859

# УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТ

Под редакцией

А. И. БЕРГА, Б. В. БИРЮКОВА,  
Е. С. ГЕЛЛЕРА, Г. Н. ПОВАРОВА



Издательство «Мысль»

Москва • 1976



680.1

У67

ФИЛОСОФСКОЕ ОБЩЕСТВО СССР

НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО КОМПЛЕКСНОЙ ПРОБЛЕМЕ  
«КИБЕРНЕТИКА» АН СССР

РЕДАКЦИИ

ФИЛОСОФСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

## ОТ РЕДАКТОРОВ

230 8242  
Эта книга посвящена философско-методологической проблематике кибернетики, как она вырисовывается в работах преимущественно отечественных ученых. Идея ее создания возникла на конференции по методологическим вопросам кибернетики, состоявшейся в Москве в 1970 г. Книга написана большим коллективом специалистов. Взгляды ее авторов — при всем их различии, которое, несомненно, заметит читатель, — объединяет общий замысел, и прежде всего стремление отразить *новое* в философско-кибернетической проблематике.

Изложение последовательно развивается от общих методологических проблем науки об управлении к обсуждению вопросов методологии, связанных с большими системами, информацией и «искусственным интеллектом». Авторы и редакторы старались не перегружать монографию формульным аппаратом, ограничиваясь необходимым минимумом.

Книга не претендует на полноту освещения всего громадного спектра философско-методологических вопросов кибернетики. Однако можно надеяться, что она дает достаточно цельное представление о характере движения в философско-кибернетической сфере, продолжая в этом отношении книгу «Кибернетика, мышление, жизнь», выпущенную издательством «Мысль» в 1964 г.

В первой части книги глава I написана А. И. Бергом и Б. В. Бирюковым; глава II — Н. Н. Воробьевым; глава III — И. Б. Новиком, Ю. И. Кулаковым и Б. В. Бирюковым (параграф 3 — при участии М. Г. Гаазе-Рапопорта); глава IV — Б. В. Бирюковым и Е. С. Геллером (вводная часть главы, параграфы 2 и 3), Ю. А. Шрейдером (параграф 1).

Во второй части глава I написана М. Г. Гаазе-Рапопортом (при участии Г. Н. Поварова); глава II — В. Л. Хар-

тоном (при участии Г. Н. Поварова); глава III — Ю. А. Шрейдером; глава IV — Г. Н. Поваровым.

В третьей части глава I написана Б. В. Бирюковым, А. Д. Урсулом и Г. Н. Поваровым (параграф 1), А. Д. Урсулом и В. Н. Тростниковым (параграф 2, при участии Г. Н. Поварова), А. Д. Урсулом и Б. В. Бирюковым (3), Е. С. Геллером и А. Д. Урсулом (4); глава II — И. И. Гришкиным; глава III — Д. И. Дубровским (вводная часть и заключение — В. И. Дубовским и А. Д. Урсулом); глава IV — Б. В. Бирюковым и В. С. Будниковым (вводная часть, параграфы 1 — 3), Б. В. Бирюковым (4).

В четвертой части глава I написана Б. В. Бирюковым, Ю. Н. Поповым и Г. Н. Поваровым (вводная часть и параграф 1), Б. В. Бирюковым, И. Б. Гутчиным и Г. Н. Поваровым (2), Б. В. Бирюковым и Ю. Н. Поповым (3); глава II — В. М. Глушковым (вводная часть, параграфы 1 и 2) и З. Л. Рабиновичем (3 и 4); глава III — Р. Х. Зариповым; глава IV — Л. Б. Баженовым и И. Б. Гутчиным.

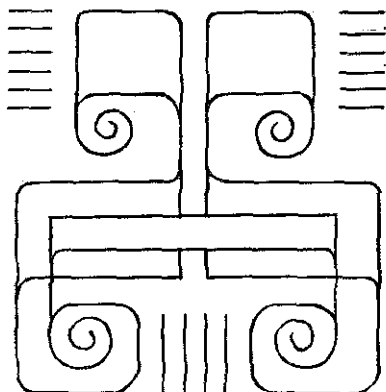
Редакторы благодарны А. В. Напалкову и Т. Гольдбер за оказанную помощь в работе над книгой.

*А. И. Берг  
Б. В. Бирюков  
Е. С. Геллер  
Г. Н. Поваров*



О КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ  
АСПЕКТАХ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО  
ПРОГРЕССА

I



Глава I	
КИБЕРНЕТИКА И СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ	6
Глава II	
ПРОБЛЕМА МАТЕМАТИЗАЦИИ ЗНАНИЯ	24
Глава III	
«ФИЗИКАЛИСТСКИЙ» И ТЕОРЕТИКО-СИСТЕМНЫЙ АСПЕКТЫ КИБЕРНЕТИКИ	43
Глава IV	
КИБЕРНЕТИКА И ГУМАНИЗАЦИЯ ЗНАНИЯ: РОЛЬ ЛОГИЧЕСКИХ ИДЕЙ	71

## Глава I

# КИБЕРНЕТИКА И СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

В эпоху, когда наука все более превращается в непосредственную производительную силу, ускоренный научно-технический прогресс имеет кардинальное значение для развития всего общественного производства. Современная революция в науке и технике — явление закономерное. Невиданный для прежних периодов истории уровень производства с его высокой концентрацией и централизацией, сильнейшей технической оснащенностью вызвал к жизни новое взаимоотношение между промышленностью, транспортом, связью, другими отраслями народного хозяйства и наукой. Суть его в том, что производство ныне *требует* применения результатов науки, *прямо зависит* от научно-технических разработок. В то же время современная промышленность дает в руки ученых такие технические и энергетические возможности, о которых не могли и мечтать исследователи и изобретатели в прошлом. В итоге наука все больше «пронизывает» всю систему общественного производства.

Переворот в науке и технике неизбежно влечет за собой переворот в методах организации и управления. Наиболее впечатляющее проявление последнего — разворачивающийся процесс *автоматизации* и *кибернетизации* общественного производства, административного и хозяйственного управления<sup>1</sup>.

## 1. СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ СФЕРА

Известно, что проблему научной организации труда и управленческой деятельности со всей определенностью поставил В. И. Ленин уже в первые месяцы Советской

<sup>1</sup> При этом под кибернетизацией понимается автоматизация отдельных видов интеллектуального труда и процессов управления, которые недавно мог осуществлять только человек.

власти. В частности, он писал, что «все своеобразие переживаемого момента, вся трудность состоит в том, чтобы понять *особенности перехода* от главной задачи убеждения народа и военного подавления эксплуататоров к главной задаче *управления*»<sup>1</sup>. Реализация этой задачи привела к разработке теоретических и практических проблем научной организации труда — НОТ.

За годы, отделяющие нас от этого периода, народное хозяйство нашей страны выросло в сотни раз. В области организации труда и управления социально-экономическими процессами накоплен большой опыт. Однако быстрое развитие народного хозяйства, гигантский рост масштабов планирования все настойчивее требуют дальнейшего улучшения существующих методов управления и организации. Необходимость повышения эффективности работы предприятий и организаций ощущается ныне настолько, что прежние методы нахождения рациональных решений уже не удовлетворяют.

Аналогичная ситуация сложилась и в науке. Ее прогресс означает переработку всевозрастающих массивов информации; во всех областях науки, и особенно в прикладных, на первое место выдвигаются организованные исследования, проводимые научными коллективами. Современная наука — это деятельность не столько отдельных ученых, сколько крупных научных организаций.

Развитие общества требует непрерывного роста эффективности человеческой деятельности в сферах производства, административного управления, обучения, охраны здоровья трудящихся, научного творчества и др. Решение этих задач невозможно без широкого применения кибернетики.

Кибернетика — это отклик научного познания и техники середины нашего века на социальную потребность в решении точными средствами проблем управления и организации. Она пользуется мощными теоретическими и инженерными средствами. За последние два десятилетия кибернетика в нашей стране получила огромное развитие и опирается на могучий арсенал математики, теории информации, логики, радиоэлектроники, автоматики и других наук; прогресс происходил как в теоретических исследованиях, так и в практических приложениях. Плодотворность — и, более того, необходимость — кибернетических методов в применении к различным и многообразным сторонам управлен-

<sup>1</sup> В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 33, стр. 172—173.

ческой и научной деятельности стала совершенно очевидной.

В самом деле, путь кибернетики — это исследование общих закономерностей процессов управления в различных областях. При этом процессы и акты управления неотделимы от процедур переработки информации. Эффективность управления — это прежде всего рациональная организация информационных процессов. Однако для современного мира — мира сложных систем — это труднейшая задача. Для нормального функционирования социальных структур требуется обработка очень больших массивов информации. При этом сроки такой обработки лимитированы объективными условиями.

В последующих главах мы рассмотрим подробнее феномен растущей сложности систем и различные теоретические подходы к его анализу. Здесь же дадим некоторые достаточно простые пояснения, которые помогают составить более «живое» представление о проблеме.

Сложность системы выражается прежде всего в числе ее элементов. Но вместе с числом элементов растет — и притом гораздо быстрее — число возможных состояний системы, возможных связей между элементами и число возможных систем, образованных из этих элементов.

На основании этого можно представить потенциальную сложность и разнообразие таких систем, как человеческий мозг, состоящий в общем из  $10^{10}$  элементов (нервных клеток), в первом приближении двухпозиционных. Попытка перебрать или просмотреть их состояния и структуры обычными методами была бы с самого начала обречена на неудачу. Но рациональный, научно обоснованный анализ и синтез больших систем требует тем не менее в той или иной форме такого перебора, что и составляет один из важнейших аспектов современной проблемы сложности. С этим аспектом мы постоянно сталкиваемся в математике, кибернетике, системотехнике, физике, химии, биологии, экономике и др. Отсюда — трудности управления, трудности переработки информации в современной экономике, трудности осуществления управляющих воздействий на феномены культуры и социальные структуры вообще, принадлежащие, как правило, к большим системам.

Преодоление этих трудностей — залог дальнейшего повышения эффективности труда. Улучшение сбора информации, ее анализа и переработки как необходимых условий принятия решений становится жизненной проблемой. Ис-

пользование одних лишь специфически человеческих возможностей здесь уже явно недостаточно. Скорость реакции человека ограничена и не превышает 0,2 сек. В общении человека с ЭВМ «узким местом» является именно человек. Подсчитано, что до недавнего времени на общение человека и ЭВМ затрачивалось до 90% машинного времени. Это и не удивительно, ибо скорость переработки информации человеком составляет, по данным психологов (они не всегда однозначны), от 7—9 до 70 бит<sup>1</sup>. Современные же ЭВМ выполняют миллионы операций в секунду, каждая из которых, конечно, сложнее, чем простой выбор из двух равновероятных альтернатив, порождающих упомянутую единицу измерения количества информации.

В свете этого очевидно, что реализация обязательных условий добротного управления, планирования и организации — оперативность переработки информации, четкость и полнота сведений, поступающих по каналам связи, своевременность получения информации, ее непротиворечивость, надежность ее переработки, обоснованность решений, быстрая передача «команд управления» нижестоящим звеньям для исполнения — все это просто *невозможно без современных вычислительных систем*.

Кибернетика служит, таким образом, источником научных (теоретических) и инженерных (технических) средств решения проблем сложности и информации. На наших глазах возникает то, что нередко называют индустрией информации. Советская школа кибернетики, используя все лучшее, созданное отечественной и мировой научной мыслью, ставит теоретические и технические средства новой науки управления на службу советскому обществу, осуществляющему грандиозные планы социального развития.

Процессы управления и информационные процессы, изучаемые в кибернетике, имеют место в объектах, которые называются *сложными динамическими системами*<sup>2</sup>. Для описания этих процедур и процессов используется целый комплекс понятий, таких, как «канал передачи информации», «обратная связь», «кодирование», «гомеостаз», «цель» (управления), «самонастройка», «обучение» (системы), «адаптация»,

<sup>1</sup> Это различие в данных зависит, по-видимому, от методики исследования. Кроме того, следует иметь в виду различие в скорости (и тем более характере) переработки информации на уровнях ощущения и восприятия, образного мышления, на словесно-логическом уровне и т. п.

<sup>2</sup> См. А. И. Берг. Кибернетика — наука об оптимальном управлении. М. — Л., 1964.

«оптимизация» и др. Многие из этих понятий и связанных с ними проблем важны для конструирования и моделирования сложных кибернетических систем современной техники и для их использования при решении проблем управления в социально-экономической сфере. Кибернетика имеет важнейшее значение для решения указанных проблем, потому что является основой комплексной автоматизации, охватывающей также и сферу интеллектуального труда человека. На первом месте здесь идет электронно-вычислительная техника — ядро технических решений кибернетики, таких, как автоматические системы управления в промышленности или информационные системы в науке.

Действительно, какую бы область общественного производства, планирования и социально-экономического управления, современной техники, опытно-конструкторских работ и т. п. ни взять, везде налицо большие системы — промышленные, финансовые, транспортные, административные и другие организации, сложнейшие быстродействующие агрегаты и устройства, системы, обладающие огромным числом параметров, изменяющих свое значение по сложным закономерностям. Эффективное управление этими системами невозможно без автоматизации процессов и актов управления, без передачи сложнейших расчетов современным автоматам. При этом наивысшей формой повышения эффективности труда и управления является их оптимизация.

Кибернетику — этот взгляд прочно установился в отечественной литературе — можно понимать как науку об *оптимальном* (т. е. наивыгоднейшем, в определенном каждый раз строго уточняемом смысле) *управлении сложными динамическими системами*, науку о достижении поставленных целей с наименьшими затратами труда, времени, материалов, энергии и информации. Проблемы оптимизации — в широком смысле этого понятия — теоретические (модельно-математические) и практико-технические (связанные с построением автоматических систем и применением ЭВМ) аспекты оптимизации — это в конечном счете один из самых важных факторов в том «сознательном направлении» развития материальной и духовной культуры, о котором писал К. Маркс. Разработка вопросов оптимизации и их приложений ныне идет на всех трех основных уровнях кибернетики: теоретическом, техническом и прикладном.

Начнем с проблем социального управления, относящихся к повышению эффективности *труда*, т. е. прежде всего к проблематике экономической кибернетики.

Экономико-кибернетическая проблематика в значительной степени группируется вокруг оптимизации *планирования*, особенно планирования перспективного. Разработка долгосрочных планов развития народного хозяйства СССР, использующая прогнозы научно-технического прогресса, демографических процессов, динамики освоения природных ресурсов и др., непосредственно связана с построением экономико-математических моделей. Процедура разработки оптимального перспективного народнохозяйственного плана представляет собой сложный многоступенчатый процесс, в котором используются три основных «блока» экономико-математических моделей: модели общего народнохозяйственного плана, ориентированные на непосредственное достижение целей, стоящих перед обществом; модели отраслей народного хозяйства; модели экономики союзных республик и территориально-производственных комплексов. При этом естественно возникает вопрос о критериях оптимизации.

Поэтому создание методологии и методики оптимального перспективного планирования предполагает формулировку целей, стоящих перед обществом, их детализацию в иерархической системе экономических объектов в качестве конкретных задач, ибо критерии оптимизации производны от подлежащих реализации целей. Эта проблема отнюдь не является простой, так как большие системы — это системы, подсистемы которых могут иметь противоречащие критерии оптимизации (и цели), и критерии эти могут противоречить целям системы в целом.

Для оптимизации планов, далее, требуется научно-технический и социально-экономический *прогноз* направлений развития общественного производства и разработка народнохозяйственных программ реализации генеральных целей общества и развития ресурсов, обеспечивающих реализацию. Оптимальный народнохозяйственный план (точнее, модель такого плана) мыслится как завершающий этап этой работы <sup>1</sup>.

Следует подчеркнуть, что проблемы оптимизации, в какой бы сфере они ни рассматривались (экономика и сфера административного управления здесь только важные частные случаи), принадлежат к числу самых тонких и трудных

<sup>1</sup> См. Ю. И. Черняк, В. Я. Деренковский. Экономическая кибернетика. — «Информационные материалы» Научного совета по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР, вып. 49. М., 1971.

в теоретической кибернетике. Наличие различных, несовпадающих друг с другом и весьма часто противоречивых целей функционирования систем и их элементов; возникающие на этой основе конфликтные ситуации; фактор неопределенности, властно вторгающийся в процессы прогнозирования и планирования и порождаемый многовариантностью возможного развития, запутанностью конфликтов, в которых участвуют многочисленные стороны, интересы которых могут находиться в весьма «запутанных» отношениях; трудности формулирования и тем более формализации критериев оптимальности, которые могут не совпадать друг с другом и поэтому порождать весьма различные модели описания сложных систем и управления ими, — все это превращает данную проблему фактически в одну из главных в кибернетике и математизации. Одним из направлений, в котором сосредоточиваются усилия для ее решения, является применение идейного и математического аппарата теории исследования операций, теории игр, математической теории планирования эксперимента и т. п.

Экономическая оптимизация не может решаться средствами лишь математики, кибернетики (хотя бы и «экономической») и ЭВМ. Кардинальной важности вопрос о целях (точнее, системе целей) социально-экономических структур носит существенно более общий и широкий характер, зависящий от решений, которые принимаются на государственном уровне. Все это предполагает разработку *методологии экономических решений и методов переработки информации об экономических структурах*.

Широкое практическое использование принципа оптимальности в экономическом управлении, в той мере, в какой он фактически осуществим, возможно лишь на пути создания сети связанных друг с другом *автоматизированных систем управления (АСУ)* применительно к народнохозяйственным объектам различного уровня и широкого развития не просто вычислительных центров, а *вычислительных систем*, состоящих из десятков ЭВМ. Связанные друг с другом каналами связи, функционирующие на основе единого математического обеспечения, такие системы с помощью терминалов, выносимых за сотни и тысячи километров от центра системы, могут обслуживать целые страны и континенты.

Мы уже говорили о том, что кибернетика всюду, где она применяется, вносит принцип оптимальности. Важна, однако, не только теоретическая, т. е. чисто математическая,



постановка задач на определение оптимума; еще более важно то, что наука о процессах управления в сложных динамических системах, машинная математика и вычислительная техника дают реальную возможность находить оптимальные решения. Практика это наглядно показала. Принцип оптимальности получает все более широкое применение в решении таких важных задач, как определение оптимального варианта структуры отрасли промышленности, оптимизация управления деятельностью производств и предприятий, оптимальное текущее планирование на различных уровнях, наконец, внесение принципа оптимальности в планы социального развития и т. д. Разработаны методы решения таких задач, как определение оптимальных вариантов размещения предприятий и развития производительных сил; распределение дефицитных материалов, изделий и услуг; нахождение требуемых структур и очередности строительства; определение наилучшего состава производимой продукции; оптимизация транспортных перевозок, прикрепление поставщиков к потребителям, получение готового продукта высокого качества в возможно короткое время и т. д.

Все эти разработки основываются на соответствующих экономико-математических моделях. Обычно указываются такие направления экономико-математического моделирования, как модели оптимального долгосрочного, среднесрочного и текущего планирования для макроэкономических структур различных уровней (относящиеся, например, к распределению капитальных вложений, размещению производства, отраслевому планированию и т. д.) и модели оптимального планирования и текущего оперативного управления для микроэкономических объектов (производственных объединений, промышленных предприятий, транспортных организаций). Многие модели обоих типов получили реальное применение в автоматизированных системах управления.

Известно, что различаются две основные категории АСУ: автоматизированные системы управления предприятиями (АСУП) и отраслевые системы (ОАСУ). В применении к первым активно разрабатываются понятийный аппарат и методики исследования процессов управления потоками информации на промышленных предприятиях, принципы создания и работы АСУП; в этой связи экономической кибернетикой поставлена и решается задача выработки типовых структур систем управления для промышленных,

транспортных, строительных и других предприятий. Автоматизированные системы управления предприятиями являются базой для работ по отраслевым автоматизированным системам управления. Создаются методики разработки и конструирования автоматизированных систем управления для разных групп отраслей, например характеризующихся дискретным или непрерывным характером производства, длительным технологическим циклом и т. п., а также для непроектируемых объектов типа министерств, управлений и т. д.

Вся эта огромная работа — реализация Директив XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 гг., которые требуют подчинить работы по созданию и внедрению автоматизированных систем планирования и управления задаче создания общесоюзной системы сбора и обработки информации для учета, планирования и управления народным хозяйством на базе государственной сети вычислительных центров и единой автоматизированной сети связи страны<sup>1</sup>. Как указывал Д. Г. Жимерин, в единую систему управления в масштабах всей страны в качестве функциональных звеньев должны войти автоматизированная система плановых расчетов Госплана СССР и госпланов союзных республик, автоматизированные системы управления отраслевых министерств и ведомств, построенных по территориальному принципу (Госснаб СССР, Госбанк СССР, Минсельхоз, «Союзсельхозтехника», транспортные министерства и др.); автоматизированные системы центральных органов (ЦСУ, Госстандарт СССР, комитеты и др.); автоматизированная система управления научно-техническим прогрессом. Технической базой всей этой грандиозной системы явится государственная сеть вычислительных центров, ядром которой станет Главный вычислительный центр и Общегосударственная система передачи данных, составляющая часть Единой автоматизированной системы связи страны<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> См. «Материалы XXIV съезда КПСС». М., 1971, стр. 174—175.

<sup>2</sup> См. Д. Г. Жимерин. Проблемы автоматизации управления. — «Автоматизированные системы управления. Применение вычислительной техники и автоматизированных систем управления на предприятиях и в отраслях промышленности». М., 1972. В этой связи уместно вспомнить то определение кибернетики, которое задолго до Винера, в начале XIX в., было дано Ампером: кибернетика — это наука об управлении государством.

## 2. НАУКА

Научно-техническая революция — это также важные сдвиги в методах научного исследования, в значительной мере связанные с кибернетикой. Одна из ведущих тенденций современного научного прогресса — «кибернетизация» знания.

Кибернетика привела к проникновению в познание большого числа математических методов. О некоторых методологических чертах этого процесса речь пойдет в следующих главах. Здесь мы хотим подчеркнуть, что идущие от кибернетики приемы моделирования (исследования процессов на их моделях) и алгоритмизации (представления изучаемых явлений в виде процедур, подчиняющихся четким правилам) превратились в общенаучные методы исследования<sup>1</sup>. Сложились или получили дальнейшее развитие многие важные новые направления исследований. К их числу, в частности, принадлежат теория управляющих систем и конечных автоматов, теория информации, включая проблемы оптимального и помехоустойчивого кодирования, теория информационных систем, теория и методы машинного распознавания объектов, математическая теория планирования научного и производственного эксперимента, биоккибернетика и медицинская кибернетика и др. Настоятельно ищутся пути создания адекватных математических теорий больших (сверхсложных) систем, эвристические методы решения задач на машинах и др.

Примечательные сдвиги происходят в более «старых» научных областях. «Феномен кибернетики» начинает влиять на облик многих наук, прежде всего математики. Математика (не только в своей прикладной, но и в теоретической части) все более становится *математикой вычислительной*, причем горизонты возможностей последней гигантски раздвигает электронная цифровая техника. Это приводит к возрастанию в ее теоретической части влияния «конечных» методов. Мы уже не говорим о кибернетических постановках задач, воздействие которых на математическую мысль в ее разнообразных ответвлениях трудно переоценить.

Кибернетизация охватывает широкий комплекс естественных и гуманитарных наук. Одним из проявлений кибернетизации является требование точности, которое все

<sup>1</sup> Подробнее о связанных с кибернетикой общенаучных методах исследования см.: Б. В. Бирюков, Кибернетика и методология науки, гл. II. М., 1974.

настойчивее звучит в этих науках. Так, за последние годы в нашей стране проведен ряд симпозиумов по проблемам применения математико-кибернетических методов в исследованиях культуры и искусства<sup>1</sup>. В числе проблем, на них обсуждавшихся, были, например, вопросы управления учреждениями культуры (театра, кино, радио), основанные на анализе коммуникаций в соответствующих областях (отношений «кинокартина — зритель», «радиопередача — слушатель») с адекватной математической обработкой фактического материала. Такого рода исследования (включая построение моделей коммуникаций в области культуры и искусства, математических описаний аспектов творческой деятельности и т. п.) ныне все более широко «выходят» на ЭВМ. Лишь последние могут открыть дорогу кибернетическому анализу массового материала, относящегося к феноменам культуры и искусства, к взаимоотношениям между создаваемыми культурными ценностями и их «потребителями»<sup>2</sup>.

Конечно, утверждение математико-кибернетических методов не происходит гладко, новые методы не всегда воспринимаются с должным пониманием. Если вернуться к приведенному примеру о кибернетизации исследований культуры и искусства, то мы еще слышим голоса тех, кто не очень верит в возможности применения новых методов в этой области, противопоставляет математическому моделированию определенных сторон культуры требование их содержательного анализа. Но жизнь берет свое, и кибернетические, математические, количественные методы постепенно внедряются во все области знаний и труда человека. Дело идет к тому, что противопоставление описательных, «качественных» наук наукам «точным» постепенно утрачивается<sup>3</sup>. Например, средства математики, электроники и кибернетики в биолого-медицинском цикле наук начали использоваться в СССР с конца 50-х годов. Созданы машинные программы диагностики некоторых серьезных заболеваний. Методы автоматической диагностики для ряда болез-

<sup>1</sup> См. «Точные методы в исследованиях культуры и искусства». Материалы к симпозиуму, ч. 1—3. М., 1971; «Точные методы и музыкальное искусство». Материалы к симпозиуму. Ростов н/Д., 1972; «Содружество наук и тайны творчества». Материалы к симпозиуму. М., 1968.

<sup>2</sup> См. А. Моль, В. Фукс, М. Касслер. Искусство и ЭВМ. М., 1975.

<sup>3</sup> В применении к исследованию культуры и искусства этот процесс рассмотрен в кн.: Б. В. Бирюков, Е. С. Геллер. Кибернетика в гуманитарных науках, гл. 4. М., 1973.

ней прошли клиническую проверку и уже применяются в практике.

230 8242  
Кибернетические идеи, средства и методы все более пронизывают науку и технику. Трудно переоценить их значение для проектных и конструкторских работ, для исследований, главным результатом которых должно быть предвидение будущего объекта или процесса. Это, в частности, касается создания новых типов устройств, приборов, аппаратуры для научных исследований. Многие виды такой аппаратуры в силу своей сложности вообще ныне создаются только благодаря применению в их расчете и конструировании средств машинной математики. А вот пример из другой области. В нашей печати уже писали о том, что для составления полностью сбалансированного плана «вручную» подчас требуется больше времени, чем для его выполнения, и применение математико-кибернетических методов оказывается здесь просто необходимым. Так, для решения вопроса о размещении крупных производственных комплексов типа автостроительного комплекса в г. Тольятти приходится анализировать более тысячи вариантов, отличающихся уровнем затрат на строительство и эксплуатацию объекта, условиями снабжения сырьем, сбыта продукции и т. д.; эти вопросы решаются с применением экономико-кибернетических методов и ЭЦВМ.

Особо следует сказать об известной задаче создания *информационно-поисковых систем* (ИПС) для отдельных отраслей знания. Ныне ясно, в каком направлении претерпевают изменения сами формы ИПС. Первоначально их функции мыслились по аналогии с функциями обычных библиотек и архивов: выдача документа (скажем, статьи), известного абоненту, по его заказу. ИПС вносила в эту процедуру механизацию и автоматизацию, и проблема состояла главным образом в том, как научить ИПС (как вложить ее в ЭВМ, если ИПС строится на ее базе) производить подборку документов по более или менее сложному поисковому запросу. Теперь главные теоретические усилия направлены на разработку комплексных ИПС, обладающих «реферативными способностями». Такие ИПС все чаще называют банками данных. Банки данных — это информационно-логические системы, которые по замыслу должны обеспечивать целенаправленную (заданную в запросе абонента) математическую, статистическую, логическую и т. п. переработку информации, содержащейся в документах. Результатом должен быть не текст, заранее заложенный

в ИПС или построенный по достаточно простым шаблонам из хранимых в памяти системы субтекстов, и не стандартные сведения о текстах (например, библиографическое описание или реферат, хранимый в запоминающем устройстве ИПС), а сложные и разнообразные по форме и содержанию тексты, сформулированные в самой системе и представляемые в форме, доступной для непосредственного познания абонентом.

Очевидно революционизирующее значение такого рода логических ИПС коллективного пользования. Порожденные успехами электронной вычислительной техники и техники передачи информации, поскольку они строятся как системы ЭВМ, устройств долговременного хранения информации, многочисленных приборов ввода и вывода информации (в том числе и в «плоскостной», графической форме), к которым по линиям связи подключается множество абонентов, нередко удаленных от системы на сотни и даже тысячи километров, такие ИПС начинают фундаментально менять «стиль» научной работы. Возникает метод «совместного» человеко-машинного исследования, при котором специалисты работают в режиме диалога с вычислительной системой, ставя ей вопросы, получая ответы, обогащая ее память полученными ими результатами и проводя через систему заочные коллективные обсуждения интересных проблем.

Новые процессы документирования (перманентное тиражирование оригинальных документов, периодическое копирование подлинников и копий, машинное составление новых документов) и новые ответственные функции машин (информационный поиск, управление, принятие решений) «создают ряд сложных не только моральных, но и юридических проблем, которые все еще решаются недостаточно энергично»<sup>1</sup>. Над путями решения этих проблем, безусловно, придется думать уже в ближайшем будущем.

Известно значение фактора *времени* в условиях научно-технической революции. Иногда полагают, что этот фактор касается в основном управления быстродействующими процессами промышленной технологии или быстродействующими аппаратами на производстве, на транспорте и в связи: ведь управление здесь зачастую просто невозможно без

<sup>1</sup> Л. С. Алексеев и др. О Шестом международном конгрессе по кибернетике в Намюре (Бельгия). — «Информационные материалы» Научного совета по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР, вып. 4 (51). М., 1971, стр. 19.

эффективного использования автоматов и ЭВМ. Однако на деле этот фактор *не менее важен* и во многих других относительно «спокойных» участках деятельности человека. Речь, в частности, идет о задаче существенного сокращения *сроков* научных исследований и проектно-конструкторских работ. Серьезная постановка задачи ускорения темпов научно-технического прогресса путем форсирования исследований в наиболее перспективных областях знания и сокращения сроков внедрения результатов исследований в практику оказалась возможной лишь благодаря кибернетике и ЭВМ. Именно в их использовании залог ее успешного решения.

### 3. ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР

Имеется еще один новый мотив, который все настойчивее звучит в наши дни. Речь идет о связанном с кибернетикой стремлении к учету (там, где это необходимо и возможно) так называемого человеческого фактора. Именно благодаря идеям кибернетики и развитию тесно связанной с кибернетикой инженерной психологии на очередь дня стала задача проектирования, конструирования и выпуска таких приборов, аппаратов и машин, которые соответствуют психофизиологическим свойствам использующего их человека, — машин, «по-человечески» отвечающих задачам, которые ставит перед собой управляющий ими человек в труде и обучении. Выдвижение задачи создания такой хорошо «пригнанной» к человеку техники — задачи оптимизации «человеческой составляющей» аппаратов, приборов и машин можно считать одной из характерных черт научно-технической революции.

Проблема «кибернетизация и человеческий фактор» многоаспектна. Так, исследование психики человека необходимо для «автоматизации» обучения, основанной на применении обучающих машин, работающих на принципах кибернетики. Вместе с тем научный анализ фундаментальных закономерностей разных сторон интеллектуальной деятельности человека становится необходимым также для усовершенствования самой кибернетической техники. Прогресс в конструировании самообучающихся технических устройств и программ, в чем можно видеть одну из магистральных линий технического прогресса, на современном этапе во многом зависит от степени изученности закономерностей процессов обучения и самообучения человека и животных.

Вряд ли можно рассчитывать на конструирование эффективных самообучающихся моделей и обучающихся программ, если не попытаться вложить в них аналоги закономерностей той деятельности животных и особенно человека, которая приводит к решению (новых) задач, — деятельности, которую (в отличие от «жестко запрограммированной» деятельности) можно назвать творческой. Убедительным представляется взгляд, что один процесс адаптации не может объяснить, например, обучения: эффективные методы обучения (и обучающие программы) должны учитывать способность человека вырабатывать планы, корректировать их в ходе осуществления, разрабатывать стратегии поведения и принимать решения, ведущие к достижению цели, которую он преследует. Поэтому моделирование и автоматизация процессов обучения и творчества требуют разработки теории и технологии самоорганизующихся систем.

Для кибернетики чрезвычайно существен момент активности человека (сознательное выдвижение планов и решение задач). Очевидно, что при конструировании кибернетических автоматов будущего придется в какой-то мере «моделировать» и эту замечательную способность человеческого сознания (впрочем, в менее развитых формах присущую и некоторым животным). Мы обратимся к этим вопросам в одной из последующих глав. Здесь нас интересует несколько иной аспект человеческого фактора: как он проявляет себя в мире «кибернетизирующихся» науки, техники и социального управления.

«Кибернетизация» предъявляет новые, повышенные требования к человеку. От него требуется больше «полноты человеческого». Примером служит, в частности, тенденция к повышению «интеллектуального потенциала» лиц, занятых в сферах административного и экономического управления. Для инженеров становится необходимой более широкая «гуманитарная» подготовка, а от кадров более высокого уровня — не только «административная хватка» и чутье руководителя, но и специальные знания (в объеме высшей школы) в области экономики, психологии, техники и математики. Социальную значимость приобретает задача (которую должны решать совместно социологи, психологи и педагоги) выявления и использования в целях профессиональной подготовки способностей и склонностей человека на всех стадиях его развития. Это особенно важно не только в отношении тех личностей, которые обладают способностями, скажем, к научному и художественному



творчеству, но и к руководству как специфическому виду деятельности<sup>1</sup>.

Для современных социальных структур характерен примат не только «человеческого», но и «организационного» фактора. Впрочем, они тесно связаны друг с другом; это проявляется, в частности, в том, что значение рациональной организации труда людей в коллективах не только не «снижается», но, наоборот, возрастает в результате механизации и автоматизации.

Что касается непосредственно кибернетики, то для нее особую значимость имеют, с одной стороны, вопрос о *роли человека* в автоматизированных системах, а с другой — проблема преодоления *психологических препятствий*, на которые наталкивается иногда внедрение кибернетических методов. Для решения последней проблемы необходимо очень ответственно относиться к математизации и использованию ЭВМ. Эффективное применение математических методов в экономике, приводящее к добротным моделям режима функционирования объектов (что дает в руки руководителей полноценное орудие оптимального управления), позволяет преодолевать психологический барьер: доказывает хозяйственным руководителям практическую ценность экономико-математического аппарата управления<sup>2</sup>. Поспешные же, не отражающие существа дела попытки применения математико-кибернетических средств лишь дискредитируют новые методы.

Очевидно, что от исследования вопросов, относящихся к проблематике «стыковки» человека и автомата, таких, как выявление особенностей деятельности по принятию решений человеком в системах, состоящих из автоматов и людей, как морально-психологическая подготовка работников, действующих в таких системах, как согласование сложной автоматической техники с действиями человека, управляющего ею, во многом зависит та оптимизация труда и управления, которая заложена в самой идее кибернетики.

<sup>1</sup> Это обстоятельство отмечалось на ряде международных научных совещаний по кибернетике. См. Л. С. Алексеев и др. О Шестом международном конгрессе по кибернетике в Намюре (Бельгия). — «Информационные материалы» Научного совета по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР, вып. 4 (51).

<sup>2</sup> См. Ю. И. Черняк, В. Я. Деренковский. Экономическая кибернетика. — «Информационные материалы» Научного совета по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР, вып. 49.

Область, где наиболее впечатляющ вклад кибернетики в научно-технический прогресс,— это создание и внедрение автоматизированных систем управления, о чем мы уже говорили. Существенно, что применение АСУ ставит преграды субъективизму и так называемым волевым решениям — решениям, не продиктованным объективным положением вещей. Здесь на сцену опять выступает человеческий фактор. АСУ открывают решительное наступление на всякого рода «неточности», эмпиризм, прикидки «на глазок», поэтому кибернетика является могучим союзником научного подхода к решению проблем экономического управления и планирования.

Решение многих проблем социального развития и управления неотделимо от широкого применения электронно-вычислительных машин — главной технической базы кибернетики.

История электронно-вычислительной техники во многом поучительна. Она свидетельство того, что развитие технологий современной цивилизации требует «сумасшедших идей» и решений не только в фундаментальных теоретических областях науки, но и в технике и ее взаимодействии с человеком. Появление четверть века назад электронно-вычислительных машин дискретного действия и было таким «сумасшедшим» шагом; и последствия его оказались колоссальными: «компьютеры» открыли перед человеком невиданные до этого возможности переработки информации. Во всех экономически развитых странах быстро растет количество и повышается качество электронных цифровых машин, появляется все больше систем ЭВМ, возникают все новые и новые вычислительные центры, вычислительные комплексы охватывают сетями связи целые страны и континенты.

Научно-техническая революция неразрывно связана с быстрым прогрессом и все более расширяющимся применением вычислительной техники. В наши дни глобальная — производственная, экономическая, научная, оборонная и др. — мощь стран зависит не только, скажем, от их производственных мощностей, но и от возможностей в информационной сфере, от их способности обеспечивать эффективность процессов управления, в широких масштабах используя электронно-вычислительную технику.

Непрерывно растут возможности вычислительной техники. Быстро меняется облик ЭВМ. На наших глазах сменились два поколения машин — их условно можно на-

звать соответственно «ламповым» и «полупроводниковым». Современные машины — это машины третьего поколения, использующие так называемые интегральные схемы. Построенные по единой структуре и на микроэлектронной конструктивно-технологической базе, совместимых системах программирования и имеющие единую номенклатуру внешних устройств, они открывают новые возможности структурного и функционального развития вычислительных систем<sup>1</sup>. Но за третьим поколением грядет четвертое поколение машин, возможности которых поистине фантастические, — машины эпохи сверхминиатюризации, выполняющие на так называемых больших интегральных схемах, объемы которых измеряются долями кубических сантиметров, машины, использующие лазерную технику, и др. Мощность машин и сейчас впечатляет: машины выполняют миллионы и десятки миллионов численных и логических операций в секунду. Ныне же речь идет о машинах с быстродействием в сотни миллионов и даже в несколько миллиардов операций в секунду и высокой надежности.

Перспектива развития машин очевидна: нарастание быстродействия; рост машинной памяти (которая будет по объему хранимой информации превышать во много раз «запоминающее устройство» человека); программы, делающие машины самообучающимися, самоорганизующимися; безотказность работы на протяжении длительного времени. Активные усилия предпринимаются в направлении создания программ и машин нового типа — машин «искусственного интеллекта», обладающих существенными аналогами дедуктивных и эвристических потенций разума и потому «самостоятельностью», могущей привести к созданию автоматов, способных приспосабливаться к внешней среде и «совершенствоваться» самих себя<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> См. В. Д. Калмыков. В основе — единая система ЭВМ. — «Автоматизированные системы управления». Применение вычислительной техники и автоматизированных систем управления на предприятиях и в отраслях промышленности, стр. 37.

<sup>2</sup> Некоторые из вопросов такого рода (правда, в плане далекого прогноза-полуфантазии) обсуждает Ст. Лем в своей книге «Сумма технологий» (М., 1968). Принципиальный взгляд на эту проблему авторы выскажут в заключительной главе настоящей книги.

## Глава II

### ПРОБЛЕМА МАТЕМАТИЗАЦИИ ЗНАНИЯ

Решение современных задач управления на путях кибернетики неотделимо от математизации наук, развертывающейся ныне в рамках того общеметодологического приема, который называется *моделированием*<sup>1</sup>. Одним из важнейших *видов* моделирования является моделирование математическое (знаковое, формальное). В отличие от математического все другие виды моделирования можно назвать (разумеется, несколько условно) *содержательным* моделированием. Важнейшим *объектом* моделирования при кибернетических постановках задач служат процессы в сложных динамических системах, включающих, как правило, «человеческий фактор», который вносит (как отмечалось в главе I) в качестве существенного момента противоречивость целей и критериев их достижения. В связи с этим возникает проблема создания математического аппарата, приспособленного для адекватного моделирования таких систем. В этой главе она будет рассмотрена на примере теории игр — одной из важнейших теорий математических оснований кибернетики.

#### 1. МАТЕМАТИЗАЦИЯ В СВЕТЕ КИБЕРНЕТИКИ

Исторически содержательное моделирование какого-либо явления или класса явлений обычно предшествовало их формальному моделированию. Формализация содержательных моделей, рассматриваемых какой-либо отраслью знания, и является *математизацией* этой отрасли. В известном смысле формализацию отрасли знания или отдельной научной теории можно считать логическим ее завершением. К. Маркс, как пишет в своих воспоминаниях П. Лафарг,

<sup>1</sup> См. И. Б. Новик. О моделировании сложных систем. М., 1965; К. Е. Морозов. Математическое моделирование в научном познании. М., 1969; Э. В. Утеуш, З. В. Утеуш. Введение в кибернетическое моделирование. М., 1971.

считал, что «наука только тогда достигает совершенства, когда ей удастся пользоваться математикой»<sup>1</sup>.

Очень важно, что конструируемые в математике объекты также могут становиться предметами содержательного рассмотрения или, иными словами, исследование формальных моделей может первоначально носить неформальный характер и подвергаться формализации лишь в ходе своего научного развития. Так, неформальными были, например, представления о разрешимости алгебраических уравнений до возникновения теории Галуа или же операции над математическими суждениями до введения аппарата математической логики.

Время развития содержательных моделей в науках от их возникновения до формализации может быть весьма различным. Оно зависит от общей ситуации в соответствующий период истории науки и, в частности, от имеющихся научных «заделов» в различных областях знания, которые накапливаются порознь, оставаясь изолированными научными фактами или теориями, и, лишь составив некий (заранее не всегда поддающийся описанию) «комплект», приводят к «внезапному» построению широкой и логически разветвленной формальной теории. Некоторые научные теории эволюционировали весьма медленно. Например, логика, возникшая как систематическая теория в античное время и направленная на путь формализации еще Аристотелем, была достаточно последовательно математизирована лишь во второй половине XIX в. Для других теорий этот процесс проходил более живо. Так, математизация механики, начиная с обширных и систематических наблюдений Тихо де Браге и весьма глубоких содержательных рассмотрений Галилея и кончая созданием Ньютоном дифференциального и интегрального исчисления, давших механике систем материальных точек современный математический вид, заняла около столетия.

Существенным ускорителем процесса математизации знаний явилась кибернетика. Перейдем к ее роли в этом процессе.

Справедливо утверждение, что всякое новое фундаментальное направление в математике возникает на основании практических потребностей в нем, а его дальнейшее развитие происходит в значительной степени по «внутренним» причинам.

<sup>1</sup> П. Лафарг. Воспоминания о Марксе. — «Воспоминания о Марксе и Энгельсе». М., 1956, стр. 66.

Естественно, что каждый раздел математики прежде всего способствует дальнейшей математизации той отрасли знаний, для математизации которой он создан. Кроме того, этот же раздел может «участвовать» в математизации и других отраслей знаний. Возможности такого переноса содержатся в формальном сходстве закономерностей, лежащих в основе уже математизированной или подлежащей математизации сфер явлений.

Но непосредственное использование готового математического аппарата в новой области обосновано лишь в той мере, в какой формальное сходство закономерностей отражает их сходство по существу. Поэтому этот математический аппарат, который описывает некоторый круг явлений на фиксированном уровне исследования достаточно исчерпывающим образом, может применительно к другому кругу более сложных явлений давать лишь весьма грубую картину. Например, расчеты энергетического баланса электронного нагревательного прибора и радиолампы осуществляются по сходным математическим схемам. Однако если для нагревателя таким расчетом исчерпывается вся его техническая сущность, то для радиолампы он носит в лучшем случае вспомогательный характер.

Ограниченная возможность переноса математических приемов исследования с одних явлений на другие может порождать методологические ошибки двоякого рода: отрицание самой возможности качественно новых приложений сложившегося математического аппарата и представление, будто такой аппарат, созданный для исчерпывающего (на определенном уровне) описания некоторых явлений, способен столь же исчерпывающим образом и притом на том же уровне описывать другие явления, существенно более сложные. История методологии и практики приложений математики знает достаточно примеров ошибок обоих типов.

Если отвлечься от теории игр, то подавляющее большинство сколько-нибудь крупных направлений в математике имеет физическое происхождение. Разработанный к настоящему времени математический аппарат позволяет описывать, иногда на весьма высоком уровне абстракции, разного рода явления, связанные с перемещениями физических тел в физическом пространстве. (Даже такой, безусловно, «нефизический» раздел математики, как математическая логика, можно рассматривать как систематический метод описания расположения и перемещения некоторых вполне конкретных объектов — знаков из некоторого алфа-

вита.) Это обстоятельство объясняет «извечную» склонность математиков к физическим и геометрическим интерпретациям понятий, рассуждений и результатов. Такие интерпретации бывают не только непосредственными (например, в виде разного рода «фазовых пространств»), но могут появляться и в результате перевода на геометрический и физический язык весьма далеких от геометрии и физики фактов с последующим использованием математического аппарата, созданного для изучения физических и геометрических объектов. В качестве классического примера можно указать на метод координат, а из современных направлений — на теорию случайных блужданий.

Вместе с тем физическое происхождение традиционного математического аппарата ограничивает его применение в тех отраслях знания, в которых изучаемые явления подчиняются не столько физическим, сколько иным закономерностям. Например, экспоненциальные зависимости, соответствующие решению известного дифференциального уравнения, достаточно адекватно описывают весьма разнообразные явления (к примеру, рост числа частиц, получающихся в результате цепной реакции). Подобные же зависимости в экономической области (хотя они довольно часто встречаются в различных формулах «математической экономики») описывают реальное положение дел, пожалуй, лишь при исчислении сложных процентов на вклады в банке, да и то при его стабильном финансовом положении.

Что же нужно для того, чтобы нефизические науки смогли в полной мере математизироваться? Для них должен быть создан свой специальный, достаточно самостоятельный математический аппарат. Конечно, это не должно и не может быть некая совершенно новая математика, оторванная от традиционной и порвавшая с ее методами. Напротив, разделы математики, возникающие при математизации новых отраслей знаний, должны использовать многие достижения «классических» разделов примерно в той же степени, в какой простые физические явления существенны для протекания сложных биологических или социальных явлений или, что в сущности почти то же самое, в какой мере биологические или общественные науки могут воспользоваться физическими теориями или их аналогиями-интерпретациями.

Богатые возможности для таких интерпретаций появились в связи с возникновением кибернетики. Уже сами ее основные понятия — «управление», «информация», «алго-

ритм» и т. д. — обладают чрезвычайно широким объемом и могут касаться объектов весьма разнообразной природы. Это обстоятельство дало новые возможности переноса математических формулировок, установленных первоначально в связи с фактами чисто физической природы, на явления биологические, психологические и социальные.

В результате развития кибернетики и интенсивных разработок близких к ней новых областей математики за последние десятилетия резко расширился фронт математизации различных дисциплин. Ныне с достаточным основанием можно говорить уже о плодотворном и систематическом применении математики в экономике, биологии и лингвистике, т. е. по существу о математизации этих дисциплин. Связь этого процесса с кибернетикой уже отмечалась в главе I. Здесь мы еще раз подчеркнем, что упомянутый процесс является именно *математизацией*, хотя это обстоятельство ускользало и продолжает ускользать от внимания многих специалистов математизируемых областей.

Сильно запутал представления о математизации литературный образ «физиков и лириков», породивший знаменитый спор, в котором вопрос о возможностях, границах и достигнутом уровне математизации был подменен рассуждениями о «способности машин мыслить или любить», о «непреходящих эстетических ценностях» и т. д.

Если отвлечься от неопределенности предмета спора, позиция «лириков» опиралась по существу на два аргумента: *формальные* модели явлений, в которых участвуют люди (в том числе явлений психики, социальных явлений, творческих актов и т. д.), *не могут* достичь уровня адекватности *содержательных* их моделей, потому что эти явления (1) слишком сложны и (2) противоречивы. Относительно первого аргумента достаточно заметить, что математика в настоящее время способна создавать столь мощные формальные конструкции, что любое сложное содержательное описание, коль скоро оно понятно и однозначно, может быть в принципе в них «воспроизведено».

Обратимся ко второму аргументу. Каждое конкретное противоречие, наблюдаемое в физическом явлении, снимается в ходе его протекания и развития, во всяком случае противоречивые тенденции в нем обнаруживаются как данные. Напротив, противоречия и конфликты точек зрения или интересов людей и их групп не обязательно полностью раскрываются в процессе их деятельности. Эта сторона социальных явлений, действительно, не может быть моде-



лирована при помощи формальных средств, заимствованных из моделей физических явлений. Но разумные действия лиц и коллективов, наделенных различными интересами, если рассматривать эти действия во всем многообразии их форм, практически являются содержанием всей социальной жизни людей. Тем самым для создания математического аппарата, который позволил бы строить формальные модели социальных явлений, необходимо разработать совершенно новую, не имеющую аналогов в существующем в настоящее время математическом аппарате физики систему математических моделей обоснованного поведения людей и групп людей в условиях различий интересов. Такой системой является теория игр, ведущая свое начало с работы Дж. фон Неймана 1928 г.<sup>1</sup> и в развернутом виде впервые изложенная в монографии Дж. фон Неймана и О. Моргенштерна (1944)<sup>2</sup>.

## 2. ФОРМАЛИЗАЦИЯ КОНФЛИКТОВ

Теорию игр можно определить как *теорию математических моделей принятия оптимальных решений в условиях конфликтов*. Подчеркнем, что здесь «конфликт» понимается в самом широком смысле, охватывая способы разрешения любых, в том числе социальных, противоречий: антагонистических и неантагонистических, открытых и завуалированных, острых и смягченных, важных и незначительных. Конфликты могут происходить между отдельными индивидами, группами людей, объединенных по самым различным признакам, в том числе между классами, воюющими сторонами, а также между экономическими противниками или партнерами. Наконец, как конфликт можно понимать борьбу с природой, считая последнюю одним из его участников.

Общей содержательной теории конфликтов, охватывающей в равной мере все конфликты в указанном выше смысле и могущей служить основой дальнейших модельно-математических обобщений, наука еще не выработала. По-видимому, единственной работой по этому вопросу может считаться книга Э. Ласкера «Философия неподдающе-

<sup>1</sup> См. Дж. фон Нейман. К теории стратегических игр. — «Матричные игры». М., 1961, стр. 173—204.

<sup>2</sup> См. Дж. фон Нейман, О. Моргенштерн. Теория игр и экономическое поведение. М., 1970.

гося завершению»<sup>1</sup>, где различные аспекты конфликтов трактуются, впрочем, в весьма общей и недостаточно четко очерченной форме.

Частичные конфликтные явления до сих пор рассматривались в различных науках в соответствии с природой конфликтующих сторон и с сущностью конфликтов между ними. Почти исключительно конфликтами занимаются право, военное дело, многие разделы экономики, социологии, психологии и этики. С известными основаниями в этот список можно включить ряд отраслей медицины и биологии<sup>2</sup>. Формализация содержательных моделей, рассматриваемых в разделах перечисленных наук, с последующим объединением полученных формальных моделей и дальнейшим математическим развитием и является функцией теории игр — этого важного орудия в математическом арсенале кибернетики.

Таким образом, создание теории игр означает охват математическими моделями принципиально новых областей, математизацию новых отраслей знания (ряда разделов общественных, естественных и прикладных наук). При этом существенно, что математизация достигается не только и не столько с помощью переносов по аналогии математического аппарата из других областей, сколько разработкой своего собственного, специально приспособленного для этих целей аппарата.

Р. Д. Льюс и Х. Райфа замечают, что теория игр «представляет один из первых примеров сложных математических выводов, относящихся исключительно к вопросам, возникающим в общественных науках. Идея теории игр возникла из нефизических задач, и для трактовки этой идеи был разработан математический аппарат»<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> E. Lasker. Die Philosophie des Unvollendbaren. Leipzig, 1919 (в период написания этой книги Э. Ласкер был чемпионом мира по шахматам).

<sup>2</sup> О возникновении теоретико-игровой проблематики в ряде прикладных наук и о перспективах приложений теории игр см.: Н. Н. Воробьев. Развитие науки и теории игр. — «Исследование операций». Методологические аспекты. М., 1972, стр. 9—28, 92—98, 132—135; *его же*. Приложения теории игр. — «Успехи теории игр». Вильнюс, 1973, стр. 249—283; *его же*. On the Applications of the Theory of Games in Technological Sciences. — «V Международный конгресс ИФАК». Париж, 1972. Статьи, содержащие теоретико-игровой подход к различным вопросам учения о человеке и его поведении, см. «Game Theory in the Behavior Sciences». Pittsburg, 1969.

<sup>3</sup> Р. Д. Льюс, Х. Райфа. Игры и решения. М., 1961, стр. 31.

Построение теории игр в упомянутом плане представляется исключительно трудным делом. Чтобы составить представление о масштабах этих трудностей, полезно сопоставить условия, в которых происходила математизация физики (и даже не всей физики, а элементарных разделов механики) во времена Кеплера — Ньютона, и нынешние условия («кибернетизация знания»), когда предстоит осуществить математизацию теории конфликтов, а также «больших систем».

Необходимо отметить относительно содержательную простоту механических движений систем материальных точек и сравнительно с этим огромную сложность явлений, относящихся к деятельности сознательных (или хотя бы адаптирующихся) индивидуумов и их групп. К началу формирования механики ряд важных физических понятий был фактически стихийно уже математизирован. К их числу относились такие фундаментальные физические величины, как длина (расстояние), угол, скорость и т. п. Напротив, в большинстве наук, содержательно изучающих конфликты, основные понятия задаются пока еще при помощи чисто словесных описаний, оставляющих возможности различного их понимания и истолкования.

В процессе математизации механики была возможность широко пользоваться численными данными, находимыми в результате непосредственных наблюдений. Эти данные можно было получать с любой практически нужной точностью и в любом количестве. Цели и возможности конфликтующих сторон, как правило, такому точному измерению не поддаются; более того, не всегда ясна даже методика таких измерений.

Наконец, — и это отнюдь не маловажное обстоятельство — за три столетия, прошедших после начала математизации механики систем материальных точек, она еще не достигла необходимого уровня. Например, до сих пор в механике нет достаточно удовлетворительного, даже качественного решения таких вопросов, как «задача многих тел», «проблемы захвата» и т. д.

Однако в идущей в течение трех веков успешной математизации знаний накоплен значительный опыт и разработан богатый математический аппарат, который может оказаться весьма полезным. В качестве одного из примеров укажем на аксиоматический метод.

Известно, что для математизации любой теории необходимо прежде всего формализовать употребляемые в этой

теории *понятия*. Эта формализация состоит в установлении некоторой системы исходных, первичных понятий и в последующем определении всех остальных понятий через исходные и уже определенные. В качестве исходных понятий обычно выбираются основные понятия содержательной теории.

В теории игр формализацию понятий следует как будто начинать с тех понятий, которые фигурируют в описании ее предмета, т. е. с понятий *конфликта* и *оптимального поведения* в нем. Однако сложность, структурированность конфликта как явления и содержательная неоднозначность оптимальности поведения заставляют отказаться от выбора указанных понятий в качестве исходных, первичных и взять за таковые более простые понятия.

Содержательно конфликт можно определить как явление, применительно к которому имеет смысл говорить о том, кто и как в этом явлении участвует, в чем могут состоять его исходы, а также кто и как заинтересован в них. Поэтому в качестве первичных понятий теории игр естественно взять следующие. Во-первых, таким должно быть понятие *действующего начала*; из-за возможной коллективности и внутренней структурности такого начала его естественно называть *коалицией действия*. Во-вторых, следует ввести понятие *действия*, *поведения* коалиции действия, или принимаемого ею *решения*; эти действия, поведения, решения каждой коалиции действия называются ее *стратегиями*. В-третьих, необходимо понятие *исхода конфликта*, которым является результат выбора всеми коалициями действия их стратегий; исход конфликта называется *ситуацией*. В-четвертых, требуется ввести понятие *заинтересованной стороны*; последние подобно действующим началам также могут обладать чертами структурированности, коллективности; их можно назвать *коалициями интересов*. Наконец, в-пятых, существенным является понятие *заинтересованности* коалиции интересов, которое состоит в установлении для этой коалиции интересов *отношения предпочтения* на множестве ситуаций; часто, хотя и далеко не всегда, предпочтительность ситуации для коалиции интересов характеризуется тем выигрышем, который коалиция в этой ситуации получает.

Следовательно, конфликт является сложной и расчлененной концепцией. Эта сложность предопределяет возможности выделения из совокупности всех конфликтов разнообразных частных классов конфликтов, путем конкрети-

зации основных определяющих конфликт элементов и естественных связей между ними.

Переходя к понятию *оптимизации*, следует прежде всего указать на укоренившийся предрассудок, будто в теории игр предполагается, что участники конфликтов действуют оптимально. Напротив, *сама идея оптимальности является предметом теории игр*. Уточнение, в каком именно смысле понимается оптимальность в том или ином конфликте, и формализация возникающего при этом понятия оптимальности являются одной из основных задач теории игр. Единой формализации понятия оптимальности теория игр пока еще не выработала и едва ли можно предположить, что это когда-либо будет сделано. Поэтому лучше говорить о различных формах оптимальности, которые (может быть, несколько условно) можно назвать *выгодностью, устойчивостью и справедливостью*.

Идея *выгодности* наиболее проста. Ситуацию следует считать выгодной для коалиции интересов, если она обладает для нее высокой предпочтительностью, в частности, если эта коалиция получает в ней достаточно большой выигрыш.

*Устойчивость* ситуации означает, что коль скоро она сложилась, ни одна из коалиций интересов не заинтересована в том, чтобы «подконтрольные» ей коалиции действия отклонялись от своих стратегий в этой ситуации, даже если некоторые другие коалиции действия от своих стратегий отклонились. Эта незаинтересованность может быть как прямой, так и косвенной. Прямая незаинтересованность здесь понимается так, что измененная ситуация не будет предпочтительнее, чем неизменная. Косвенная незаинтересованность означает, что выход за пределы некоторого класса ситуаций, который может задеть интересы других коалиций, вызовет реакцию со стороны последних, которая в конечном итоге приведет либо к ситуации, не благоприятной для нарушителя, либо к возвращению в исходный класс ситуаций.

Формализация того, что можно назвать *справедливостью*, состоит в конструкции, позволяющей по отношениям предпочтения для отдельных коалиций интересов (в частности, для отдельных игроков) построить отношение предпочтения для совокупности всех коалиций интересов или хотя бы указать ситуацию, наиболее предпочтительную в этом смысле.

Дальнейшее развитие введенных понятий конфликта и оптимальности при сохранении четкости формулировок и

хотя бы минимальной наглядности возможно лишь на путях последовательной формализации этих и производных понятий. Сказанное выше дает для этого достаточно широкие возможности.

Всякий конфликт можно формально описать системой вида

$$\Gamma = \langle \mathfrak{R}_\partial, \{r_K\}_{K \in \mathfrak{R}_\partial}, r, \mathfrak{R}_u, \{\xi_K\}_{K \in \mathfrak{R}_u} \rangle,$$

где  $\mathfrak{R}_\partial$  — множество *коалиций действия* в описываемом конфликте;  $r_K$  — множества *стратегий* для каждой коалиции действия  $K$ ;  $r$  — множество *ситуаций*, т. е. подмножество декартова произведения  $\prod_{K \in \mathfrak{R}_\partial} r_K$ ;  $\mathfrak{R}_u$  — множество

коалиций интересов;  $\xi_K$  — *отношение предпочтения* для каждой коалиции интересов  $K \in \mathfrak{R}_u$  на множестве ситуаций  $r$ . Формализованный таким образом конфликт называется *игрой*.

Далее мы ограничимся рассмотрением двух частных классов игр: бескоалиционных и классических кооперативных.

### 3. БЕСКОАЛИЦИОННЫЕ И КООПЕРАТИВНЫЕ ИГРЫ

Пусть в игре  $\Gamma$  коалиции действия и коалиции интересов совпадают. В этом случае их удобно называть *игроками*. Положим поэтому  $\mathfrak{R}_\partial = \mathfrak{R}_u = I$ . Пусть далее для множества ситуаций

$$r = \prod_{i \in I} r_i$$

и для каждого игрока  $i \in I$  на  $r$  заданы функции  $H_i$ , принимающие численные значения. Значение  $H_i(x)$  называется *выигрышем* игрока  $i$  в ситуации  $x$ . Будем считать, что для двух ситуаций  $x'$  и  $x''$  справедливо отношение  $x' \xi_i x''$ , если  $H_i(x') > H_i(x'')$ .

Игра  $\Gamma$ , удовлетворяющая перечисленным условиям, называется *бескоалиционной игрой*. Очевидно, что она задается множеством игроков  $I$ , семейством множеств стратегий  $r_i$  и семейством функций выигрыша  $H_i$ :

$$\Gamma = \langle I, \{r_i\}_{i \in I}, \{H_i\}_{i \in I} \rangle.$$

*Устойчивость* ситуации в случае бескоалиционной игры означает ее равновесность в том смысле, что ни один из

игроков не заинтересован в отклонении от этой ситуации. Переведем последнюю фразу на формальный язык.

Пусть  $I = \{1, \dots, n\}$ , а  $x = (x_1, \dots, x_n)$  — некоторая ситуация (где, очевидно,  $x_i \in r_i$  для  $i \in I$ ). Возьмем произвольную стратегию  $x_i \in r_i$  и заменим в ситуации  $x$  имеющуюся в ней стратегию  $x_i$  игрока  $i$  на его стратегию  $x'_i$ . Полученная таким образом ситуация обозначается через  $x \parallel x'_i$ . Очевидно,  $x \parallel x'_i$  есть формальная запись отклонения игрока  $i$  от ситуации  $x$  путем выбора им стратегии  $x'_i$ .

Незаинтересованность игроков в отклонениях от ситуации приобретает при этом вид  $H_i(x) \geq H_i(x \parallel x'_i)$ , где  $x'_i \in r_i$ . Ситуация  $x$ , для которой выполняется это неравенство (точнее, система неравенств при всех  $x'_i \in r_i$  и  $i \in I$ ), называется *ситуацией равновесия*.

Только ситуации равновесия могут являться предметом договора между игроками. Действительно, во всякой неравновесной ситуации должен найтись хотя бы один игрок, для которого отклонение от ситуации приведет к увеличению выигрыша. Этот игрок оказывается потенциальным нарушителем договора, условием которого является образование данной ситуации. Таким образом, лишь для ситуации равновесия можно считать осуществимыми цели, к которым могут стремиться игроки. В связи с этим принцип оптимальности, предписывающий игрокам формировать ситуации равновесия, часто называется *принципом осуществимости цели*.

Разумеется, ситуации равновесия не могут воплотить в себе все черты, которые мы склонны приписывать оптимальности. Например, ситуации равновесия могут оказаться невыгодными. В частности, в них может не достигаться максимум суммарного выигрыша всех игроков. Отличаются ситуации равновесия также и от известных из экономики «оптимумов по Парето». Однако одно свойство разумности присуще ситуациям равновесия в полной мере: коллектив, выбравший в качестве своего поведения ситуацию равновесия, может не опасаться сознательных индивидуальных нарушений установленного порядка.

Обратимся теперь к кооперативным играм.

Пусть  $\mathfrak{N}_n$  есть семейство некоторых подмножеств множества игроков  $I = \{1, \dots, n\}$ ; все эти игроки, действуя совместно, могут обеспечить себе коллективный выигрыш  $v(I)$ , а каждый из них ( $i$ -й), действуя изолированно, может обеспечить себе индивидуальный выигрыш  $v(i)$ .

Множество всех векторов  $x = (x_1, \dots, x_n)$ , где

$$\sum_{i \in I} x_i = v(I) \text{ и } x_i \geq v(i) \quad (i \in I),$$

естественно принять в качестве множества всех ситуаций  $\Gamma$ . Множество  $\Gamma$  можно интерпретировать как множество стратегий некоторой единственной коалиции действия.

Поскольку каждый компонент  $x_i$  вектора  $x$  можно понимать как долю игрока  $i$  в коллективном выигрыше  $v(I)$ , вектор  $x$  называется *дележом*. Нетрудно видеть, что указанные выше условия, которым должны удовлетворять дележи, также носят характер условий рациональности. Именно, первое из них означает, что никакая часть коллективного выигрыша не должна пропадать, а второе — что доля игрока в коллективе должна быть не меньше, чем его индивидуальный выигрыш.

Для завершения определения игры рассматриваемого вида следует указать отношения предпочтения для каждой из коалиций интересов.

Пусть каждая коалиция  $K \in \mathfrak{R}_n$  может обеспечить себе коллективный выигрыш  $v(K)$ . Так как число  $v(K)$  определено для каждой коалиции интересов  $K \in \mathfrak{R}_n$ , можно говорить о функции  $v$  на  $\mathfrak{R}_n$ . Она называется *характеристической функцией* игры.

На характеристическую функцию часто налагаются два следующих дополнительных требования:  $v(K) + v(I \setminus K) = v(I)$  для любой коалиции  $K \subset I$  и  $v(K) + v(L) \leq v(K \cup L)$  для любых непересекающихся коалиций  $K$  и  $L$  из  $\mathfrak{R}_n$ . Первое из них отражает неизменность суммарного выигрыша всех участников игры, второе означает, что при объединении игроков из  $K$  с игроками из  $L$  игроки  $L$  из противников  $K$  превращаются в их союзников, поэтому  $K$  в объединении с  $L$  может рассчитывать на больший выигрыш, чем при самостоятельных действиях; по аналогичным причинам и  $L$  может рассчитывать на больший выигрыш. Следовательно, и вместе обе эти коалиции должны получить не меньше, чем в сумме порознь.

Для завершения определения следует указать отношения предпочтения для каждой из коалиций интересов. Это можно сделать следующим образом.

Будем считать, что дележ  $x = (x_1, \dots, x_n)$  для коалиции  $K$  предпочтительнее, чем дележ  $y = (y_1, \dots, y_n)$ , т. е. что  $x \succ_K y$ , если  $\sum_{i \in K} x_i \leq v(K)$  при  $x_i > y_i$  для всех  $i \in K$ .



Отношение предпочтения в этих случаях обычно называется отношением *доминирования*.

Таким образом, в рассматриваемом случае игра описывается множеством игроков  $I$ , семейством коалиций  $\mathfrak{K}_n$  и характеристической функцией  $v$ :  $\Gamma = \langle I, \mathfrak{K}_n, v \rangle$ . Такие игры называются *кооперативными*.

Кооперативная игра формально моделирует следующее явление: указывается «общество» (множество  $I$ ), «набор коллективов в нем» (семейство  $\mathfrak{K}_n$ ) и «возможности присвоения каждого из коллективов» (характеристическая функция  $v$ ); рассматриваются все возможные распределения полного «общественного ресурса» (который описывается числом  $v(I)$ ). Если члены какого-нибудь коллектива (коалиции)  $K \in \mathfrak{K}_n$  в условиях дележей  $x$  и  $y$  получают в сумме не больше, чем  $v(K)$ , то коллектив  $K$  предпочитает дележ  $x$  дележу  $y$  (т.е.  $x \succeq_K y$ ), если каждый член  $K$  в  $x$  получает больше, чем в  $y$ . Если же члены  $K$  в  $x$  получают больше, чем  $v(K)$ , то  $K$  воспринимает столь благоприятный для себя дележ  $x$  как «подарок судьбы», который не подлежит обсуждению и сравнению с другими дележами.

Формальные представления об оптимальности в условиях кооперативной игры могут быть весьма разнообразными. Уже в силу этого ни одно из них не может считаться исключительным и бесспорным. Тем не менее каждое из этих представлений отражает некоторые описанные ранее содержательные черты понятия оптимальности, которое является сложным и диалектически противоречивым.

Идея *выгодности* воплощена в самой конструкции характеристической функции, и мы здесь не будем на этом подробно останавливаться.

Рассмотрим оптимальность в кооперативной игре как некоторую *устойчивость*.

Очевидно, если для дележа  $x$

$$\sum_{i \in K} x_i \geq v(K) \text{ при всех } K \in \mathfrak{K}_n,$$

то этот дележ не доминируется никаким другим дележом. Это значит, что в «обществе»  $I$  не найдется таких «сил» (такой коалиции  $K$ ), которые предпочитали бы дележу  $x$  какой-либо другой. Тем самым этот дележ может считаться устойчивым. Совокупность всех таких дележей называется *с-ядром* кооперативной игры.

Другое понимание устойчивости несколько сложнее. Пусть  $R$  — множество дележей. Чтобы дележи из  $R$  при-

нять в качестве допустимой (в смысле устойчивости) системы, естественно потребовать, чтобы не было «метаний» от одного дележа из  $R$  к другому и чтобы на каждый выход за пределы  $R$  возникала реакция, возвращающая в  $R$ . Иными словами, естественно, чтобы в «обществе» не было таких «сил», которые предпочитали бы один дележ из  $R$  другому, и чтобы, каков бы ни был дележ вне  $R$ , в «обществе» нашлись «силы», предпочитающие ему некоторый дележ из  $R$ . Такое множество дележей  $R$  называется *решением* (точнее говоря, *решением по Нейману—Моргенштерну*) кооперативной игры.

Формально решение игры  $R$  определяется как такое множество дележей, что  $x \succ_K y$  ни при каких  $x, y \in R$  и  $K \in \mathfrak{N}_n$ ; по всякому  $y \notin R$  найдутся такие  $x \in R$  и  $K \in \mathfrak{N}_n$ , что  $x \succ_K y$ .

Ряд вариантов устойчивости связан с рассмотрением угроз одних игроков или коалиций против других игроков или коалиций. При этом под угрозой коалиции  $K$  против коалиции  $L$  в условиях некоторого дележа  $x$  естественно понимать предложение со стороны  $K$  другого дележа  $y$ , в котором игроки из  $K$  получают больше (а их сообщники не меньше), чем в  $x$ , за счет игроков из  $L$ . На такую угрозу  $K$  может найтись контругроза, состоящая в предложении со стороны  $L$  такого дележа  $z$ , в котором игроки из  $L$  и их сообщники получают не меньше, чем в  $x$ , а сообщники  $K$ , ставшие сообщниками  $L$ , не меньше, чем в  $y$ . Устойчивость характеризуется возможностью парировать каждую угрозу контругрозой. Как видно, в терминах дележей, угроз и контругроз можно описывать запутанные конфликты различной природы. (Мы не приводим здесь полной формализации описанного понятия устойчивости, так как это заставило бы нас углубиться во вспомогательный математический аппарат.)

Как отмечалось выше, еще одним пониманием оптимальности является представление о ней как о *справедливости*.

Пусть нам дана кооперативная игра с характеристической функцией  $v$ . Ясно (это вытекает непосредственно из определения характеристической функции), что игрок  $i$  может, поставив себя в этой игре вне коллективов, форсированно получить  $v(i)$ . Однако на какую долю в общем выигрыше  $v(I)$  он вправе рассчитывать, если он будет добросовестно выполнять те обязанности, которые «общество»  $I$  на него возложит?

Разумеется, эта доля должна зависеть от ценности игрока как члена тех или иных коллективов. Но как?

Для решения этого вопроса введем достаточно естественные «принципы справедливости», формулируя их в том полуформальном, полусодержательном стиле, который в основном правильно передает существо дела и вместе с тем избавляет от введения ряда вспомогательных понятий.

*Первый принцип.* Если игрок  $i$ , присоединяясь к любому коллективу, увеличивает его выигрыш ровно на  $v(i)$ , то его справедливая доля в игре с характеристической функцией  $v$  должна быть равна  $v(i)$ .

*Второй принцип.* Если каждый из двух игроков, присоединяясь к любому коллективу, увеличивает его выигрыш на одну и ту же сумму, то справедливые доли этих игроков должны быть одинаковыми.

*Третий принцип.* Участие игрока в двух независимых играх можно рассматривать как некоторую сложную игру. Очевидно, справедливой долей игрока в этой сложной игре должна быть сумма его справедливых долей в составляющих играх.

Оказывается, что принятие этих постулатов равносильно точному установлению долей игроков в любой кооперативной игре с заданной характеристической функцией  $v$ . Эти доли называются *значениями по Шепли*<sup>1</sup>.

#### 4. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПОВ ОПТИМАЛЬНОСТИ

До сих пор речь шла о весьма широких классах конфликтов и о соответствующих им очень общих понятиях целесообразности. Естественно, что применительно к более частным классам конфликтов эти понятия можно конкретизировать.

Весьма важным классом игр являются *антагонистические игры*, под которыми понимаются такие бескоалиционные игры, в которых число игроков равно двум, а значения функций выигрыша этих игроков в каждой ситуации равны по величине и противоположны по знаку. В содержательном плане это означает, что всякий выигрыш одного из игроков в антагонистической игре равен проигрышу другого, а всякое улучшение положения одного игрока тем самым является ухудшением положения другого игрока.

<sup>1</sup> Подробнее об этом: Р. Д. Льюс, Х. Райфа. Игры и решения; Г. Оуэн. Теория игр. М., 1971.

Следует отличать антагонистичность игры как ее формальное свойство, выражающее некоторые вполне определенные содержательные черты конфликта, от антагонизма в философском понимании. Последний применим к существованию более широкому классу конфликтов.

Антагонистические в теоретико-игровом понимании этого слова конфликты встречаются далеко не так часто, как это может показаться на первый взгляд. Математический (или по крайней мере математизированный) подход к их анализу показывает это достаточно убедительно. Прежде всего, не следует смешивать *антагонистичность* конфликта с его *остротой*. Например, возможные конфликты (при всей присущей им остроте) между участвующими в сражении подразделениями еще не обязательно оказываются антагонистическими.

Можно чисто математически без труда показать, что стремление игроков в ситуациях равновесия в случае антагонистической игры превращается в принцип «максимина», т. е. в стремление максимизировать минимальный выигрыш, получаемый игроком в наименее благоприятных обстоятельствах. Этот факт открывает путь к математизации того явления, которое носит несколько расплывчатое наименование *риска*.

Как антагонистическую игру можно интерпретировать принятие решений в условиях неопределенности, считая неизвестные к моменту принятия решения закономерности явления стратегиями «природы» и предполагая, что эти стратегии могут оказаться наименее благоприятными для принимающего решения субъекта.

Будущее по самой своей природе многовариантно и тем самым несет в себе в большей или меньшей степени неопределенность. Поэтому принятие оптимальных решений, касающихся будущего, является принятием решений в условиях неопределенности. Следовательно, математизация долгосрочного планирования, равно как и прогностики в целом, должна опираться на теорию игр, в частности на теорию антагонистических игр.

Математические возможности теории игр не ограничиваются четким истолкованием связанных с конфликтами понятий, хотя этот шаг является необходимым, а быть может, и наиболее важным. Теория игр после формализации основных относящихся к конфликтам понятий позволяет установить *реализуемость* принципов оптимальности для тех или иных классов конфликтов, т. е. доказывает

существование ситуаций, удовлетворяющих этим принципам оптимальности. Подчеркнем, что «теоремы существования» никоим образом не являются чистым теоретизированием, предпринимаемым для придания проблеме «математического лоска». Скорее их следует считать первым испытанием концепций оптимальности при помощи критерия практики.

Принцип оптимальности, не реализуемый на достаточно четко очерченном классе игр, едва ли может считаться теоретически существенным и практически важным. Наоборот, если доказана реализуемость некоторого принципа оптимальности в интересующем нас конфликте, то это свидетельствует о том, что имеет смысл придерживаться этого принципа, даже если это делается чисто декларативно (например, когда не известны его реализации).

Доказательства «теорем существования» с чисто математической стороны часто оказываются весьма сложными и требуют использования тонких средств топологии, функционального анализа, теории дифференциальных уравнений и других разделов современной математики. Получаемые при этом результаты бывают иногда нетривиальными. Например, установление решений в кооперативных играх трех лиц устанавливается совсем просто. Сделать же это для игр с четырьмя игроками существенно сложнее, но в принципе можно. Вопрос же о существовании решений общих кооперативных игр с пятью и более участниками остается открытым. Известен, впрочем, пример игры с десятью игроками, не имеющий решения. В этом специально сконструированном примере взаимоотношения между игроками нарочито «перепутаны», и вполне возможно, что «в жизни» такого переплетения интересов просто не бывает в силу пока еще нам не известных закономерностей *формирования* социальных коллективов. Во всяком случае анализ такого рода задач может оказаться весьма существенным для математического исследования социальных явлений.

Большинство «теорем существования» в теории игр, как это, впрочем, нередко наблюдается в математике, неконструктивны, т. е. не указывают эффективного способа нахождения ситуации, существование которой доказывается. Это порождает новый круг проблем в теории игр — *нахождение* ситуаций, реализующих те или иные принципы оптимальности. Возникающие при этом задачи иногда поддаются решению при помощи уже известных математических при-

емов, заимствованных из линейной алгебры, теории дифференциальных уравнений, интегральных и функциональных уравнений, теории вероятностей и т. д. Иногда эти приемы приходится комбинировать необычным для традиционной математики образом. Наконец, ряд задач (а их обнаруживается все больше и больше) вовсе не поддается решению стандартными математическими методами. Отдельные частные их случаи из числа наиболее простых анализируются средствами элементарной, но запутанной комбинаторики.

Дальнейшее расширение круга решаемых задач происходит по двум путям. Во-первых, переход к решению более сложных и громоздких задач можно осуществить «чисто силовым» образом, решая их по имеющимся комбинаторным схемам при помощи ЭВМ. Во-вторых, можно систематизировать отдельные частные комбинаторные приемы и создать на их основе некоторое новое исчисление. Выросшее из потребностей теории игр и приспособленное специально для нее, оно станет новым математическим аппаратом. Так будет сделан решающий шаг в математизации областей знаний, изучающих социальные явления в широком классе сложных систем, рассматриваемых в кибернетике (экономические, социологические, человеко-машинные, экологические и т. п.).

### Глава III

## «ФИЗИКАЛИСТСКИЙ» И ТЕОРЕТИКО-СИСТЕМНЫЙ АСПЕКТЫ КИБЕРНЕТИКИ

Описанные в предшествующих главах особенности кибернетики демонстрируют важную тенденцию в методологии современной науки в целом — тенденцию существенного дополнения выработанного в «точном» естествознании XIX — первой половины XX в. идеала научного описания как описания в терминах «причинного» объяснения (будь то в «детерминистском», «лапласовском» стиле или в стиле вероятностно-статистическом<sup>1</sup>) описанием в терминах управления и информации, оптимизации и конфликта, структуры и функции (функциональности), наконец, цели и принятия решения. «Модельная» методология и «функциональный» подход, однако, не альтернативны «субстратно-причинным» методам, и подчеркнутая в предыдущей главе тенденция в развитии математических средств, используемых в кибернетике, совсем не означает ее противопоставления ни такой фундаментальной науке, как физика, ни другим областям знания, изучающим те или иные области или «срезы» действительности<sup>2</sup>. Нет оснований сомневаться во все более широком распространении кибернетического подхода — его «экспансии» во все новые области. Однако, как и любой подход, он не «универсален»: на одной его основе невозможно исчерпать все богатство ситуаций в познании и на практике.

Применение кибернетического подхода утрачивает продуктивность вне связи с «традиционными» методами. Это особенно проявляется при построении содержательных

<sup>1</sup> О роли и соотношении этих двух типов причинной детерминации в исследовательском аппарате кибернетики (в применении к изучению систем биосферы) см.: А. И. Берг, Б. В. Бирюков, Е. В. Маркова. Методология сложных систем и проблемы биосферы. — «Методологические аспекты исследования биосферы». М., 1975.

<sup>2</sup> О тех сдвигах, которые происходят в системе методов научного исследования под влиянием кибернетики и связанных с нею наук, см.: Б. В. Бирюков. Кибернетика и методология науки, гл. II.

и формальных моделей (вопрос об исходной информации). Ведь «добротность» моделей в значительной мере зависит от их адекватности, что связано со степенью полноты информации о моделируемом объекте, получаемой на основе выявления причинных зависимостей, добытых во многом «докибернетическими» средствами.

Проблема взаимоотношения «функционального» подхода и формальных методов, с одной стороны, и фактического материала «содержательных» дисциплин и присущего многим из них «субстратного» подхода — с другой, слишком многогранна, чтобы ее можно было здесь рассмотреть в полном объеме. Мы ограничимся поэтому вопросом взаимодействия кибернетики с физикой и «теорией систем».

## 1. ПРОБЛЕМА «ФИЗИКАЛИЗАЦИИ»

Обоснование необходимости содержательной «первонауки», реализующей синтез наук и отображающей те «исходные» объекты и связи, на которых зиждется единство мира, проводилось в различных формах, на всех по существу этапах развития научной и философской мысли. Естественно, что при этом всегда ставился вопрос о поисках более глубокого, по сравнению с формальным аспектом<sup>1</sup>, основания для синтетической интерпретации научных знаний.

Естественно, что роль такой содержательной «первонауки» скорее всего может выполнять именно *физика* — в первоначальном аристотелевском понимании ее как науки о природе вообще. Физика, несомненно, рассматривает самые фундаментальные черты реальности. Формулируя идеал физического знания, А. Эйнштейн писал: «Высшим долгом физиков является поиск тех общих элементарных законов, из которых путем чистой дедукции можно получить картину мира»<sup>2</sup>.

На современном этапе, когда степень единства разделов самой физики резко возросла (хотя еще многое здесь необходимо исследовать, например выяснить, как можно связать теорию относительности и микрофизику), нам кажется, что увеличилась и вероятность осуществления (конечно, в некоторых относительных формах) «идеала» синтеза научных знаний в пределах физических дисциплин (сама

<sup>1</sup> При этом следует иметь в виду, что «формальная» (математическая, логическая и т. п.) сторона в научном познании в разные эпохи была различной; строгость ее, однако, неуклонно возрастает.

<sup>2</sup> А. Эйнштейн. Собр. научных трудов, т. IV. М., 1967, стр. 40.



по себе это задача кардинальной важности)). Тем не менее степень этого единства не удовлетворяет научно-философскую мысль второй половины XX столетия. Над опытными фактами, составляющими фундамент физики, возвышаются отдельные ее разделы, охватывающие широкий круг физических явлений. Каждый из разделов обладает определенной автономией; объединяет их единый объект исследования — материя, рассматриваемая в виде вещества или поля. Факт разделения физики на ряд отдельных теорий, различающихся как по методам, так и по научному языку и основывающихся на совершенно различных и тем не менее связанных между собой понятиях, обычно воспринимается как естественное проявление многообразия окружающей действительности.

Можно выделить два характерных пути развития теоретической физики: 1) «вавилонский», где главное внимание обращается на установление конкретных фактов, соотношений, частных закономерностей и связей между ними, на виртуозное владение простейшими полуинтуитивными понятиями и методами решения конкретных уравнений, и 2) «греческий», где основным инструментом исследования является аксиоматический (или, вернее, гипотетико-дедуктивный) метод и главное внимание обращается на установление «глубинных» связей между фундаментальными понятиями, сформулированными на достаточно абстрактном (хотя и физически содержательном) и непротиворечивом языке.

Состояние физики в настоящее время может быть в целом охарактеризовано как господство «вавилонского» пути развития. «Сегодня, — пишет Р. Фейнман, — наши физические теории, законы физики — множество разрозненных частей и обрывков, плохо сочетающихся друг с другом. Физика еще не превратилась в единую конструкцию, где каждая часть — на своем месте. Пока что мы имеем множество деталей, которые трудно пригнать друг к другу»<sup>1</sup>. Многие физики считают такую ситуацию естественной, полагая, что ее развитие может идти по «вавилонскому» пути, а не по «греческому», что «излишняя» математическая строгость не очень полезна в физике. Почему то, что хорошо для математики, должно быть обязательным и для нематематических наук? Решая этот вопрос, следует обратить внимание на трудности, испытываемые современной физикой.

<sup>1</sup> Р. Фейнман. Характер физических законов. М., 1968, стр. 31.

Когда говорят об этих трудностях, обычно обращаются к исследованию элементарных частиц. Это и понятно, ибо данная сфера представляет собой наиболее фундаментальную область физики: если считать, что вся материя состоит из простейших объектов, то фундамент естествознания должны составлять в конечном счете законы, управляющие элементарными частицами. Перед физиками уже несколько десятилетий стоит задача найти «модель микромира», достаточно адекватно описывающую экспериментальную действительность. Какими общезначимыми принципами руководствоваться в ее построении? Это пока не ясно.

Трудности создания единой теории элементарных частиц являются частным случаем более общих трудностей. Состоят они в отсутствии «порождающей процедуры» построения теорий, дающей в своем постепенном развертывании единую непротиворечивую физическую картину мира, в семантических «изъянах» содержательных интерпретаций законов природы, формулируемых в терминах физики.

Иногда эти общие трудности стараются не замечать. «Если физик, — пишет П. Дирак, — умеет вычислять необходимые результаты и сравнивать их с экспериментом... он вполне счастлив, потому что именно этого он хотел»<sup>1</sup>. Но философски мыслящих ученых, подобных Эйнштейну или Планку, описанная ситуация не может не беспокоить. Широко известен яркий методологический тезис М. Планка: «С давних времен, с тех пор как существует изучение природы, оно имело перед собой в качестве идеала конечную, высшую задачу: объединить пестрое многообразие физических явлений в единую систему, а если возможно, то в одну-единственную формулу»<sup>2</sup>. И дальше Планк обсуждает вопрос, насколько мы действительно приблизились к конечной цели, к единой системе. По его мнению, исследование этих вопросов должно иметь большее значение для всякого физика, который хочет сознательно следить за развитием своей науки, поскольку, если мы сумеем добиться ответа на этот вопрос, мы будем также в состоянии решить другой вопрос, по которому ведется столько горячих споров: чем является по существу то, что мы называем физической картиной мира?

<sup>1</sup> П. А. М. Дирак. Эволюция физической картины природы. — «Над чем думают физики», вып. 3 (Элементарные частицы). М., 1965, стр. 130.

<sup>2</sup> М. Планк. Единство физической картины мира, М., 1966, стр. 23.

В условиях современного интеллектуального климата, по-видимому, оправдана установка на обобщение методологического тезиса М. Планка по крайней мере в двух отношениях. Во-первых, на базе физических идей можно попытаться в минимально возможной степени объединить многообразие всех (а не только физических) явлений реальности. Во-вторых, это объединение не обязательно должно иметь аналитический вид «стабильной системы» формул. Можно предположить, что оно будет осуществляться в форме *метатеоретической* в отношении физических теорий<sup>1</sup> — в виде *системы порождающих правил*, позволяющих выводить утверждения о законах природы и их системы (т. е. теории), предсказывать (и строить) новые теории. Можно полагать, что в результате этого процесса физика как «первонаука» превратится в некоторую «суперфизику», в так сказать панфизическое знание<sup>2</sup>. Физика станет подобно математическому знанию, в котором есть не только «математика», но и «метаматематика» и даже «математика метаматематики», некоторой *системой физических теорий и мета-физических дисциплин*.

Вполне понятно, что обобщенный подход к физике вряд ли ограничится сферой неорганической природы. Для развития концепции «физико-мета-физического» синтеза знания принципиально важным является и вопрос об экстраполяции «физической информации» на сферу живого.

Еще в бурные времена полемики с догматизмом в биологии Н. Н. Семенов отметил, что в ходе физико-химического исследования живого неизбежно будут обнаружены новые физико-химические свойства, специфичные именно для живой материи, но взятой вне обмена веществ со средой. В свою очередь эти новые физико-химические свойства живой материи могут быть поняты на основе обычных и новых специально разработанных физико-химических методов и теорий. Закljučая эти соображения, Н. Н. Семенов писал: «Сомневаться в этом — значит пе-

<sup>1</sup> Здесь надо было бы сказать «в форме метафизики» — по аналогии с метаматематикой. Поскольку, однако, термин «метафизика» понимается в ином смысле, мы будем в дальнейшем употреблять термин «мета-физика».

<sup>2</sup> Такого рода задачу синтеза применительно к неорганической природе сформулировал В. М. Букановский в вышедшей в Перми в 1960 г. работе «Принципы и основные черты классификации современного естествознания».

рейти от материалистических позиций к витализму, к признанию какой-то особой жизненной силы»<sup>1</sup>.

Важнейшую роль в реализации «панфизического синтеза» играет специфика понятийной структуры физики, включающей понятия, «всеобщие» по своей «предметной» интерпретации. М. Планк писал: «Среди общих понятий физики нет ни одного, которое с большим или меньшим успехом не было бы уже перенесено на другие области при помощи какого-либо сочетания идей, внушаемого зачастую внешними обстоятельствами, даже случайностями терминологии»<sup>2</sup>.

Но конечно, и физика в ходе своего развития «ассимилирует» понятия других наук; одним из таких понятий является понятие *информации*<sup>3</sup>. Это необходимо иметь в виду при приложениях физики к наукам о жизни. Вероятно, биологические явления потребуют для своего истолкования существенного видоизменения современной физики, и специфика живого выявится как своеобразие физико-информационных процессов в организмах и их совокупностях. В пользу такого заключения говорят недавние результаты исследований в области предбиологической эволюции макромолекул, проводимых М. Эйгеном. Отличительная черта этих исследований (в их теоретической части) — использование понятия селективной ценности информации в макромолекулярных структурах<sup>4</sup>.

Перспектива «кибернетической составляющей» научного прогресса мыслится в виде некоторого синтеза «функциональной формализованности» и «физической содержательности». С этих позиций следует подчеркнуть тенденцию к математизации и формализации знания (речь об этом шла в гл. II), а также своего рода *физикализацию* научных дисциплин.

Исторически первая развитая концепция физикализации выступила в форме механицизма: все качественное многообразие мира сводилось к процессам, описываемым классической механикой. Известно, что удар по концепции механицизма был нанесен реальным развитием самой

<sup>1</sup> Н. Н. Семенов. О соотношении химии и биологии. — «Вопросы философии», 1959, № 10, стр. 96.

<sup>2</sup> М. Планк. Единство физической картины мира, стр. 195.

<sup>3</sup> И. Б. Новик специально разбирал эту тенденцию «официализации» кибернетики в работе «Кибернетика, философские и социологические проблемы». М., 1963.

<sup>4</sup> См. М. Эйген. Молекулярная самоорганизация и ранние стадии эволюции. — «Успехи физических наук», 1973, т. 109, вып. 3.

физики. И этот удар был более неотразимым, чем критика механистических представлений, которая велась с общеметодологических позиций «надфизических» наук — химии, биологии; это фундаментальное обстоятельство выявилось еще при конструировании механической теории теплоты<sup>1</sup>.

Механицизм явился исторически первой, хотя и несостоятельной, попыткой осуществить синтез научных знаний. Фактически механистическая концепция конструировалась лишь в отношении физических процессов — в применении к теориям теплоты, электромагнетизма; и в этих же теориях была раскрыта ее ошибочность. Что касается химических и биохимических процессов, то в этих областях механистический синтез выступал в роли теоретического идеала.

Однако человеческий разум не расстался с идеей интеграции знаний на базе некоторой единой основы. И хотя первая реализация этой идеи оказалась неудачной, в истории науки она сыграла определенную позитивную роль. «До настоящего времени, — писал Планк, — наиболее важные услуги оказало физике, несомненно, механистическое мировоззрение. Последнее исходит, как известно, из положения, что все качественные различия объясняются в конечном счете движением. Поэтому мы определим механистическое мировоззрение как такое воззрение, согласно которому все физические явления могут быть полностью сведены к движениям материальных точек и материальных элементов»<sup>2</sup>. Приведя этот тезис, Планк отмечал, что, хотя с давних пор положительный ответ на этот вопрос считался постулатом физического исследования, новая физика раскрывает его несовершенство.

В свете современных представлений микрофизики о движении как превращении «себе-нетождественных» частиц ошибочность метафизического допущения о существовании неизменных бесструктурных частиц особенно очевидна.

<sup>1</sup> Характеризуя ее, Б. М. Кедров пишет: «Можно ли в данном случае сказать, что взаимодействие внутри газа *сводится* к механическим процессам в смысле: исчерпывается механическими силами, действующими между отдельными молекулами? Очевидно, нельзя, поскольку газ, будучи термодинамической системой, не является простой механической суммой отдельных молекул. Его качественная специфика ни в коем случае не может быть зачеркнута или сведена к количественным данным, касающимся отдельных молекул» (Б. М. Кедров. Предмет и взаимосвязь естественных наук. М., 1962, стр. 166—167).

<sup>2</sup> М. Планк. Единство физической картины мира, стр. 52.

Сегодняшняя картина самих элементарных физических процессов сложнее, динамичнее. Так, при облучении фотонами и электронами высоких энергий ядер атомов водорода (эти ядра являются одиночными протонами) получаются удивительные результаты. Если попробовать разорвать протон электромагнитным полем фотона очень большой энергии, то появятся новые частицы — мезоны. Но сам протон выходит из этой катастрофы невредимым, ничем не отличающимся от первоначального протона. Ударяя по протону много раз, мы можем получить сколько угодно новых частиц и в принципе даже целых атомов, поскольку число частиц в этих столкновениях не сохраняется<sup>1</sup>.

Итак, механистическое сведение потерпело фиаско. Но почему надо считать процедуру сведения знаний о сложном к знаниям о (относительно более) простом равнозначной механицизму? Сведение как механистическая концепция отказа от признания качественного своеобразия определенных сфер реальности наукой отброшено. Но в обобщенном виде идея сведения продолжает жить в науке. Она состоит в тенденции объяснения — пусть очень опосредованного, многоступенчатого и лишь потенциально осуществимого — *качественного многообразия мира на основе некоторой исходной совокупности фундаментальных законов*. Это — немеханистическое, неметафизическое сведение, понимаемое не как антипод тезиса о разнообразии мира, а как установка на раскрытие его генетической основы.

При таком обобщенном подходе получается как бы онтологическая лестница бытия, где все качественно различные ступени «слиты» в единое структурно сложное интегрированное целое<sup>2</sup>. Вместе с тем в теоретико-эвристическом плане сведение выступает как модельное объяснение сложного явления на данном конкретном исторически определенном уровне познания, связанное с явным или неявным, осознанным или неосознанным упрощением объекта. В этом плане для сведения чрезвычайно существенной является разработка соответствующих языков, прежде всего языков формального, математического описания.

Здесь уместно вспомнить А. Эйнштейна, который считал, что старая теория есть особый случай новой: если силы тяготения сравнительно слабы, старый Ньютон

<sup>1</sup> См. «Вестник АН СССР», 1966, № 1, стр. 88.

<sup>2</sup> В I главе второй части настоящей книги будет сделана попытка проследить (в одном из возможных ракурсов) иерархию сложности объектов реальности.

закон оказывается хорошим приближением к новым законам тяготения. Наблюдения, подтверждающие классическую теорию, подтверждают и общую теорию относительности — мы вновь приходим к старой теории от более высокого уровня новой. Эта ситуация — естественная в свете известного принципа соответствия — показывает, что тезис о единстве объяснения мира не элиминирует качественное многообразие последнего.

В современном познании происходит своеобразное «соревнование» дробления, спецификации знаний и тенденций сведения, понимаемого в очерченном выше диалектическом смысле. Каждая из сторон в этом «соревновании» обладает своими «плюсами» и «минусами». Как же найти правильный путь исследования между непродуктивным переупрощением и переусложнением реальных явлений, граничащим с мистикой непознаваемости? Для этого следует учесть некоторые установки, полезные, по мнению авторов книги, для современного научного познания:

1. Создавая различные научные языки описания тех или иных сфер реальности, следует заботиться не просто об их взаимной переводимости, но о такой *иерархии процедур перевода*, которая восходила бы (быть может, лишь в принципе) к «единому языку» в аристотелевском смысле, который (пока во всяком случае) имеет силу научного идеала.

2. В иерархии таких языков в реальном диалектическом развитии науки и осуществляется то сведение — выведение, которое на деле есть объяснение сложного через простое и анализ простого, рассматриваемого как сложное.

3. При распространении «аристотелевско-физической» семантики на новые «надфизические» сферы следует с достаточной мерой уверенности постулировать необходимость более или менее радикального *обобщения самой физики*, ее понятий, законов и методов.

4. Это обобщение потребует привлечения *информационных* идей (не обязательно в «традиционно-шенноновском смысле») <sup>1</sup>.

5. В математическом плане исследование и разработка процедур сведения — выведения потребуют, по-видимому, привлечения *семиотических* средств, так как будут связаны

<sup>1</sup> Ср. выявляемое в современных исследованиях биосферы информационное воздействие электромагнитных полей на живую природу (см. А. С. Пресман. Электромагнитная сигнализация в живой природе. Факты, гипотезы, пути исследования. М., 1974).

с созданием формализованных метаязыков (и систем метаязыков) для различных отраслей знания.

6. Следует допустить, что объяснение «сложного» через «простое» имеет свои если не принципиальные, то реальные ограничения. Вряд ли можно себе представить, что, например, процессы в нервной системе могут быть когда-либо объяснены через процессы на квантовом уровне.

7. Поэтому методологический постулат «физикализации» должен допускать *членение процедуры объяснения на уровни-переходы*, скажем, от уровня элементарных частиц к квантово-механической картине мира, от нее — к атомному уровню и уровню теории относительности и т. д. вплоть до уровней, связывающих нейродинамические и социально-психологические закономерности, а эти последние — с закономерностями социо- и ноосфер.

8. Процесс объяснения, таким образом, будучи транзитивным на уровне «абстрактной» возможности, не является таковым на «фактическом» уровне реального мышления ученого. Если процессы в системе *A* объясняются в терминах системы *B*, а процессы системы *B* объясняются в терминах системы *C*, то почему процессы в системе *A* должны обязательно объясняться в терминах системы *C*? *Нетранзитивность* фактически осуществимого сведения — выводения следует считать, по-видимому, *фундаментальной чертой человеческого познания*.

9. Тезис «физикализации», таким образом, имеет смысл в рамках абстракции типа абстракции потенциальной осуществимости, используемой в основаниях математики. Программа «физически содержательного» синтеза знания, восходящего к «элементарным кирпичикам» бытия (раскрытым на данном уровне микропознания), существует лишь в качестве некоей методологической установки. Состоит она в стремлении как можно дальше *«продлить» транзитивность «объяснительного процесса»* в цепи систем  $A_1, A_2, \dots$ . Реально это «продление» всегда *имеет свои границы*. Но именно эта установка вдохновляет на исследования, приводящие к раскрытию новых способов проникновения вглубь материи. Именно она определяет построение моделей (в том числе формальных) процессов одной природы в терминах процессов иной природы.

10. Нетранзитивность «фактически осуществимого» объяснения, с неизбежностью проявляющаяся при достаточно длинной «цепочке объяснений», становится особенно очевидной в случае *реальных сложных систем*, изучаемых



в кибернетике. С этих позиций «кибернетизация» как установка на изучение сложных систем управления и переработки информации может рассматриваться как некий *диалектический антипод* «физикализации». Взаимодействие этих противоположных тенденций должно учитываться во всех философско-методологических исследованиях, касающихся физики и кибернетики.

## 2. МЕТАТЕОРЕТИЗАЦИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ЗНАНИЙ О ПРИРОДЕ

Всякая развитая физическая теория обладает *эвристической ценностью*: в ней заложены, часто в скрытой форме, глубокие принципы, которые при умелой экстраполяции за пределы данной теории могут привести к созданию нового физического «формализма» или стать исходным пунктом новых содержательных идей. В качестве примера укажем на Гамильтонову формулировку классической механики. Известно, что для реализации любой задачи механики достаточно правильно записать систему уравнений Ньютона и проинтегрировать ее при заданных начальных условиях. Однако стремление сформулировать законы механики в наиболее общем и инвариантном относительно выбора обобщенных координат виде привело к созданию «второго этажа» механики — аналитической механики с весьма своеобразным каноническим формализмом (канонические переменные, уравнения Лагранжа и Гамильтона, скобки Пуассона, принцип стационарного действия, уравнения в частных производных Гамильтона — Якоби). Именно этот «второй этаж» механики (представляя собой по сути дела лишь новую, более изящную формулировку известных законов Ньютона) приобрел новое качество — эвристическую ценность: именно на его языке, с помощью его формального аппарата удастся естественным образом выйти за пределы классической механики и сформулировать основные уравнения и принципы квантовой механики и статистической физики.

Период, начавшийся с создания специальной теории относительности и современной квантовой механики и закончившийся объяснением лэмбовского сдвига и аномального магнитного момента электрона в квантовой электродинамике, по праву может быть назван «золотым веком» физики. Этот период был замечателен тем, что удивительное согласие результатов теории с экспериментом достигалось

путем формального решения уравнений, содержащих величины, наши знания о которых ограничены поверхностными и интуитивными представлениями.

Но «золотой век» физики кончился. Уравнения квантовой механики, теории относительности и квантовой электродинамики, по-видимому, исчерпали себя. Становится все более очевидным, что построение последовательной теории элементарных частиц возможно лишь на базе новых физических принципов, новой физической картины мира, но «нельзя даже подойти к новой теории, пока мы ясно не поняли математической природы старых»<sup>1</sup>. Поэтому одной из очередных задач, стоящих перед современной физикой, является поиск новых физических принципов, с точки зрения которых все известные физические теории являлись бы естественными частными случаями. Как можно представить себе пути решения этой важнейшей теоретической задачи?

Нам представляется, что полезными здесь являются сформулированные в конце предыдущего параграфа методологические принципы, постулирующие распространение на физику *метатеоретического* (и значит, семиотического) подхода и предполагающие существенное использование в физике «кибернетического» понятия информации. Разумеется, сейчас невозможно предсказать, какую реальную форму (или формы) примет работа по созданию «мета-физики». Можно, однако, привести пример такого рода концепции, которая названа ее автором «теорией физических структур»<sup>2</sup> и с точки зрения которой физика оказывается (как это ни парадоксально) *частным случаем кибернетики* в том понимании последней, которое предложил А. А. Марков (кибернетика — теория причинных сетей, изучаемых с точностью до изоморфизма)<sup>3</sup>.

Издавна перед «учением о природе» — о ее фундаменте — витал призрак такой физической картины мира, где было

<sup>1</sup> Фримен Дж. Дайсон. Новаторство в физике. — «Над чем думают физики», вып. 2 (Элементарные частицы). М., 1963, стр. 103.

<sup>2</sup> Ю. И. Кулаков. Некоторые замечания о единой физической картине мира. — «Теория и метод», 1971, т. 3, № 3; *его же*. Элементы теории физических структур (дополнение Г. Г. Михальченко). Новосибирск, 1968; *его же*. Об одном принципе, лежащем в основании классической физики. — «Доклады АН СССР», 1970, т. 193, № 1; *его же*. О новом виде симметрии, лежащей в основании физических теорий феноменологического типа. — «Доклады АН СССР», 1971, т. 201, № 3.

<sup>3</sup> См. А. А. Марков. Что такое кибернетика? — «Кибернетика, мышление, жизнь». М., 1964.

бы небольшое число исходных принципов и фундаментальных понятий — «правил порождения», из которых вытекали бы как следствия, как «теоремы» все (хотя бы известные) физические законы. Возможна ли такая система? Попробуем показать, что по крайней мере приближение к такой системе возможно.

Подчеркием обобщенно-метатеоретический и «информационный» характер, которым должна обладать такая теория. От всех существующих физических теорий, описывающих конкретные классы физических явлений, она отличается тем, что должна давать способ достаточно адекватного описания, изучения и классификации одного из самых первичных понятий физики — *физического закона* как некоторого логического (более обще: семиотического) объекта, называемого номологическим высказыванием. При этом рассмотрение должно вестись на таком уровне абстракции, на котором фундаментальные «празаконы» физики, подобно законам арифметики, оказываются не зависящими от конкретной физической интерпретации рассматриваемых объектов.

Оставим в стороне формально-логическую сторону дела, связанную с номологическими высказываниями вообще (их содержание может относиться не только к физике, но и к другим наукам), и сосредоточим внимание именно на *физической* стороне дела. Если даны исходные принципы и первичные понятия, то в чем могут состоять «правила порождения»? В качестве таковых можно использовать свойства симметрии — источника весьма простого, но, как мы постараемся показать, достаточно богатого возможностями «информационного аппарата».

Будем считать, что все физические объекты можно разбить на два различных класса: феноменологический («гомогенный», «непрерывный») класс и класс «дискретный»<sup>1</sup>. Предполагается, что системы, состоящие из дискретных объектов, обладают той или иной групповой симметрией и описываются теорией групп. Что касается феноменологических систем (физическая теория пространства и времени, теория относительности, механика, электродинамика, термодинамика и в большей своей части квантовая механика), которые в дальнейшем будут иметься в виду, то для их описания необходим математический аппарат, достаточно адекватно отражающий специфические

<sup>1</sup> Об относительности противопоставления «дискретное — непрерывное» см.: Б. В. Бирюков, *Кибернетика и методология науки*, стр. 91.

особенности физических объектов феноменологического типа и измерительных операций. Допущение возможности создания некоторой общей теории «феноменологически-информационной симметрии» означает, что упомянутые теории могут быть построены путем применения некоторой порождающей процедуры. Теория этой процедуры и может рассматриваться как метатеория физики.

Смысл принципа «феноменологической симметрии» состоит в следующем.

Пусть  $\mathcal{M} = \{i\}$  и  $\mathcal{N} = \{v\}$  — два бесконечных множества «физических» объектов некоторой произвольной природы (в общем случае «природа» множеств, т. е. их элементов, является различной). Множества эти не предполагаются упорядоченными, однако требуется, чтобы объекты могли быть, хотя бы в принципе, индивидуализированы. Постулируется, далее, что для объектов каждого из множеств может быть как-то устанавливаемо отношение «одинаковости», которое, однако, не уточняется, а предполагается первоначально ясным. В примере, который будет рассмотрен ниже, в качестве множества  $\mathcal{M}$  будет фигурировать множество «всех тел», а в качестве множества  $\mathcal{N}$  — множество «всех ускорителей». Заметим, что множества  $\mathcal{M}$  и  $\mathcal{N}$  не обязательно «числовой природы». Это именно физические объекты («ускорителем», например, может быть некое «конкретное» электромагнитное поле в заданной «точке» или области пространства).

На множествах  $\mathcal{M}$  и  $\mathcal{N}$  определена некоторая «практическая» операция  $\mu$ , сопоставляющая каждой паре  $\langle i, v \rangle$ ,  $i \in \mathcal{M}$ ,  $v \in \mathcal{N}$ , какое-то (рациональное или действительное) число. Операцию эту мы будем называть операцией *измерения*, ибо так введенное представление о ней включает в себя «обычные» измерительные процедуры в физике, связанные часто с теми или иными «расчетами по формулам» (заметим, что эти расчеты могут быть заложены в самом измерительном приборе). Здесь становится понятным требование определенности отношения «одинаковости» на каждом из  $\mathcal{M}$  и  $\mathcal{N}$ : измерения «одних и тех же» объектов могут быть повторены много раз.

Сказанное означает, что на декартовом произведении множеств  $\mathcal{M} \times \mathcal{N}$  «экспериментально», благодаря операции  $\mu$ , определено отображение (функция) его элементов во множество  $R$  действительных (или рациональных) чисел, что можно представить как  $\mathcal{M} \times \mathcal{N} \xrightarrow{\mu} R$ . Обозначим его через

$a_{iv}^n$ , где  $i \in \mathbb{M}$ ,  $v \in \mathbb{N}$ . Его можно понимать как бесконечную (по обоим входам  $i$  и  $v$ , причем в обе стороны) таблицу, в которой строки и столбцы расположены произвольным образом, а для любой пары строк (соответственно, столбцов), где бы они ни были расположены, может оказаться, что ее элементы «одинаковы».

Здесь отчетливо видно, что происходит разрыв с галилеевской точкой зрения в физике (Галилей, как известно, говорил, что «великая книга природы» написана «математическим» языком). Этот язык физики всегда трактовали как язык чисел и вычислений. В нашей же бесконечной таблице, где  $i \in \mathbb{M}$  — строки, а  $v \in \mathbb{N}$  — столбцы, «входы» (аргументы «задаваемой» таблицей функции  $a^n$ ) носят *нечисловой* характер<sup>1</sup>. В этом смысле мы можем сказать, что возвращаемся от «галилеевской» физики к физике «аристотелевской»<sup>2</sup>.

Поскольку операция  $\mu$  (для разных  $\mathbb{M}$  и  $\mathbb{N}$  различная) мыслится как опытно (практически) осуществляемая, прежде всего как процедура измерения (т. е. реального «действия» над некоторой парой  $\langle i, \beta \rangle$ ,  $i \in \mathbb{M}$ ,  $\beta \in \mathbb{N}$ , дающего некоторое число, скажем, считываемое со шкалы некоторого прибора), то упомянутую бесконечную таблицу естественно назвать «таблицей (матрицей) экспериментальных данных». Ее «заполнение», естественно, лишь потенциально осуществимый процесс; существенно, однако, что оно для некоторых фиксированных (и тем более произвольных)  $\mathbb{M}$  и  $\mathbb{N}$  не может быть каким угодно (допущение этого означало бы отказ от признания в природе каких-либо закономерностей). «Отказ от произвола» может принимать форму лишь наложения некоторых ограничений на вид таблицы. Исходя из эвристических соображений, навеянных широким кругом наук о природе (не только физикой!), о фундаментальном характере феноменов *симметрии* в природе (и искусстве)<sup>3</sup>, будем стремиться к такой «регуляри-

<sup>1</sup> То обстоятельство, что при «составлении» таблицы (всегда какого-либо ее фрагмента) объекты из  $\mathbb{M}$  и  $\mathbb{N}$  приходится как-то именовать и именование это производится с помощью чисел, с «физической» точки зрения, конечно, не существенно.

<sup>2</sup> Впрочем, обобщенное понимание математики как теории любых «математических структур», не обязательно «числовой природы» (Н. Бурбаки), или как части науки о знаках — семиотики (А. А. Марков) вновь возвращает нас «к Галилею», но уже переосмысленному или, точнее, к интеграции «галилеевской» и «аристотелевской» позиций.

<sup>3</sup> Мы не уточняем здесь понятия симметрии, отсылая читателя к многочисленной литературе по этому вопросу.

зации» этих ограничений, чтобы получить способ порождения из всего «мира» бесконечных таблиц экспериментальных данных такие, которые обладают всевозможными симметриями (определенного вида или, точнее, задаваемых определенными средствами). Иначе говоря, предлагается гипотеза, что на описанном пути возможна формулировка *порождающей процедуры*, позволяющей строить утверждения о возможных законах природы — эмпирических законах! — как результат введения определенных ограничений на вид бесконечной таблицы экспериментальных данных.

Зафиксируем теперь  $\mathcal{M}$  и  $\mathcal{N}$  (это можно выразить как отбрасывание нижних индексов у функции  $a$ ). Возьмем из «таблицы экспериментальных данных» произвольные  $m$  строк и  $n$  столбцов. Рассмотрим числа, стоящие на их пересечениях. Они образуют некоторую матрицу в смысле линейной алгебры, и поэтому мы напомним:

$$M_{(mn)} = \begin{pmatrix} a_{11}^{\mu} & a_{12}^{\mu} & \dots & a_{1n}^{\mu} \\ a_{21}^{\mu} & a_{22}^{\mu} & \dots & a_{2n}^{\mu} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1}^{\mu} & a_{m2}^{\mu} & \dots & a_{mn}^{\mu} \end{pmatrix}$$

(верхние индексы  $\mu$  при элементах матрицы напоминают, что соответственные числа получены экспериментально, с помощью операции  $\mu$ ).

Ясно, что вид матрицы  $M$  зависит от того, какие строки и столбцы мы выбрали для нее из бесконечной таблицы экспериментальных данных, и что таких матриц может быть бесконечно много. *Принцип феноменологической симметрии*, который мы можем теперь сформулировать, состоит в следующем.

Будем считать, что на двух (фиксированных) множествах  $\mathcal{M}$  и  $\mathcal{N}$  физических объектов задана физическая структура ранга  $(m, n)$  (где  $m$  и  $n$  — натуральные числа не меньшие 2), если и только если как бы ни выбирать  $m$  строк и  $n$  столбцов рассматриваемой бесконечной таблицы экспериментальных данных, они дают на своих пересечениях такие матрицы  $M_{(m,n)_S}$  (индекс  $s$  означает «пробег» по всему бесконечному множеству матриц), что если ввести некоторую числовую функцию от  $m \cdot n$  переменных, определенную на элементах матрицы  $M_{(m,n)_S}$ , то

$$\Phi(a_{11}^{\mu}, a_{12}^{\mu}, \dots, a_{mn}^{\mu}) = 0. \quad (1)$$

Это равенство и есть способ ограничения вида функции  $a^{(i,v)}$  (при фиксированных  $\mathcal{M}$  и  $\mathcal{N}$ ), с которой мы начали наши рассуждения. Ниже мы рассмотрим случай, когда  $m$  и  $n$  будут равны 2.

Принцип «феноменологической симметрии» является следствием *равноправия* «природных» объектов из  $\mathcal{M}$  и  $\mathcal{N}$  по отношению к некоторому физическому закону (законам). Можно показать, что из него — при соответствующих спецификациях, т. е. выборе  $\mathcal{M}$  и  $\mathcal{N}$  — можно дедуцировать достаточное многообразие физических законов; различие между законами — в том числе по степени их общности (ср. принцип соответствия Бора!) — в общем случае окажется зависящим от чисел  $m$  и  $n$ , определяющих вид функции  $a$ .

В сформулированном принципе заложены не только процедура порождения физических законов — с точностью до их эквивалентных друг другу математических формулировок (что мы увидим на примере второго закона Ньютона) и в рамках, определяемых самой процедурой, — но и ограничения на возможные значения опытных данных<sup>1</sup>. Важно также, что он позволяет, используя в качестве исходного источника информации «таблицу экспериментальных данных», строго вводить понятия о физических величинах, фигурирующих в традиционных формулировках законов. Это вполне понятно, так как любая физическая величина (скорость, расстояние, время, масса, температура, энтропия и т. д.) определяется «внутренней структурой» соответствующего множества пар  $\mathcal{M} \times \mathcal{N}$ <sup>2</sup> и не может быть введена произвольно по определению.

Установим теперь связь изложенных здесь идей с определением кибернетики, предложенным в свое время А. А. Марковым. Не приводя здесь его взглядов (они изложены в упоминавшейся нами статье), отметим лишь две характерные черты, существенные для нашего рассмотрения. Во-первых, А. А. Марков понимает кибернетику «нетрадиционно»: сохраняя в ее рамках идею информации, он не сохраняет в ней идею управления. Ясно, что такой подход удобен для установления «родства» между физикой и ки-

<sup>1</sup> См. Г. Г. Михальченко. Решение функциональных уравнений в теории физических структур. — «Доклады АН СССР», 1972, т. 206, № 5.

<sup>2</sup> То, что мы пользуемся здесь двумерными пространствами, т. е. двухаргументными функциями  $\mu$ , не ограничивает возможностей данного подхода; как показано в литературе, выход в многомерное пространство не обогащает данный подход.

бернетикой: «физические структуры» можно рассматривать как частный случай «причинных сетей» А. А. Маркова. Во-вторых, Марков связывает процессы причинения в причинных сетях (и передачи информации в них) с использованием описываемой в логике процедуры дедукции на основе установленных — вне логики — утверждений о законах природы; при этом, однако, сама идея «закона природы» остается вне его рассмотрения.

Концепция «физических структур» служит как раз уточнению идеи закона природы (как закона физики — конечно, не во всем его объеме), выполняя мета-физическую роль. Тем самым она, по-видимому, открывает возможность в дальнейшем «надеть» на содержательные номологические высказывания части физики некоторую (дедуктивную) логику. Здесь, однако, надо сделать одну существенную оговорку. Используя в качестве исходной информации бесконечную таблицу экспериментальных данных, мы не можем алгоритмизировать поиск заключенной в ней физической структуры, так как невозможно перебрать бесконечное множество матриц  $M_{(m,n)}$ , тем более для любых  $m$  и  $n$ . Предлагаемый подход не нацелен, чтобы по экспериментальным данным находить «скрытые» за ними законы — это на протяжении всей истории физики делалось без мета-физики. Но он позволяет, во-первых, устанавливать отношения между законами — быть средством их дедукции; во-вторых (коль скоро вид соотношения (1) достаточно убедительно установлен), вводить физические величины, заключенные в структурах объектов нечисловой природы; наконец, в-третьих, по возможным соотношениям вида (1) (простейший алгоритм их обозрения — это простой перебор), для которых не сформулированы соответствующие им номологические высказывания, искать гипотетические законы физики.

Покажем, как на данном пути возможно получить законы механики. Подчеркнем, что существенную роль здесь будет играть только требование равноправия всех тел, с одной стороны, и всех ускорителей — с другой. Рассмотрим множество  $\mathcal{M}^0$  всех тел:  $\dots, i, j, \dots, r, \dots$  и множество  $\mathcal{N}^0$  ускорителей:  $\dots, \alpha, \beta, \dots, \xi, \dots$  (под «ускорителем» понимается произвольный «механизм», сообщающий телам ускорения). Ускоритель  $\xi$ , действуя на тело  $r$ , сообщает ему ускорение  $a_{r,\xi}$ . Если бы можно было рассмотреть (измерить) воздействие всех возможных ускорителей из  $\mathcal{N}^0$  на все тела из  $\mathcal{M}^0$ , то множество всех полученных при этом ускорений можно



было бы «записать» в виде следующей матрицы, представляющей соответствующую бесконечную таблицу экспериментальных данных:

$$M = \begin{pmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & a_{i\delta} & a_{i\varepsilon} & \dots & a_{i\xi} & \dots \\ \dots & a_{j\delta} & a_{j\varepsilon} & \dots & a_{j\xi} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & a_{r\delta} & a_{r\varepsilon} & \dots & a_{r\xi} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}.$$

Вся информация о закономерности отношения между телами и ускорителями в конечном счете заложена в этой матрице. Как известно, этого сделать нельзя: бесконечные процедуры измерения нереализуемы. Но этого и не требуется. Мы можем воспользоваться требованием равноправия, выражаемого принципом феноменологической симметрии (1), и тем постулатом, что результаты измерения *должны* удовлетворять этому принципу. Для второго закона Ньютона, в его традиционной формулировке  $ma = F$ , это означает следующее ограничение на  $M$ : ее ранг равен единице, т. е.

$$a_{pv}a_{r\xi} - a_{p\xi}a_{rv} = 0. \quad (2)$$

[В том, что это так, нетрудно убедиться, положив  $a_{pv} = \frac{F_v}{m_p}$  (где  $a_{pv}$  — ускорение,  $m_p$  — масса тела  $p$ ,  $F_v$  — сила, порожденная неким ускорителем  $v$ ) и аналогичным образом истолковав  $a_{r\xi}$ ,  $a_{p\xi}$  и  $a_{rv}$ . Впрочем, ссылка на «массу» и «силу» здесь еще не совсем законна, так что на приведенную фразу следует смотреть не как на обоснование соответствующего факта, а как на эвристическую аргументацию в его пользу.]

Поскольку соотношение (2) содержит лишь измеряемые на опыте ускорения и верно при любом выборе пары «тело — ускоритель», его можно понимать как выражение некоторой «навеваемой» опытом закономерности. В то же время эта закономерность оказывается предусмотренной принципом «феноменологической симметрии». Дело в том, что равенство (2) есть частный случай соотношения вида

$$\Phi(a_{pv}, a_{p\xi}, a_{rv}, a_{r\xi}) = 0. \quad (3)$$

Если потребовать, чтобы (3) было верно при любом выборе индексов при буквах  $a$  (требование «феноменологической» инвариантности) — на эти индексы можно смотреть как на аргументы функции  $a$ , они соответствуют стро-

кам и столбцам бесконечной таблицы экспериментальных данных и имеют, как мы отмечали, «нечисловую природу», — то левая часть (3) окажется равнозначной левой части соотношения (2) (с точностью до произвольного преобразования  $\bar{a}_{pv} = g(a_{pv})$ , зависящего от градуировки измерительного прибора)<sup>1</sup>. Тогда соотношение (2), которое можно назвать вторым законом Ньютона в феноменологически-инвариантной форме, окажется частным случаем принципа «феноменологической симметрии».

Из соотношения (2) следует существование двух феноменологических инвариантов, характеризующих соответственно ускорители и тела; эти инварианты мы обозначим через  $\Phi_{v\xi}$  и  $\Psi_{i,k}$ . Сказанное следует из того, что отношение двух ускорений  $a_{iv}$  и  $a_{i\xi}$  одного и того же тела  $i$  под воздействием двух различных ускорителей  $v$  и  $\xi$  не зависит от выбора тела, т. е.

$$\frac{a_{iv}}{a_{i\xi}} = \frac{a_{kv}}{a_{k\xi}} = \frac{a_{lv}}{a_{l\xi}} = \dots = \Phi_{v\xi},$$

где  $\Phi_{v\xi}$  — некоторая величина, являющаяся характеристикой отношения ускорителей  $v$  и  $\xi$ , инвариантная относительно выбора тел. Точно так же из равенства (2) следует, что отношение ускорений  $a_{iv}$  и  $a_{kv}$  двух различных тел  $i$  и  $k$  под воздействием одного и того же ускорителя  $v$  не зависит от выбора этого ускорителя, т. е.

$$\frac{a_{iv}}{a_{kv}} = \frac{a_{i\xi}}{a_{k\xi}} = \frac{a_{i\pi}}{a_{k\pi}} = \dots = \Psi_{ik},$$

где  $\Psi_{ik}$  — величина, являющаяся характеристикой отношения тел  $i$  и  $k$ , инвариантная относительно выбора ускорителей. Назовем одно из тел (например, тело  $k$ ) и один из ускорителей (например, ускоритель  $\xi$ ) «эталоными» и переобозначим их соответственно через  $o$  и  $\bar{o}$ . Тогда будем иметь

$$a_{iv} = a_{o\bar{o}} \Phi_{v\bar{o}} \Psi_{io}. \quad (4)$$

Так как способ нахождения инвариантов  $\Phi$  и  $\Psi$  известен:

$$\Phi_{v\bar{o}} = \frac{a_{kv}}{a_{k\bar{o}}}, \quad \Psi_{io} = \frac{a_{i\bar{o}}}{a_{o\bar{o}}},$$

<sup>1</sup> См. Ю. И. Кулаков. Математическая формулировка теории физических структур. — «Сибирский математический журнал», 1971, т. 12, № 5.

то равенство (4), представляющее собой мультипликативную форму записи второго закона Ньютона, допускает опытную проверку и имеет смысл физического закона, эквивалентного (4).

Но при этом возникает новый вопрос: как влияет на  $\varphi_{v\bar{o}}$  и  $\psi_{i\bar{o}}$  процедура композиции соответственно ускорителей и тел? Дать ответ на этот вопрос может только опыт. Он состоит в следующем.

Рассмотрим произвольное тело  $i$  и два ускорителя:  $v$  и  $\xi$ ; измерим три ускорения:  $a_{iv}$ ,  $a_{i\xi}$  и  $a_{i,v+\xi}$  тела  $i$  при одновременном воздействии ускорителей  $v$  и  $\xi$ . Опыт показывает, что имеет место следующее соотношение, справедливое при любых  $v$  и  $\xi$ :

$$a_{iv} + a_{i\xi} = a_{i, v+\xi}.$$

Подставляя в него выражение (4), получаем, что «феноменологический» инвариант  $\varphi_{v\bar{o}}$  обладает свойством аддитивности:

$$\varphi_{v\bar{o}} + \varphi_{\xi\bar{o}} = \varphi_{v+\xi, \bar{o}}.$$

Рассмотрим далее два произвольных тела  $i$  и  $k$  и один ускоритель  $v$ ; измерим ускорения  $a_{iv}$ ,  $a_{kv}$  и ускорение  $a_{i+k, v}$  тела, полученного путем объединения в одно целое тел  $i$  и  $k$ , при воздействии ускорителя  $v$ . Как и в предыдущем случае, результаты трех измерений оказываются связанными между собой. Однако в отличие от предыдущего эта связь имеет несколько иной вид:

$$\frac{1}{a_{i+k, v}} = \frac{1}{a_{iv}} + \frac{1}{a_{kv}}.$$

Произведя подстановку на основе равенства (4), получаем, что свойством аддитивности обладает величина, обратная «феноменологическому» инварианту  $\psi_{i\bar{o}}$ :

$$\frac{1}{\psi_{i+k, \bar{o}}} = \frac{1}{\psi_{i\bar{o}}} + \frac{1}{\psi_{k\bar{o}}}.$$

Таким образом, в качестве характеристики ускорителя  $v$  можно взять  $\varphi_{v\bar{o}}$  и назвать ее «силой»  $F_{v\bar{o}}$ , а в качестве характеристики тела  $i$  взять  $\frac{1}{\psi_{i\bar{o}}}$  и назвать ее «массой»  $m_{i\bar{o}}$  (хотя в принципе мы могли бы назвать «силой» и «массой» любую монотонную функцию от  $\varphi_{v\bar{o}}$  и  $\psi_{i\bar{o}}$  соответственно; правда, введенные так «сила» и «масса» обладали бы неаддитивным законом композиции).

Итак, оказывается, что сила  $F_{v\bar{o}}$  есть относительный аддитивный, «феноменологический» инвариант  $\Psi_{v\bar{o}}$ , зависящий от выбора эталонного ускорителя  $\bar{o}$  и не зависящий от выбора тела  $k$ :

$$F_{v\bar{o}} = \frac{a_{kv}}{a_{k\bar{o}}}.$$

Точно так же массой тела  $i$  оказывается относительный аддитивный «феноменологический» инвариант  $\frac{1}{\Psi_{i\bar{o}}}$ , зависящий от выбора эталонного тела  $o$  и не зависящий от выбора ускорителя  $\xi$ :

$$m_{i\bar{o}} = \frac{a_{o\xi}}{a_{i\xi}}.$$

Если зафиксировать эталонное тело  $o$ , то тем самым устанавливается определенная «размерность» массы. Точно так же можно произвольно зафиксировать эталонный ускоритель и установить соответствующую «размерность» силы. Но часто из-за соображений удобства эталонный ускоритель выбирают в зависимости от эталонного тела (например, так, чтобы ускорение  $a_{o\bar{o}}$  эталонного тела  $o$  под действием этого эталонного ускорителя  $\bar{o}$  равнялось единице).

Но вернемся к соотношению (2). Переписывая его в новых обозначениях, получаем второй закон Ньютона в его окончательной традиционной формулировке:  $a_{i\nu} = \frac{a_{o\bar{o}} F_{v\bar{o}}}{m_{i\bar{o}}}$ , или, при специальном выборе эталонного ускорителя, в виде  $m_i a_{i\nu} = F_{\nu}$ .

Необходимо отметить, что соотношение (2), выражая свойства отношения между множеством тел и множеством ускорителей, остается справедливым как в рамках классической Ньютоновой механики, так и в рамках специальной и даже общей теории относительности. Все отличие состоит лишь в выборе той или иной геометрии и соответствующей ей кинематики. Так, если под  $a_{i\nu}$  понимать обычное ускорение  $\frac{dv^\lambda}{dt}$  ( $\lambda = 1, 2, 3$ ), то мы получаем второй закон Ньютона в его нерелятивистской формулировке:  $m_i \left( \frac{dv^\lambda}{dt} \right)_{i\nu} = F_{\nu}^\lambda$ ; если же в качестве  $a_{i\nu}$  принять 4-ускорение  $\frac{du^n}{d\tau}$  ( $n = 0, 1, 2, 3$ ), ковариантное относительно преобразований Лоренца, то мы получим выражение для

второго закона Ньютона в рамках специальной теории относительности:

$$m_i \left( \frac{du^n}{d\tau} \right)_{iv} = F_v^n.$$

Наконец, если под  $a_{iv}$  понимать абсолютное общековариантное 4-ускорение, то получим второй закон Ньютона в рамках общей теории относительности:

$$m_i \left( \frac{du^n}{d\tau} + \Gamma_{pq}^n u^p u^q \right)_{iv} = F_v^n.$$

Итак, мы видим, что во всех случаях осуществлено полное отделение динамических понятий — массы  $m_i$  и силы  $F_v$  (негравитационной природы) от чисто кинематического понятия — ускорения  $a_{iv}$ , так что во всех случаях мы имеем второй закон Ньютона в одной и той же формулировке: произведение постоянной массы материальной точки  $m_i$  на ее абсолютное ускорение  $a_{iv}$  равно действующей силе  $F_v$ .

В очерченном подходе ясно видны метатеоретические черты. Предметом изучения становятся не отдельные физические объекты и конкретные явления, а сами физические теории. Цель подобных попыток — в установлении общих принципов (аналогов «правил порождения» в логике и математической лингвистике), позволяющих получать утверждения о законах физики. В данном случае использовано понятие «физической структуры», которое позволяет выявлять связи между различными теориями и на метатеоретическом пути получать не только законы механики Ньютона, но и оба начала термодинамики, принцип постоянства скорости света, принцип суперпозиции в квантовой механике и др. Но в физике, разумеется, возможны и другие метатеоретические подходы, которые в перспективе могут привести к созданию «семиотики физики».

Описанный «порождающий механизм» мета-физики отличен от механизмов чистой дедукции, так как включает в себя существенный момент эвристики (индукции, гипотезы и т. п.). Однако иначе, по-видимому, и не может быть, по какому бы пути мы ни пошли.

### 3. ФИЗИКА, КИБЕРНЕТИКА, ТЕОРИЯ СИСТЕМ

Известно, что в кибернетических дисциплинах мера абстрактности, отвлечения от качественной характеристики явлений может быть весьма различной<sup>1</sup>. Но «абсолютным» такое отвлечение в целом быть не может хотя бы уже потому, что сама природа материи, выявляемая физикой, накладывает определенные ограничения на процесс переработки информации. Одно из необходимых условий сохранения информации в сложных системах — устойчивость физического субстрата.

В последнее время в ряде специальных наук отчетливо прослеживается тенденция рассматривать структурные характеристики исследуемых систем в тесной связи с «субстратными», физическими. Например, в статье «О взаимосвязи информации и энергии в нервно-психической деятельности» Л. М. Веккер и И. М. Палей высказывают мысль о том, что информационно-энергетические соотношения по самой их природе следует рассматривать как своего рода «функции», в которых энергетические характеристики выступают как независимые, а информационные — как зависимые «переменные»<sup>2</sup>. Это естественно ведет к «структурному» пониманию информации, ибо структура (в реальности, а не в «голой» абстракции) есть всегда структура «чего-то», а также к системному подходу к исследуемым объектам.

Следует подчеркнуть, что «системный подход» издавна присущ науке и философии. У Ф. Энгельса мы читаем: «Вся ... природа образует некую систему, некую совокупную связь тел, причем мы понимаем здесь под словом тело все материальные реальности, начиная от звезды и кончая атомом...»<sup>3</sup> Кибернетика является лишь одной из форм его современной научной конкретизации.

Это и понятно. Любая динамическая материальная система включает в себя два класса основных характеристик: «материальные» («субстратно-субстанциональные») и структурные. Первые характеристики касаются вещественно-энергетических взаимодействий. Структурные характеристики описываются в терминах «структуры» (если это

<sup>1</sup> См. «Ленин и современное естествознание». М., 1969, стр. 309—310.

<sup>2</sup> «Методологические проблемы кибернетики». Материалы к Всесоюзной конференции, вып. 1. М., 1970, стр. 286.

<sup>3</sup> К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. 20, стр. 392.

понятие подвергается разумной экспликации), «информации», «уровня организации». «Системы» представляют собой некоторое единство «субстратно-субстанциональных» и «структурных» характеристик, и если они динамические, т. е. изменяющиеся во времени, то динамика может касаться в общем случае как первых, так и вторых характеристик.

Рассматривая системы как единство «субстратных» элементов, связанных между собой взаимодействием и расположенных в пространстве и времени, т. е. как определенные (динамические) организации, мы можем подходить к ним с двух сторон. Можно смотреть на «реальную» систему как на множество (множества) элементов, занимающих определенные пространственно-временные и иные «позиции», и уже от элементов идти к структуре (строению целого). Именно таким был подход в предшествующем параграфе, где предполагались фиксированными, данными множества  $M$  и  $N$ . Такой подход присущ не только физике. В современной химии, например, в отношении молекул тоже говорят об их элементах — атомах, связанных валентными силами.

Но возможен противоположный путь — от изучения структур систем в их «общем виде», т. е. взятых в абстракции от «субстратного» аспекта, к постепенному введению в рассмотрение соображений, касающихся и динамики, и вещественно-энергетических взаимодействий. Этот подход обычно называют «теорией систем», или «общей теорией систем». Кибернетика находится «посредине», между этими двумя полюсами: физикой в аристотелевском смысле и «теорией систем».

Каково соотношение между последними двумя элементами этой «триады»? В чем сходство «теории систем» и кибернетики и в чем их различие?

Как известно, кибернетика прошла путь развития от чисто технической дисциплины (например, в «завуалированном» облике теории автоматического регулирования) до широкого теоретического направления, изучающего общие свойства управляющих (кибернетических) систем<sup>1</sup>.

Иными путями шли «общесистемные» исследования. С самого начала они были направлены на выделение наиболее общих свойств систем<sup>2</sup>. Поэтому истоками общей

<sup>1</sup> См. М. Г. Гаазе-Рапопорт. Кибернетика и теория систем. — «Системные исследования». Ежегодник. М., 1973.

<sup>2</sup> См. «Проблемы методологии системного исследования». М., 1970; Л. фон Берталанфи. Общая теория систем — критический обзор. —

теории систем можно считать философско-методологические представления о системе и ее свойствах, попытки абстрактного структурно-логического изучения биологических и еще более сложных — общественных систем, а также самой науки как системы знаний.

В дальнейшем развитие теории систем пошло по пути обобщения объекта исследования: стали рассматриваться абстрактные системы, трактуемые на базе строгого формально-математического аппарата (М. Месарович, Н. П. Бусленко и др.). Это позволяло описывать и изучать функционирование отдельных весьма широких, но все-таки ограниченных классов систем (аппарат часто оказывался аналогичным тому, который применяется в кибернетике)<sup>1</sup>.

Естественно поставить вопрос, продолжают ли кибернетика и теория систем представлять собой два независимых научных направления? Ведь объектом рассмотрения того и другого направления являются «системы», и системность предмета всегда подчеркивается.

Само понятие «система» оставим для последующего рассмотрения. Здесь отметим лишь, что от системы как совокупности элементов, связанных между собой какими-либо взаимодействиями или отношениями, требуется, чтобы внутренние связи были более тесными, чем связи ее элементов с объектами, не входящими в данную совокупность. И кибернетика, и теория систем по возможности отвлекаются от субстрата рассматриваемых систем и изучают лишь наиболее общие их свойства и особенности, т. е. *структуру и функции* систем. Функционировать, т. е. изменять свое состояние и тем самым воздействовать на внешнюю и внутреннюю среду, могут только системы, изменяющиеся во времени; поэтому в обоих случаях объектом исследования являются динамические системы. Правда, в кибернетике этот факт подчеркивается, в то время как в теории систем внимание на нем специально не фиксируется. Поскольку в обоих случаях изучаются главным образом связь структуры и функций, синтез структур, обеспе-

«Исследования по общей теории систем». М., 1969; М. И. Сетров. Организация биосистем. Методологический очерк принципов организации живых систем. Л., 1971; А. Л. Тахтаджян. Тектология: история и проблемы. — «Системные исследования. 1971». Ежегодник. М., 1972.

<sup>1</sup> См. «Общая теория систем» М., 1966; У. Портер. Современные основания общей теории систем. М., 1971; Р. Калман, П. Фалб, М. Арbib. Очерки по математической теории систем. М., 1971.



чивающих необходимое функционирование (поведение), постольку в них по существу исследуются проблемы целесообразного изменения систем, т. е. проблемы управления. При этом подчеркиваемые Л. Берталанти объективные закономерности в изменении некоторых систем исследуются и в теории систем, и в кибернетике с целью отыскания способов целесообразного использования таких систем путем воздействия на них, т. е. по-прежнему в целях управления. Это также роднит кибернетику и теорию систем.

Рассмотрим некоторые отличия кибернетики от теории систем. Прежде всего отметим, что последняя, изучая, как и кибернетика, поведение и функционирование систем, не акцентирует внимание на *информационных* аспектах этих явлений. По нашему мнению, это обстоятельство является в определенной мере случайным и обусловлено особенностями исследуемых объектов. Действительно, при изучении таких систем, как наука, системы знаний и т. п., мы всегда имеем дело с информационными связями и отношениями. Поэтому информационные аспекты независимо от того, подчеркиваются они или нет, всегда являются существенными при исследовании систем такого рода.

В силу сложившихся традиций кибернетика и теория систем отличаются скорее областями выбора конкретных предметов изучения и до какой-то степени характером используемого аппарата, чем подходом к аспектам, целям и задачам исследования. Так, кибернетика в начале своего развития в качестве объектов исследования выбирала технические системы и простейшие биологические системы и пользовалась аппаратом современной математики. Теория систем, как уже отмечалось, с момента своего зарождения использует в качестве объекта исследований *биологические* системы, относящиеся к числу наиболее сложных, а также такие сложные системы (остававшиеся до последнего времени в значительной мере вне поля зрения кибернетики), как *социально-экономические*, административные, комплексы научных знаний, психологические системы и др.; лишь в последнее время в круг интересов специалистов по теории систем стали входить и сложные технические системы.

Что касается метода и языка исследований, то в теории систем наблюдается своеобразная ситуация. С одной стороны, здесь широко распространен описательный подход, общеметодологические рассуждения с акцентом на развитии и уточнении понятийного аппарата и терминологии. С дру-

гой стороны, в ней начал использоваться математический аппарат, и, поскольку последний еще плохо приспособлен к описанию объектов с большим числом переменных, трудности пытаются преодолеть исходя из общей математико-логической теории прикладных исчислений предикатов.

В итоге можно сказать, что различия между кибернетикой и теорией систем не являются столь существенными, чтобы их можно было считать развивающимися независимо друг от друга научными направлениями, с одной оговоркой: по сравнению с теорией систем для кибернетики более типичен *индуктивный путь*, а в первой преобладают *дедуктивные* (подобные рассмотрению в теории моделей математической логики) построения либо *общеметодологические рассуждения*. В этом смысле (при всей тенденции к интеграции обоих направлений) кибернетика остается неким *соединительным звеном между физикой и «системологией»*. Подход, который вырастает на почве синтеза кибернетических и «системных» идей, естественно назвать *системно-кибернетическим*.

## Глава IV

### КИБЕРНЕТИКА

### И ГУМАНИЗАЦИЯ ЗНАНИЯ:

### РОЛЬ ЛОГИЧЕСКИХ ИДЕЙ

Проблема человека все более выступает на передний план научных и технологических проблем современной цивилизации. В этом выявляется гуманистический смысл всего комплекса науки и техники, «его истинное предназначение как силы, служащей благу человека и человечества. И именно здесь мы можем найти ответ на вопрос, который все более резко встает перед нами, — вопрос об органическом соединении исследовательских и ценностных подходов, о подчинении научного познания гуманистическим идеалам»<sup>1</sup>.

Гуманизация знания (и техники) осуществляется в разных формах. Этот процесс связан с изменением содержания и структуры науки и техники, их социального характера в сторону их «очеловечения». Происходят переосмысление, изменение, зарождение новых научных понятий, методов, теорий и даже целых направлений (достаточно указать, например, на такие научные и технические направления, как инженерная психология, техническая эстетика, эргономика). Естественные и технические науки приобретают ценностную (прежде всего в гуманистическом, человеческом плане) ориентацию, усиливаются ценностные аспекты научно-технической деятельности вообще.

В современных условиях, когда с каждым днем возрастает роль «коллективизации» в науке, а отсюда и роль ученого-организатора, когда существуют грандиозные средства «массовой информации», особое значение приобретает аспект науки и техники, связанный с сохранением здоровья личности, индивидуальности человека, с продлением человеческой жизни. Отсюда неизбежно вытекает необходимость рационализации, в идеале оптимизации взаимо-

<sup>1</sup> И. Т. Фролов. Современная наука и гуманизм. — «Вопросы философии», 1973, № 3, стр. 12.

связей между человеком, наукой, техникой, обществом и биосферой во имя блага всего человечества. И здесь существенную роль может сыграть кибернетика с ее методами оптимизации больших систем<sup>1</sup>.

Существует, однако, и иной аспект, в котором можно рассматривать роль кибернетики в гуманизации (и гуманитаризации<sup>2</sup>) знания. Он связан с *общенаучными методами*, вторгающимися через кибернетику в технические и естественные науки. Многие из этих методов гораздо ближе к *проблемам человека, его психики, поведения и обучения*, чем «традиционные» приемы исследования описательного и математического естествознания. Речь здесь прежде всего должна идти о *системно-кибернетической установке*, ориентирующей ученого-гуманитария на рассмотрение изучаемых объектов как определенным образом организованных систем (иерархий систем, элементов систем и т. п.). Это особенно важно для гуманитарных наук<sup>3</sup>. Предполагая установление внутрисистемных информационных связей — связей между элементами исследуемой системы и ее подсистемами, а также между этой системой и средой, выявление принципов управления, организации и адаптации, — этот подход требует введения соответствующих количественных критериев и создает условия для логической систематизации фактического материала, выработки рациональных языков описания исследуемых объектов, т. е. для перехода к этапу математической (логико-математической) формализации.

Системно-кибернетический подход для сферы исследования «коллективов» живых организмов, наук о человеке и о социальных явлениях требует анализа изучаемых объектов как систем, имеющих определенную историю. Ведь именно прошлое системы, ее прошлый «опыт», история ее развития являются основой для оценки будущего этой

<sup>1</sup> Философско-методологические аспекты вклада кибернетики в рационализацию взаимоотношений между цивилизацией и биосферой рассматриваются в статье: А. И. Берг, Б. В. Бирюков, Е. В. Маркова. Методология сложных систем и проблемы биосферы. — «Методологические аспекты исследований биосферы».

<sup>2</sup> Гуманитаризация естественных наук — это вторжение в них идей и постановок задач гуманитарных дисциплин. Особую роль здесь играет логика, соединяющая в себе черты и гуманитарной, и естественной, и математической науки.

<sup>3</sup> Проблеме «кибернетика и гуманитарные науки» в целом (хотя, разумеется, далеко не во всех ее ответвлениях) посвящена книга: Б. В. Бирюков, Е. С. Геллер. Кибернетика в гуманитарных науках.

системы, для прогнозирования ее состояний и поведения в грядущем; при этом история системы может быть отображена в строгих, в том числе математических, терминах (например, в терминах памяти автомата).

В области научных исследований все большее значение приобретает *семиотический (логико-семиотический)* подход, позволяющий не только разрабатывать определенные языки описания изучаемых объектов (алгоритмические, информационные языки, язык математики, логики и т. п.), но и трактовать эти объекты как некоторые знаковые конструкции и системы знаковых конструкций. В конце концов развитая наука всегда приходит к необходимости использования той или иной искусственной знаковой системы. Опыт химии и физики говорит об этом со всей убедительностью. Семиотический аппарат позволяет глубже познать реальность. Такого рода исследования уже ведутся в области экономической науки<sup>1</sup>, в искусствоведческих работах<sup>2</sup> и т. д.

Системно-кибернетический и семиотический подходы и в гуманитарных науках обычно реализуются через моделирование. Факты свидетельствуют, что построение математических (логико-математических) моделей изучаемых объектов (таких их описаний, анализ которых позволяет получать знания, переносимые затем на объект исследования) все более заменяет в этих науках описательно-вкусовые рассуждения и оценки. Конечно, это не устраняет содержательной установки как исходного пункта и конечной цели применения такого рода методов. Ведь моделирование, как известно, начинают с формулировки некоторой качественной гипотезы о структуре или функциях исследуемой системы, ее элементах (подсистемах), связях между ними и т. д. Затем решаются вопросы о средствах построения модели, адекватном языке описания, о возможной математической и машинной реализации модели с помощью «точных» методов. Исследователи, занимающиеся моделированием в области психолого-поведенческих задач, например, давно заметили, что такое моделирование должно быть основано на иерархическом принципе.

<sup>1</sup> См. Ю. И. Черняк, Е. З. Майминас, В. М. Жеребин. Экономическая кибернетика. — «Кибернетику — на службу коммунизму», т. 5. М., 1967.

<sup>2</sup> См. «Точные методы в исследованиях культуры и искусства». Материалы к симпозиуму.

Метод моделирования и в гуманитарных областях знания (а может быть, прежде всего в них) неотделим от *алгоритмического подхода* (т. е. представления изучаемого явления в виде процесса, подчиняющегося строгим правилам), хотя бы уже потому, что он является предварительным условием применения машинных методов переработки информации и применяется для изучения информационных процессов в той или иной системе.

Однако суть дела не просто в проникновении в гуманитарные науки междисциплинарных методов, приобретающих статус общенаучных приемов познания. Их применение в таких науках, как психология, социальная психология, социология, экология человека, наука о языке, литературоведение и науки об искусстве, область экономического и административного управления и т. д., приводит к изменениям в содержании и структуре науки и техники; кибернетика влияет на все более последовательную гуманистическую переориентацию знания, на учет и решение прежде всего этих проблем. Именно «человечный человек», говоря словами К. Маркса, будучи субъектом и объектом познания, становится в условиях современной научно-технической революции тем «центром», вокруг которого происходят синтез, интеграция, взаимопроникновение естественных, технических, гуманитарных и общественных наук.

С чем же связана эта «гуманизирующая» роль кибернетических методов? С феноменом *управления*, который находит свое высшее выражение в *человеческой деятельности*. Современные сложные системы обычно включают человека (или коллективы людей), и последний выступает как объект и субъект управления в их диалектическом взаимодействии. Отсюда вытекает необходимость изучения и учета многообразных (биологических, психологических и социальных) межчеловеческих связей, а также взаимосвязей между человеком, системой (в которую он включен) и средой, где эта система функционирует. На этом пути и отрабатываются методы семиотизации, алгоритмизации и моделирования, обогащенные опытом отображения и учета «человеческого фактора».

История дает немало примеров, говорящих о том, что для более полного овладения природой человеку не доставало более полного овладения самим собой. Естественно поэтому, что наука второй половины XX в. начинает обнаруживать во всех своих фундаментальных проблемах человеческий аспект. Научное познание демонстрирует всевоз-

растающую «рефлексивность», т. е. наряду с обращенностью к своим традиционным объектам оно стремится как бы осмыслить закономерности познавательного процесса в каждой данной области. Вот тут-то и выступает на сцену «гуманизирующая» роль кибернетики<sup>1</sup>.

В самом деле, понимание природы творчества, повышение творческого потенциала научного познания стало ныне актуальнейшей задачей. Для ее решения нужно изучить условия «продуктивного мышления» и его психологические механизмы: постановку целей творческой личностью или коллективом, способы поддержания целенаправленной деятельности на достаточно высоком уровне, «работу» интуиции, соотношение сознательных и бессознательных, логических, алгоритмических и эвристических «составляющих» творческого процесса.

Конечно, задачи интенсификации творчества будут решаться (и в ряде аспектов уже решаются) на разных уровнях. Для нас, однако, существенно, что фундаментальную роль в этом процессе играет моделирование творческих процессов (см. гл. III четвертой части) и изучение средствами логики процессов мышления, принятия решений и интеллектуальной коммуникации.

## 1. О ПРОБЛЕМЕ ТОЧНОСТИ НАУЧНЫХ ПОНЯТИЙ

Для сколько-нибудь глубокой разработки моделей сложных систем, их структур и поведения необходим определенный набор понятий, отражающих класс описываемых явлений. Эти понятия могут быть достаточно широко употребляемыми и (отчасти благодаря этому) достаточно диффузными, расплывчатыми. Такая ситуация типична для гуманитарных областей знания. Как же быть, если стоит задача применения здесь «точных методов»?

Можно заранее ввести ограничение, запретив употребление понятий, для которых не существует математически строгого определения. Можно пойти по другому пути: установить уровень строгости, естественный для данной сферы словоупотребления.

В первом случае нужно начинать с построения математической модели явления; дать сначала точное описание

<sup>1</sup> Ср. возникающие на стыке кибернетики, логики и науки о языке мета-науки: мета-физика, мета-биология и др.

данной модели, а затем объявить «допустимым» употребление тех терминов, которые имеют ясную интерпретацию в данной модели. Это означает, что исследователь больше доверяет объясняющей силе созданной им модели, чем опыту и здравому смыслу; но тогда он теряет возможность серьезно говорить о соответствии модели и реальности.

Первый подход вполне пригоден как критерий корректности физической модели или физической теории. Он был в явном виде сформулирован Э. Махом и помог увидеть слабость таких традиционных физических представлений, как понятие одновременности событий. Но полезность принципа еще не означает его общеприменимости. Занимаясь математикой или физикой, можно отгородиться от «метафизики». Здесь уместно вспомнить, что при изучении «модели» условных рефлексов И. П. Павлов запретил своим сотрудникам использовать психологические понятия. Это было необходимо, чтобы установить пределы применимости «модели». В дальнейшем Павлов выяснил, как клиническая картина некоторых патологических процессов (описываемая в классических медицинских понятиях) интерпретируется схемой условных рефлексов. Следовательно, его интересовал вопрос, какие «сущности» отражаются этой достаточно «формальной» схемой.

Теперь о втором пути. Живые организмы функционируют не по типу универсальных вычислительных машин для решения произвольных задач. Многие задачи они решают гораздо хуже машин. Но в отличие от машин они умеют использовать присущую задачам организацию<sup>1</sup>. Поэтому при разработке моделей сложных и сверхсложных биологических и социальных явлений нельзя заранее отказаться от употребления «гибких» понятий. Если пользоваться только понятиями, для которых можно создать точную модель, то придется отказаться от таких, например, понятий, как «добро», «зло», «правосознание», «мораль», «красота», на что вряд ли можно решиться.

Невозможность ограничиться языками описания, достигающими точности современного физико-математического знания, не снимает, однако, вопроса о критериях точности и корректности описаний сложных явлений.

Во-первых, необходимо различать *точные* понятия от *диффузных, гибких* (например, «информация» и «информация

<sup>1</sup> См. И. М. Гельфанд, М. Л. Цетлин. Об управлении сложными системами. — «Успехи математических наук», 1962, № 1; Ю. А. Шрейдер. Присущ ли машинам разум? — «Вопросы философии», 1975, № 2.



в смысле Шеннона», «алгоритм» и «нормальный алгоритм»); такие ситуации, когда название понятия и его экспликат резко различны («смысл» и «интенционал» или «значение» и «экстенционал»), встречаются редко.

Во-вторых, следует иметь в виду, что, чем менее точно понятие, тем большую роль играет *семантика названия*. Новый алгебраический объект, определяемый системой аксиом, можно называть группой, моноидом, категорией, косой, клумбой, дилижансом — словом, как угодно, лишь бы это название не совпадало с ранее принятыми терминами в той же области. Для исходных математических понятий, не имеющих строгого определения, семантика названия более существенна. Названия допустимо заменять, лишь оставляя их в том же семантическом ряду (ср. «множество» — «совокупность» — «ансамбль» — «класс» — «система»). В философии или психологии семантические связи термина играют роль еще более значительную, чем, например, в математике, поскольку отсутствие точного определения или интерпретации на модели заставляют при осмысливании понятия апеллировать к языковому опыту, к *семантическим ассоциациям*. Понятие должно быть прежде всего подвергнуто проверке на *семантическую корректность*: необходимо убедиться, не употреблялось ли уже это понятие или ему родственное в сходных ситуациях в ином смысле. В крайнем случае следует оговорить ситуации, когда это понятие употребляется в иных значениях, или установить, какие контексты выделяют нужное значение термина.

В-третьих, диффузное понятие правомерно, если возможна его объективная проверка, хотя бы с помощью мысленных тестов в существенных ситуациях (принцип «локальной проверяемости понятия»). Так, например, понятие «доброта» достаточно расплывчато. Можно говорить, что человек по природе добр, и это довольно неопределенно. Но говорить, что данный *конкретный* человек добр, можно только в случае если мы оценим его поступки в ситуациях, когда от его поведения зависит другой человек. Такая оценка порой сложна, но возможна. Слово «прогрессивный» в применении к тем или иным конкретным явлениям используется корректно, когда мы можем убедиться в том, что эти явления действительно идут на пользу людям, на жизнь которых они существенно влияют.

Принцип «локальной проверяемости» для данного понятия нарушается, если может быть обнаружена или придумана

мана хотя бы одна существенная ситуация, где данное понятие непроверяемо или семантически противоречиво. Наоборот, убедиться в его выполнении полностью невозможно, поскольку для этого следовало бы перебрать все мыслимые существенные ситуации. Языковой опыт, отображающий некоторую исторически проверенную систему мышления, может дать определенную, но не абсолютную уверенность в корректности употребляемого понятия, если оно достаточно опирается на семантические связи языка, отражающие некоторые знания о мире, на понятийную сферу языка. Особенно трудно обстоит дело при переносе новых понятий из чужого языка с иной системой семантических связей<sup>1</sup>.

Желание уйти от «универсальных» и «размытых» понятий к точным понятиям, формулируемым в рамках ограниченной модели, естественно. Если говорить о биологической и социальной сферах, то окажется, что, с одной стороны, оно связано с потребностью иметь надежный и ясный критерий, который мог бы дать уверенность в правоте тех или иных человеческих действий, с другой стороны, как это ни странно, оно может иметь источником неверие в способность познавать не только поверхностную, «формальную» сторону явлений, но и их сущность.

## 2. ЛОГИЧЕСКАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ И «ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР»

Возникает вопрос, возможно ли создание теорий, позволяющих с формально-логической точки зрения подойти к проблеме диффузных, расплывчатых понятий. Последние сдвиги в области логики, в которых весьма четко проявляется идущая от кибернетики тенденция к гуманизации (и гуманитаризации) знания, свидетельствуют в пользу положительного ответа. Конечно, логика не в состоянии отменить сам факт ограниченности любой формальной модели. Но она может несколько прояснить явление «неточности», не отделимое от человеческого мышления.

Необходимым условием применения кибернетических идей, методов и аппарата в гуманитарных науках является,

<sup>1</sup> Здесь, по-видимому, происходит реальное столкновение с явлениями локальной непереводимости понятий. При переводе надо либо позаботиться о переносе всей сферы понятий, либо дать развернутый комментарий к переводимому понятию.

как известно, осуществление *логической* формализации систем понятий и суждений в соответствующих областях. Именно через *логическую, логико-математическую* формализацию проходит одна из важнейших линий воздействия кибернетики на гуманитарные науки.

Но происходит и обратный в определенном смысле процесс. Под влиянием задач осуществления логической формализации в гуманитарных дисциплинах начинает *меняться сам облик логики*. На логику — это тысячелетнее прибежище «точности», «строгости» — начинает воздействовать тот «нестрогий» стиль мышления в гуманитарных науках, который подчас вызывает столько нареканий и упреков со стороны представителей точных наук.

Современная формальная логика есть логика объемно-фиксированных понятий; в теории алгоритмов этому соответствует понятие об алгоритме как об однозначно понимаемом предписании, некоторым жестким образом детерминирующем поведение. Нетрудно понять, что это не всегда созвучно задачам использования логической формализации и алгоритмических описаний в науках о человеке — о его мышлении, психике, поведении.

В содержательном нематематическом мышлении, которыми «оперирует» гуманитарий, преобладают термины и высказывания с многозначной и гибкой «шкалой правдоподобия», вопросы и предписания, неполно определяющие поведение. Тем не менее эта размытость границ понятий не парализует логику мышления, в общем и целом вполне справляющуюся со сложной проблемой достижения истины. Можно ли это объяснить на привычном для логики пути, можно ли формализовать «неточность мышления»?

Определенные аспекты этой стороны мышления математика формализовала в рамках теории вероятностей, особенно в ее логической интерпретации, являющейся одной из наиболее старых интерпретаций. Другой подход развивался со стороны логической формализации (начиная с многозначных логик — 20-е годы). Однако лишь благодаря кибернетике была четко осознана связь этих направлений с задачей «формализации неточности мышления» в нематематических (нематематизированных) науках.

Связанный с этим процессом огромный комплекс проблем не может здесь быть освещен. Но определенное представление о нем дать можно и нужно. Одним из примеров

является теория расплывчатых множеств, развиваемая с 60-х годов Л. Заде и его учениками.

Постановка общей задачи Заде родственна той, из которой исходили до него Дж. фон Нейман, М. Л. Цетлин и другие математики, работавшие в теоретической кибернетике (вернее, создававшие ее). Это задача о том, как точно ввести в науку (метанауку) неточность, гибкость, диффузность. Вот ее формулировка, принадлежащая Л. Заде: «В теории информации, как и во многих других областях науки, неточность и неопределенность обычно вводятся с помощью понятий и методов теории вероятностей. Подчеркивание роли теории вероятностей при изучении этих вопросов затмевает то, что во многих ситуациях источником неточности является вовсе не наличие каких-то случайных величин, а появление в рассматриваемой задаче какого-то класса или классов, не имеющих строго определенных границ. В качестве примера класса такого рода можно привести «класс» всех действительных чисел, намного превосходящих число 10, который, очевидно, не является точно заданным множеством. То же самое можно сказать о «классе» рукописных изображений буквы А, «классе» умных людей, «классе» систем, приблизительно эквивалентных некоторой заданной системе, и т. д. На самом деле тщательный анализ показывает, что большинство классов объектов, с которыми приходится сталкиваться в реальном мире, являются классами именно такого нечеткого типа, т. е. классами, которые определены неточно. В этих случаях элемент может принадлежать или не принадлежать к классу, но, кроме того, возможны и промежуточные градации принадлежности; поэтому для описания степени принадлежности элемента к классу здесь необходимо использовать многозначную логику — возможно даже с континуальным множеством значений истинности»<sup>1</sup>.

Таким образом, цель состоит в том, чтобы внести в современную логику (и в теории множеств и алгоритмов) такие изменения, которые позволяют в достаточно строгих терминах трактовать объемно нечеткие (нестрогие) понятия; теория предполагает, что имеется непрерывный спектр градаций принадлежности элемента данному множеству (объему некоторого понятия): от полной непринадлежности через разную степень «частичную» принадлежность до пол-

<sup>1</sup> Л. А. Заде. Тени нечетких множеств. — «Проблемы передачи информации», 1966, т. 2, вып. 1, стр. 37.

ной принадлежности. Соответствующее отношение принадлежности формализуется некоторой «функцией членства» — своего рода мерой «добротности», надежности принадлежности элемента к множеству. В отличие от «обычной» теории множеств (и логики), где принадлежность данного элемента некоторому множеству (классу) оценивается по схеме «либо истинно, либо ложно», в теории Л. Заде речь идет о *степенях принадлежности* элемента классу<sup>1</sup>. Это фактически означает принятие некоторого варианта многозначной (в общем случае бесконечнозначной, даже континуальной) логики, причем в ней присутствуют правила обычной двузначной логики. Здесь Заде, по-видимому, использует то наблюдение, что человеческое мышление при оперировании расплывчатыми понятиями обычно не пользуется какими-то особыми правилами.

Более точно, смысл развитого Заде теоретического аппарата состоит в следующем. Вводится представление о функциях членства в множествах. Каждая функция членства определена на элементах некоторой совокупности (предметной области) и выделяет в ней какой-то нечеткий класс (множество); выделение осуществляется путем отнесения элементам предметной области чисел из интервала  $[0, 1]$ . Если  $x$  — произвольный элемент данной предметной области  $\Pi$ , и мы хотим выделить в  $\Pi$  некоторый расплывчатый класс  $X$ , то для любого  $x$  следует оценить его принадлежность классу  $X$ , т. е. того, что  $x \in X$ . Эта оценка производится заданием «функции членства в классе  $X$ »:  $\mu(x \in X)$ . Запись  $\mu(x \in X)$  означает, что упомянутая оценка в общем случае не исчерпывается «единицей» (полная принадлежность элемента  $x$  классу  $X$ ) и «нулем» (полная непринадлежность). Чем ближе значение выражения  $\mu(x \in X)$ , аргумент которого  $x$  пробегает по предметам предметной области, к 1, тем «сильнее» данный  $x$  принадлежит  $X$ ; по мере приближения значения  $\mu(x \in X)$  к 0 возрастает мера непринадлежности данного  $x$  классу  $X$ ;  $\mu(x \in X)$ , принимающее, в общем случае, какие-то (не обязательно все) значения из интервала рациональных (или действительных) чисел от 0 до 1, принадлежит, таким образом, многозначной или бесконечнозначной логике. (В частном случае, когда этими значениями оказываются только числа 0 и 1, мы возвращаемся к обычной двузначной логике — логике

<sup>1</sup> L. A. Zadeh. Fuzzy Sets. — «Information and Control», 1965, v. 8, p. 338—352; *его же*. Fuzzy Algorithms. — «Information and Control», 1968, v. 12, N 2.

лжи и истины и соответственно к обычному взгляду на множества как на некие «жесткие» образования.)

Теоретико-множественной трактовке «расплывчатости» соответствует аналогичная логическая трактовка: вместо *расплывчатого множества* можно говорить о *расплывчатом (нечетком) свойстве* (и вместо  $\mu(x \in X)$  писать  $\mu X(x)$ , где  $X(x)$  — расплывчатый одноместный предикат) или о понятии расплывчатого свойства<sup>1</sup>. Сам Заде начал анализ с построения теории нечетких множеств. Он сформулировал основные понятия вполне строгой теории такого рода, определив, в частности, отношения равенства и включения двух расплывчатых множеств, а также операции дополнения расплывчатого множества до совокупности  $\Pi$  и объединения и пересечения двух расплывчатых множеств. Так, операция объединения расплывчатых множеств  $X_1$  и  $X_2$  определяется как порождение расплывчатого множества  $(X_1 \cup X_2)$ , являющегося в определенном смысле минимальным среди всех расплывчатых множеств, содержащих в себе как  $X_1$ , так и  $X_2$ . Это определение — обобщение обычного определения операции объединения «жестких» классов как взятия их точной верхней грани<sup>2</sup>: функция членства множества  $(X_1 \cup X_2)$  имеет вид:

$$\mu(x \in (X_1 \cup X_2)) = \max(\mu(x \in X_1), \mu(x \in X_2)).$$

Например, если  $\mu(x \in X_1)$  и  $\mu(x \in X_2)$  принимают для некоторого  $x$  значения соответственно 0,3 и 0,8, то  $\mu(x \in (X_1 \cup X_2)) = 0,8$ . Аналогично операция пересечения двух расплывчатых множеств определяется как взятие их точной нижней грани. Дополнение  $X'$  к некоторому расплывчатому множеству  $X$  определяется как такое расплывчатое множество, что  $\mu(x \in X') = 1 - \mu(x \in X)$ .

При установлении характера логики, соответствующей данным определениям, возникает вопрос о выделенных значениях рассматриваемых в ней высказываний («выделенные значения» многозначной логики играют роль значения «истина» в логике двузначной). В качестве такой логики можно, например, избрать логику (для простоты будем иметь в виду уровень логики высказываний), в которой пропозициональные переменные принимают значения  $0 \leq \alpha \leq 1$ , кроме

<sup>1</sup> Более обще можно говорить о расплывчатых отношениях (многоместных предикатах).

<sup>2</sup> Ср. Г. Биркгоф. Теория структур. М., 1952.

$\alpha = 1/2$ , а основные операции — конъюнкция, дизъюнкция и отрицание (импликацию можно обычным образом определить через эти операции) — получают соответственно определения  $\min(\alpha, \beta)$ ,  $\max(\alpha, \beta)$ ,  $(1 - \alpha)$ .

Естественное соображение, что в «расплывчатой» логике должны действовать правила обычной классической двузначной логики (так как повседневный опыт убеждает нас в том, что наше мышление не пользуется особыми правилами для оперирования с расплывчатыми понятиями), приводит к заключению, что в очерчиваемой бесконечнозначной логике в качестве выделенных следует принять все значения, большие  $1/2$ . И действительно, нетрудно убедиться, что в такой логике все аксиомы (схемы аксиом) классической логики принимают только выделенные значения, а правила вывода сохраняют это свойство при любом построении последней. Приняв очерченную бесконечнозначную логику в качестве пропозициональной базы логики расплывчатых понятий, мы естественно приходим к пониманию выделенных значений как степеней правдоподобия (начинающихся с 1 и неограниченно приближающихся к  $1/2$ ) высказываний о принадлежности элементов (пар, троек и т. д. элементов) объемам расплывчатых предикатов. В этой логике «законы логики» (закон тождества, исключенного третьего и т. д.) являются тождественно-правдоподобными (но не тождественно-истинными!) формулами.

В учебном пособии П. С. Новикова<sup>1</sup> мы находим интерпретацию булевой алгебры операциями, определяемыми аналогично определениям Заде. С разных сторон разрабатываются также подходы к формализации языков теорий с «неточными» понятиями<sup>2</sup>. Существует развитая теория многозначных логик с интерпретациями на топологических пространствах<sup>3</sup>. Однако работы Л. Заде примечательны не математико-логической стороной, а своими установками и теми приложениями, которые с ними могут быть связаны. Это — проблемы теории абстракции и опознавания образов, «продление» концепции расплывчатых множеств на теорию алгоритмов и, наконец, естественность точной трак-

<sup>1</sup> См. П. С. Новиков. Элементы математической логики. М., 1959, стр. 47.

<sup>2</sup> Например, разработано исчисление, формализующее язык эмпирических наук с неточными предикатами (И. Н. Бродский).

<sup>3</sup> См. Г. Дж. Кейслер, Чэн Чень-чунь. Теория непрерывных моделей. М., 1971.

товки в ее терминах таких аспектов человеческого мышления и поведения, для которых до последнего времени не использовалась какая-либо логическая теория. Главные трудности здесь заключаются в «природе» функции (функций)  $\mu$ : каждая функция  $\mu$ , предназначенная для формирования некоторого расплывчатого класса, должна быть задана вне самой теории.

Концепция нечетких понятий (и множеств) является, по-видимому, плодотворной базой для логического моделирования широкого круга явлений «полиморфизма» (много-семантической) как естественных языков человеческого общения, так и языков нематематических наук. Во всяком случае такого рода концепции допускают различные обобщения, например введение «функций членства» (и, соответственно, расплывчатых предикатов) второго ранга, которые отображают феномен использования в мышлении и языке «одинаковых» выражений, принадлежащих к различным семантическим полям. Конечно, явления «расплывчатости» мышления и «диффузности» языка (типично человеческие феномены, без формализации которых нет надежды существенно продвинуться вперед в моделировании интеллектуальных процессов) можно «осваивать» и в вероятностных терминах. Интересная концепция такого рода недавно развита В. В. Налимовым, предложившим «бейесовскую модель языка»<sup>1</sup>.

В построениях, подобных теории Заде или модели Налимова, подчеркнуто выражен человеческий аспект. Заде, например, прямо указывает на то, что его теория возникает как ответ на задачу математизации «гуманистических» систем (систем, включающих человека), для решения которой нужны методы, где «точность, строгость и математический формализм не являются чем-то абсолютно необходимым и в которых используется методологическая схема, допускающая нечеткие и частичные истины»<sup>2</sup>.

Нечеткие понятия (расплывчатые предикаты) весьма распространены, типичны для гуманитарной сферы. Вообще большинство понятий не только в повседневном мышлении, но и в науке (вне математики во всяком случае) нечетки. Аппарат теории нечетких множеств (соответственно расплывчатых предикатов — свойств и отношений) открывает

<sup>1</sup> См. В. В. Налимов. Вероятностная модель языка. М., 1974.

<sup>2</sup> Л. А. Заде. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов. — «Математика сегодня». М., 1974, стр. 8.



путь формализации «феномена нечеткости» этих множеств и предикатов (понятий): дело в том, чтобы как-то задать функции членства, соответствующие данным расплывчатым понятиям. Если в этом плане говорить о гуманитарных науках, т. е. о языках этих наук, то одним из путей здесь является применение метода экспертных оценок, математическая теория которых в определенной мере «кибернетическая», так как включает в себя задачу оптимизации. И здесь вопросы логики оказываются тесно «состыкованными» уже с социально-психологическими аспектами гуманитарного (и иного «нематематизированного») знания.

Формализация феномена «расплывания» понятий — только одно из проявлений «поворота» логики в сторону человека, который она претерпевает под влиянием кибернетики. Можно указать и на другие проявления. Как ни парадоксально, логика, прежде всего формальная логика, претендуя на анализ «нормативной» стороны человеческого мышления, в своем современном развитии, в то же время полностью игнорировала один из моментов человеческого мышления — его свойство *ошибаться*. Сама концепция логики заведомо предполагает различение мышления правильного и неправильного, и соответственно этому «доматематическая» формальная логика рассматривала познавательные, логические ошибки; современная же формальная (математическая) логика опирается на «абстракцию безошибочности», имея дело только с *правильными* формами рассуждений, позволяющими из истинных (обоснованных, доказанных, вероятных и т. п.) посылок делать истинные (в том же смысле, что и посылки) заключения.

Кибернетика, однако, начинает менять картину. Осуществляя свой модельный подход к исследованию интеллектуальных процессов, а также разрабатывая основы построения опознающих и обучаемых систем, она потребовала от логики как бы «вернуться назад». Суть дела в том, что логика позволяет формализовать и моделировать лишь механизмы в основном дедуктивного (формально-логического) мышления; не говоря уже о том, что эти механизмы далеко не исчерпывают психической деятельности человека, в их функционировании возможны нарушения и «сбои». Моделирование мышления неизбежно должно учитывать этот элемент «ненадежности». Кроме того, есть такие явления психики, как интуиция, эмоции и другие, которые имеют мало общего с рассуждением, выводом, доказательством. Их роль в познании огромна. Но даже если взять только «логиче-

ское» мышление, то мы увидим, что в нем не так уж строго соблюдаются принципы дискретности (записи информации), детерминированности (предписаний), однозначности (результатов логических операций), лежащие в основе исчислений математической логики. Еще очень много неясного в механизмах творческого мышления — механизмах, связанных со способностью строить широкие аналогии и гипотезы, оперировать нежесткими и вместе с тем содержательно емкими идеями и т. д. К тому же людям, по-видимому, присущи несопадающие, различные, зачастую «неповторимые» мыслительные «тактики» и «стратегии».

Это заставило исследователей уже с первых шагов кибернетики искать пути внесения в логику нового, «человеческого» момента. Известны, например, идеи Дж. фон Неймана<sup>1</sup> о введении в логику *временного фактора* и о разработке своего рода «непрерывной» логики, идеи И. М. Гельфанда и М. Л. Цетлина<sup>2</sup> о континуальных моделях управляющих систем. Все больший размах приобретают разработки в области вопросно-ответных процедур, логического моделирования интеллектуальной коммуникации. Не случаен, видимо, и размах работ в области интуиционистских логики и теории математического доказательства, так как интуиционистские постулаты (в рациональном смысле логико-математической теории, полноправно вводящей в качестве первоосновы логики и математики *процессы* не только «конструктивного», но и «физического» характера, и в понятии «доказанного утверждения», явно принимающей во внимание факт *развития знания*), несомненно, являются отражением человеческого фактора в логической (и логико-математической) формализации.

### 3. ОТ ЛОГИКИ К ЛОГИКО-ТЕЗАУРУСНОЙ КОНЦЕПЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ КОММУНИКАЦИИ

Естественной сферой кибернетических исследований является изучение разнообразных систем *коммуникации*, включающих как естественные языки и речевую коммуникацию,

<sup>1</sup> См. Дж. Нейман. Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент. — «Автоматы». М., 1956.

<sup>2</sup> См. И. М. Гельфанд, М. Л. Цетлин. О континуальных моделях управляющих систем. — «Доклады АН СССР», 1960, т. 131, № 6.

так и различные искусственные знаковые системы, в том числе системы машинного перевода, системы научной информации, языки общения человека и ЭВМ, языки научного общения и др.

При всем разнообразии знаковых систем их построение, изучение и использование происходят в конечном счете на базе естественных языков, отличающихся существенной неустойчивостью своего синтаксиса, и особенно семантики, и очень богатой прагматикой. Именно в прагматике и заключается главный источник их чрезвычайной сложности: ведь смысл знака меняется вместе с изменением практики его употребления, а известно, насколько «неинвариантно» применение словесных знаков в естественных языках.

Ясно поэтому, что именно семантический и особенно прагматический аспекты знаковых систем в их реальном «функционировании» привели к необходимости обратиться к исследованию человеческого общения, человеческой коммуникации. И хотя результаты предпринятых в этом направлении попыток еще очень далеки, например, от уровня развития восходящей к Шеннону теории информации, они все-таки позволяют по-новому взглянуть на процессы коммуникации и связанные с ними процессы обучения. Здесь, например, можно назвать работы Д. Харра<sup>1</sup>, создавшего логико-прагматическую модель коммуникации, и работы Ю. А. Шрейдера<sup>2</sup>, который предложил подход к измерению ценности информации через ее семантические свойства.

Кратко остановимся на исходных пунктах и основных понятиях, которыми мы будем пользоваться в дальнейшем изложении.

*Интеллектуальная коммуникация* — это та «составляющая» обмена сообщениями между людьми, которая подчинена «рациональным основаниям», т. е. логике. Коммуникацию можно рассматривать как *обучение* (и наоборот) в том смысле, что в ее ходе изменяются «знания» (в самом широком смысле) коммуникантов. При этом предполагается, что, поскольку речь идет о «рациональном», логическом уровне

<sup>1</sup> D. Harrah. *Communication: A Logical Model*, Pr. 2. Cambridge (Mass.), 1967.

<sup>2</sup> См. Ю. А. Шрейдер. Об одной модели семантической теории информации. — «Проблемы кибернетики», 1965, вып. 13; *его же*. О семантических аспектах теории информации. — «Информация и кибернетика». М., 1967; *его же*. Тезаурусы в информатике и теоретической семантике. — «Научно-техническая информация», 1971, сер. 2, № 3.

восприятия и переработки информации, человек в определенной мере понимает, осознает ее смысл.

Мы будем говорить о трех уровнях обучения, согласно Г. Бейтсону<sup>1</sup>. Первый уровень — просто получение информации приемником, владеющим алфавитом соответствующих знаков («проблем»); психологи этот процесс редко называют обучением. Второй уровень есть усвоение информации, *меняющей* ответ субъекта на сообщения некоторого вида. Третий уровень — формирование установки (субъект, например, обучается следить за некоторой последовательностью сигналов; термин «установка» можно понимать в смысле Д. Узнадзе). Естественно считать, что трем уровням *обучения* соответствуют три уровня *понимания*: понимание того, что индивиду уже известно; того, что требует формирования или усвоения новых понятий (или проблем); и понимание, предполагающее формирование или усвоение новых умственных «стратегий». Таковы психологические предпосылки, опираясь на которые можно наметить путь экспликации феноменов понимания и обучения в логико-семантических терминах.

Обучение первого уровня непосредственно можно интерпретировать «по Шеннону»<sup>2</sup>: алфавит знаков (образов, форм) приемника фиксирован; «формы» — «элементарные уровни понимания»; более понятен образ, который чаще всего встречается в опыте; понятность обратна «оригинальности», или «количеству информации»: понятное банально<sup>3</sup>. Фиксированность «рабочего алфавита» приемника при обучении первого уровня означает, что человек в этом случае ведет себя подобно приемнику в технических каналах связи. Иной характер носит обучение второго уровня. Оно состоит в *изменении* набора структурных элементов, в терминах которых понимается сообщение («форм»). Эта перестройка «рабочего алфавита» обучаемого невыразима в классической (шенноновской) теории информации. Для такого выражения можно применить *«тезаурусный» подход к семантической информации*<sup>4</sup>. В литературе ныне активно пред-

<sup>1</sup> См. Г. Бейтсон. Некоторые особенности обмена информацией между людьми. — «Концепция информации и биологические системы». М., 1966.

<sup>2</sup> О шенноновской теории информации см. гл. I третьей части книги.

<sup>3</sup> Ср. А. Моль. Теория информации и эстетическое восприятие. М., 1966; *его же*. Социодинамика культуры. М., 1973.

<sup>4</sup> См. Ю. А. Шрейдер. К определению семантической информации. — «Научно-техническая информация», 1963, № 10; *его же*. Об одной модели семантической теории информации. — «Проблемы кибернетики», 1965,

принимаются усилия по его приложению в ряде областей гуманитарного знания. В одной из работ<sup>1</sup> была сделана попытка придать тезаурусной концепции несколько более широкий смысл. Здесь мы продолжим представленное там распространение упомянутой концепции информации на интеллектуальную коммуникацию и обучение, обращая особое внимание на направления ее обогащения, приближающие ее к реальным ситуациям человеческого общения и поведения.

Будем считать, что тезаурус  $\Theta$  есть совокупность элементов языка, для которых заданы все связи между ними; тезаурус воплощает знания приемника (адресата) о «внешнем мире» и способность носителя тезауруса воспринимать сообщения (тексты)  $T$ ; со всяким тезаурусом  $\Theta$  связан некий регулярный метод — алгоритм  $\mathfrak{A}$  анализа сообщений. Восприятие информации состоит в *изменении тезауруса*; можно ставить вопрос об измерении воспринятой (понятой) информации некоторой мерой  $I(\Theta, T, \mathfrak{A})$ , зависящей от тезауруса, полученного текста и используемого алгоритма анализа сообщения (семантическая информация). Коротко говоря, количество семантической информации в сообщении, по Ю. А. Шрейдеру, — это характеристика изменений тезауруса, происшедших в нем после приема сообщения.

Все это естественно связывается с интеллектуальной коммуникацией и обучением. Изменение тезауруса  $\Theta$  под действием некоторого текста  $T$  — это модель обучения второго уровня: поступление  $I(\Theta, T, \mathfrak{A})$  обогащает тезаурус  $\Theta$ , а чем больше в нем становится связей и элементов, выражающих смысл, тем больше возможностей изменения тезауруса, тем больше  $\Theta$  может *понять* в сообщении  $T$ . «Бедный» тезаурус может почти ничего не извлечь из данного текста  $T$ , «достаточно богатый» — извлечь очень много; «насыщенный» — все понять, но нового из текста ничего не получить. По сути дела подобное изменение тезауруса есть своего рода тезаурусный образ обучения второго уровня, ибо сообщение в общем случае обогащает тезаурус, и он становится способным лучше понимать<sup>2</sup>.

Тезаурус можно истолковать в логических терминах — это *прикладное исчисление предикатов*, «надстроенное» над

вып. 13; его же. О семантических аспектах теории информации. — «Информация и кибернетика».

<sup>1</sup> См. Б. В. Бирюков. Кибернетика и методология науки.

<sup>2</sup> См. Ю. А. Шрейдер. О семантических аспектах теории информации. — «Информация и кибернетика».

некоторой порождающей грамматикой (к которой это исчисление приближено); в исчислении имеется конечное, но меняющееся число постоянных предикатов (и функций), и с ним связана меняющаяся по составу предметов бесконечная или конечная предметная область (области). Отношения между предикатами могут быть различными: «чисто» логическими, «эмпирико(фактически)»-логическими, следующими из определений; конечно, исчисление должно быть непротиворечиво.

Интеллектуальная коммуникация трактуется как взаимодействие (в простейшем случае двух) тезаурусов  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$ , которые в ходе коммуникации изменяются. Их изменение выражается с помощью следующих средств, предложенных Ю. А. Шрейдером. В тезаурус  $\Theta$  вводится оператор  $\mathcal{A}$ , с помощью которого при поступлении соответствующего текста  $T$  тезаурус  $\Theta$  под действием алгоритма анализа  $\mathcal{A}$  делает заключение: «Возник новый предмет  $a$ », и предметная область исчисления (тезауруса) пополняется новым предметом. Изменение же предметной области требует переопределения предикатов в тезаурусе. Пусть, например,  $T$  есть фраза «Построен дом». Тогда  $\mathcal{A}$  породит в  $\Theta$ : 1) «Возник новый предмет» (используется  $\mathcal{A}$ ) и 2) «Тот предмет, который возник, является домом», а также выдаст «ситуацию»: «Тот предмет, который возник и который является домом, подпадает под предикат «быть построенным»». Из примера видно, что помимо оператора  $\mathcal{A}$  в прикладное исчисление предикатов (тезаурус) приходится вводить специфический оператор дескрипции («тот, который»), применимый не только к уже имеющимся, но и к вновь возникшим предметам. С необходимостью переопределения предикатов также связано введение в исчисление наряду с отношением логического следования, отношения «осмысления одного предиката другим».

К этой схеме естественно добавить оператор  $\mathcal{C}$  построения новых предикатов (при анализе текста «В космос запущена станция-обсерватория» приходится вводить не только новый предмет, но и новый предикат «быть космической обсерваторией»).

Трактовка интеллектуальной коммуникации как взаимодействия (двух) тезаурусов требует также дополнения данной схемы следующим. С  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  должны быть связаны соответствующие механизмы порождения текстов, посылаемых партнеру. Механизм этого рода, с одной стороны, заключен в самом  $\Theta$ : в системе порождающих правил тезауруса  $\Theta$

предполагается часть, соответствующая «правилам образования» обычного исчисления предикатов; это порождающая грамматика, определяющая, что есть «грамматически правильно построенное предложение». Однако, кроме того, требуется некоторый механизм *М* принятия решения о том, какой текст *T* должен быть порожден.

В чем состоит перестройка  $\Theta$  под действием *T*? В тезаурусе  $\Theta$  должны быть логическая и внелогическая части. В соответствии с обычной практикой коммуникации естественно допустить, что коммуниканты пользуются одинаковой логикой. *Перестраиваются лишь внелогические части.* При этом условием интеллектуальной коммуникации является то, что  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  должны иметь «одинаковый порядок сложности»<sup>1</sup>, или же, говоря иначе, в их памяти должна быть общая часть<sup>2</sup>. Перестройка  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  касается изменения предметных областей, состава постоянных предикатов (и термов, и функций) и смысловых связей (включая определения и «осмысление одного предиката другим»). Конкретная картина перестройки зависит от характера алгоритма  $\mathcal{A}$ : этот алгоритм анализа должен быть одновременно алгоритмом перестройки внелогической части тезауруса  $\Theta$ . «Понимание» текста *T* при обучении второго уровня можно описать как некоторую функцию от тех изменений в  $\Theta$  (характер их описан выше), которые алгоритм  $\mathcal{A}$  производит, чтобы тезаурус  $\Theta$  «ассимилировал» *T*: одни части текста *T* определил, а другие логически дедуцировал из внелогических предложений, хранящихся в тезаурусе. Построение этих определений и выводов и будет «актом понимания» данного текста.

До сих пор предполагалось, что в тезаурусе имеются только объемно-определенные понятия (предикаты, классы). Иначе говоря, предполагалась обычная двузначная логика. Это соответствует коммуникации в «точных» науках и их обучению. Для «неточных» наук, в частности наук гуманитарных, повседневного мышления и естественного языка в  $\Theta$  надо допустить расплывчатые понятия. Источником этого может служить, например, теория Л. Заде. Тогда для «понимания» сообщений в тезаурусе должны быть

<sup>1</sup> См. Ю. А. Шрейдер. О семантических аспектах теории информации. — «Информация и кибернетика».

<sup>2</sup> См. О. Г. Ревзина, И. И. Ревзин. Семиотический эксперимент на сцене (Нарушение постулата нормального общения как драматургический прием). — «Ученые записки Тартуского университета», 1971, вып. 284. «Труды по знаковым системам», т. V.

предусмотрены процедуры *дедукции и определения в терминах нечетких предикатов*. В модель надо ввести и *экспериментальную часть*, состоящую в восстановлении вида «функции членства» (в объеме соответствующего нечеткого предиката) по характеристикам сообщений. Это означает, что каждый из коммуникантов, получая тексты своего партнера, должен будет решать задачу, так сказать, *коммуникационной абстракции* — построения понятия, приближенного к тому, которым пользовался партнер.

В случае обучения второго уровня можно говорить о *трех уровнях понимания*<sup>1</sup>. Первый уровень — наиболее точный: понимание определяется соотношением  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$ , воплощающих логику объемно-определенных понятий. Второй уровень имеет место в случае, когда в  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  допускаются нечеткие предикаты. Понимание здесь зависит от степени близости «функций членства» соответствующих нечетких предикатов. Но можно говорить и о понимании на третьем уровне — когда коммуникантам приходится «преодолевать» многосмысленность (употребление в различном смысле) и «диффузность» («дрейф» не только значений, но и областей определения «функций членства») понятий партнера.

Как осуществить логико-тезаурусный подход в этом последнем случае? Это можно сделать путем введения «расплывчатого предиката второго ранга» через «функцию членства второго ранга». Например, предикат «быть круглым столом» есть расплывчатый предикат второго ранга, так как понятие «круглый стол» принадлежит различным семантическим полям (имеет разные области определения). Тогда мы можем ввести функцию принадлежности понятия смысловому полю как «функцию членства второго ранга» (определяемую аналогично функциям  $\mu$  Л. Заде).

Если перейти на третий уровень *обучения*, то очевидно, что здесь под действием поступающих сообщений изменяется алгоритм анализа текстов, связанный с тезаурусом «приемника», меняется способ «чтения», осмысливания этих сообщений, т. е. меняется сложившаяся «установка». Подойти к формализации такого рода обучения с тезаурусных позиций, по-видимому, сложно. Может быть, здесь нужен иной подход.

Обобщение логико-тезаурусной модели интеллектуальной коммуникации и обучения может идти в различных

<sup>1</sup> См. Б. В. Бирюков. Кибернетика и методология науки, стр. 362—363.



направлениях. Одним из самых простых является, например, включение в тезаурус, понимаемый как прикладное исчисление предикатов, не только истинностной, но и ложностной семантики<sup>1</sup>. Более существенно введение в  $\Theta$  аппарата проверки сообщений на истинность и ложность (и противоречивость). Ведь известно, что в процессе коммуникации так или иначе происходит проверка полученных сообщений на истинность или ложность. Как отмечает Д. Харра, коммуникант осуществляет интерпретацию и оценку сообщений в свете своих знаний, опыта и интересов, ибо ему может быть не известно, является ли сообщение истинным, правдив или лжив партнер.

Чтобы отразить этот процесс в тезаурусной модели коммуникации, следует, по-видимому, стремиться ввести в тезаурус механизмы индуктивной логики и правдоподобных рассуждений, классификации и установления отношения сходства<sup>2</sup>, однако при этом возникнут сложные проблемы оценки правдоподобия. Естественно поэтому обратиться к некоторой вопросно-ответной процедуре, в применении к которой имеются формальные модели коммуникации. В частности, Д. Харра трактует коммуникацию как своеобразную «информационную игру между двумя партнерами», когда один из них — получатель — формулирует множество вопросов на интересующую его тему и обращается с ним к другому — отправителю<sup>3</sup>. При этом вопросы могут быть различные: информационно-поисковые, тестовые (контрольные), риторические, «ценностные» (оценка качества отправителя) и др. Здесь уже возникает необходимость уточнения понятий *вопроса* и *ответа*, необходимость логической формализации *вопросно-ответной процедуры*. Как известно, это направление в настоящее время активно разрабатывается. Здесь нередко четкое ограничение задачи. Например, изучается свойство вопросов не любой «природы», а определенного прагматического характера, например таких, которые ставятся перед обучаемым при программном обучении.

С задачей развития логики вопросно-ответной процедуры связана задача формализации механизма *принятия решения*

<sup>1</sup> Ср. Б. В. Бирюков. О логическом моделировании ложностных структур мышления. Симметрия истинностных и ложностных исчислений в классической логике высказываний. — «Философские науки», 1972, № 4.

<sup>2</sup> Ср. Ю. А. Шрейдер. Равенство, сходство, порядок. М., 1971.

<sup>3</sup> D. Harrah. Communication: A Logical Model, Pt. 2.

о выдаче сообщений коммуниканту (выдача ответа на полученный тезаурусом вопрос; выдача сообщения под влиянием «установки»; генерирование сообщения на основе ассоциации; при этом неизбежно привлечение «генератора случая»). Наконец, если мы хотим провести дальнейшее приближение тезаурусной модели к реальным процессам человеческой коммуникации, мы должны ввести в тезаурус явление, так сказать, *мозаичности*<sup>1</sup> (это можно еще назвать «локальной логической организацией»)<sup>2</sup>. Мы имеем в виду то, что внелогическая часть исчисления может состоять из несвязанных (или очень слабо связанных) фрагментов. И конечно, надо предусмотреть возможность формулирования в нем метапредложений, т. е. ввести в  $\Theta$  иерархию языков. Тезаурусную модель можно, по-видимому, развивать и в «нелогическом» направлении — вводя в нее, скажем, эмоциональные оценки (что-то вроде «семантического дифференциала»)<sup>3</sup>.

Осуществление этих разработок принадлежит в значительной мере будущему. В настоящее время с разных сторон осуществляются подходы к комплексной проблеме формализованного описания коммуникации.

<sup>1</sup> Ср. А. Моль. Социодинамика культуры.

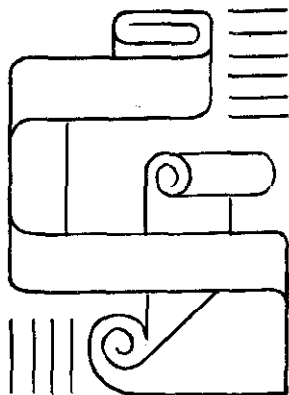
<sup>2</sup> См. А. А. Столяр. Педагогика математики. Минск, 1974.

<sup>3</sup> С. Е. Osgood, G. J. Suci, P. H. Tannenbaum. The Measurement of Meaning. Urbana, 1957.

# СКАЧОК СЛОЖНОСТИ — БОЛЬШИЕ СИСТЕМЫ

---

## II



Глава I СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД И ИССЛЕДОВАНИЕ БОЛЬШИХ СИСТЕМ	96
Глава II ПРОБЛЕМА ИЕРАРХИИ	126
Глава III МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЛЕКТИВОВ	143
Глава IV СТУПЕНИ СЛОЖНОСТИ	161

## Глава I

# СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД И ИССЛЕДОВАНИЕ БОЛЬШИХ СИСТЕМ

В предыдущих главах было показано, как растущая сложность проблем управления и новые масштабы человеческой деятельности привели к возникновению кибернетики. Эта наука, основанная в конце 40-х годов Н. Винером, позволила изучать в общем виде и, следовательно, наиболее четко и эффективно процессы управления в разных областях в тесной связи с процессами передачи и переработки информации. Вместе с тем в ней сразу возникла острая проблема исследования феномена *сложности* систем и перенесения методов, оказавшихся успешными в более простых случаях, на более сложные ситуации. «Кибернетика, — писал У. Р. Эшби, — дает нам надежду на создание эффективных методов для изучения систем чрезвычайной внутренней сложности и управления ими»<sup>1</sup>. Однако задача оказалась весьма трудной, и в попытках решить ее развился тот способ современного научного мышления, за которым ныне закрепилось название системного подхода.

## 1. РАЗВИТИЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Известно, что технические, экономические и иные решения могут оказаться неэффективными, нерациональными и даже вредными, если при их выработке не учитывать (или учитывать не полностью) особенности и взаимосвязи исследуемых объектов в рамках более широких образований, в которые они входят. Аналогичные просчеты могут иметь место и тогда, когда решения, проверенные экспериментально лишь на некоторых фрагментах, абсолютизируются и без соответствующего обоснования переносятся на большие, объемлющие их образования. Можно привести немало примеров такой асистемности, приводящей иногда к невосполнимым потерям. Экономия, на первый взгляд совершенно бесспорная, из-за игнорирования общесистемных соображений мо-

<sup>1</sup> У. Р. Эшби. Введение в кибернетику. М., 1959, стр. 19.

жет оказаться бессмысленной или даже вредной. Типичным примером этого может служить загрязнение океанских вод нефтепродуктами и радиоактивными отходами, приводящее к нарушению биологического равновесия, отрицательные последствия которого трудно переоценить. Не менее поучительны и уроки «слепой» борьбы с отдельными биологическими видами, наносящими хозяйственный вред, их подчас поголовного, систематического уничтожения.

Забвение системных связей в экономике также приносит вред. Так, «увлечение» автоматизацией иногда приводило к созданию автоматизированных поточных линий для производства относительно быстро меняющихся номенклатур, что требовало изменений в комплексной структуре производства и было экономически не оправдано; следствием была дискредитация самой идеи автоматизации. Имеются примеры «бессистемного» использования средств вычислительной техники в управлении, не подкрепленного соответствующим изменением структуры.

Понимание причин подобных просчетов привело ученых и инженеров разных специальностей к осознанию необходимости того, что, принимая какое-либо решение, связанное с изменением или созданием данной сложной системы, следует тщательно изучить, как такие изменения скажутся на системе, в которую данная система входит в качестве одной из подсистем. Это идея *системного подхода*, или *системной ориентации*: части должны рассматриваться в неразрывном единстве с целым. Издавна присутствовавшая в философии и со всей определенностью подчеркнутая Марксом в положении об органическом целом<sup>1</sup>, она с середины нашего столетия получила подкрепление не только в кибернетике, но и в общей («формальной») теории систем; ныне эта идея приобрела огромную популярность и прочно вошла в научный язык.

Вторая половина XX в. — время грандиозного переворота в науке и технике, эпоха глубокого преобразования материально-технической базы человеческого общества. Новые условия вызывают сдвиги в методологии научного познания, одним из проявлений которых является развитие системных знаний и системного подхода. Системная ориентация внедряется во все сферы человеческой деятельности: технику, экономику, науку, административное управление, военное дело и т. д.

<sup>1</sup> См. К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. 46, ч. 1, стр. 229.

Исторически системный подход развивался как в рамках кибернетики (У. Р. Эшби, Г. Грневский, А. И. Берг), так и в виде отдельного направления (Л. фон Берталанфи, М. Месарович и др.), но его связь с кибернетическими исследованиями по существу глубока и естественна. Несомненно, возникновение кибернетики, показавшей значение комплексных, междисциплинарных работ, имело сильное влияние на формирование общей теории систем<sup>1</sup>.

Подобно кибернетике теория систем переживает эпоху юности и находится в состоянии быстрого роста. Каждый год приносит новые идеи, новые методы, новые точки зрения. Многие еще остаются спорными, многие требуют дальнейшего изучения и определения.

Оценивая роль системного подхода в современной науке и технике, разбирая его методологические основы, мы можем говорить о нем как об одной из форм конкретизации принципов материалистической диалектики, одной из форм внедрения диалектического мышления в специальные науки, хотя не все его представители были сознательными диалектиками. Эта внутренняя связь системного подхода с диалектическим мышлением отмечалась многими советскими учеными. «В системных исследованиях (в рамках единого системного подхода), — пишет В. С. Тюхтин, — строится разветвленная сеть математических моделей систем с учетом различной общности, разных типов, классов организованности и предметных областей явлений. Все это позволяет теории систем выступить в функции промежуточного звена между материалистической диалектикой и специальными науками»<sup>2</sup>.

Системный подход приобретает все большее значение в технике и экономике — областях, где он становится мощным орудием эффективной организации человеческой деятельности. Если в анализе, скажем, промышленного производства раньше учитывались преимущественно те или иные отдельные, часто весьма сложные машины и устройства, то теперь центр тяжести перемещается на изучение и разработку комплексных образований, представляющих собой

<sup>1</sup> См. первую часть, гл. III, а также «Проблемы исследования систем и структур». Материалы конференции. М., 1965; «Общая теория систем»; «Исследования по общей теории систем»; И. В. Блауберг, В. Н. Садовский, Э. Г. Юдин. Системный подход: предпосылки, проблемы, трудности. М., 1969; В. С. Тюхтин. Отражение, системы, кибернетика. М., 1972; «Системные исследования». Ежегодники. М., 1969—1974.

<sup>2</sup> В. С. Тюхтин. Отражение, системы, кибернетика, стр. 236.

множества взаимосвязанных объектов, подчас резко отличающихся один от другого свойствами и природой. Особенно ярко такой переход к «комплексной» точке зрения проявляется в связи с развитием средств автоматизации и обработки информации.

Проектирование больших искусственных систем выделилось в новую отрасль современной техники — *системотехнику*, широко использующую общие методы кибернетики и теории систем<sup>1</sup>. Развиваются системное планирование и системное управление производством, системный подход внедряется в управление обществом в целом<sup>2</sup>.

Следует подчеркнуть, что успешное долгосрочное планирование развития техники и экономики в настоящее время немыслимо без включения в число объектов планирования науки в целом и организации комплексных научных исследований. Это в свою очередь приводит к необходимости помимо отдельных научных исследований, отдельных научных направлений рассматривать науку в целом как самостоятельный объект исследования, как сложную, «большую» систему, являющуюся объектом управления. Так возникает *наукосзнание*, или *науковедение*, — наука о самой науке<sup>3</sup>. Науковедение по своему существу является комплексной, системной дисциплиной, но в ее рамках возможны и более специальные формы системного анализа, опирающиеся на общую теорию систем.

Системный подход необходим для процветания *самой науки*, для сохранения высоких темпов научного прогресса. Известно, что интенсивное развитие человеческого знания сопровождается экспоненциальным ростом научных фактов, числа людей, занимающихся научными исследованиями, и средств, затрачиваемых на эти исследования. Ясно, что при существующих методах организации исследова-

<sup>1</sup> См. Г. Х. Гуд, Р. Э. Макол. Системотехника. Введение в проектирование больших систем. М., 1962; Н. П. Бусленко. Моделирование сложных систем. М., 1968; «Большие системы. Теория, методология, проектирование». М., 1971; В. М. Глушков. Введение в АСУ. Киев, 1974.

<sup>2</sup> См. Ю. И. Черняк. Анализ и синтез систем в экономике. М., 1970; Р. Л. Акофф. Планирование в больших экономических системах. М., 1974; С. Янг. Системное управление организацией. М., 1972; Д. М. Гвишиани. Организация и управление. М., 1972; В. Г. Афанасьев. Научное управление обществом (опыт системного анализа). М., 1973.

<sup>3</sup> См. С. Р. Микулинский, Н. И. Родный. Наука как предмет специального исследования. — «Вопросы философии», 1966, № 5; Г. М. Добров. Наука о науке. Введение в общее наукосзнание. Киев, 1966; изд. 2. 1970; «Наука о науке». М., 1966.

дований такой экспоненциальный рост не может продолжаться безгранично. Следовательно, перед человечеством стоят две альтернативные возможности: либо затухание, «насыщение» в развитии науки, о котором говорил американский науковед Д. Прайс<sup>1</sup>, либо резкая концентрация возможностей научного аппарата, позволяющая обеспечить должный темп роста знания при разумных затратах сил общества на научно-технический прогресс. Междисциплинарный, «универсальный» характер системной ориентации, системных исследований, их принципиальная применимость во всех отраслях человеческой деятельности позволяют надеяться, что в них заключен один из источников повышения эффективности науки.

Несмотря на широкое распространение понятия «система», до настоящего времени не существует общепринятого его определения. В литературе, особенно философской, можно встретить различные толкования этого понятия, отражающие различные его аспекты<sup>2</sup>. Трудность задачи объясняется в значительной мере фундаментальным, предельным характером того обобщения, которое скрывается за словом «система». Вероятно, лучшим решением была бы хорошо составленная формальная аксиоматика, но математическая теория систем делает только первые шаги.

Мы попытаемся на содержательном уровне перечислить те основные требования или условия, которыми должен обладать объект, заслуживающий название системы. При этом мы сближаем понятие системы с более простым, абстрактным понятием *множества*, а в качестве основных отношений, определяющих системную природу объекта, принимаем связи между *частями* и *целым*<sup>3</sup>.

Итак, *система* — это некоторый объект, обладающий *целостностью* или рассматриваемый как *целое*. Объект этот

<sup>1</sup> См. «Наука о науке», а также полемику между Д. Прайсом и С. Р. Микулинским («Литературная газета», 29 августа 1971 г.).

<sup>2</sup> Простейшее популярное определение дает Толковый словарь: «нечто целое, представляющее собой единство закономерно расположенных и находящихся во взаимной связи частей» (С. И. Ожегов. Словарь русского языка. М., 1968, стр. 709). Используемые здесь выражения сами, однако, требуют логического анализа.

<sup>3</sup> Близкие взгляды на понятие системы высказывались В. Н. Садовским и Л. А. Блюменфельдом («Системный подход в современной биологии». Материалы встречи-дискуссии. М., 1970; «Системные исследования». Ежегодник. М., 1970); см. также М. Г. Гаазе-Рапопорт. О некоторых методологических подходах к исследованию систем. — «Исследование систем». Материалы Всесоюзного симпозиума. М., 1971.



может быть материальным, конкретным, но может быть также идеальным, абстрактным. Поскольку одна и та же система может рассматриваться с различных сторон, с разных точек зрения, ее исследователю необходимо иметь некоторый критерий выделения системы (как говорят, критерий качества), некоторый *системообразующий параметр*, определяющий «взаимную близость» рассматриваемых образований, объединение их в целое. Этот критерий, конечно, зависит от решаемой задачи, от цели исследования. Его наличие является также необходимым требованием к объекту, который мы называем системой.

Далее, система обычно находится в некоторой *среде*, некотором *окружении* и потому является *частью*, или *подсистемой*, какой-либо большей или каких-либо больших *систем*. Отсюда требование к системе — наличие по крайней мере одной большей системы, объемлющей данную.

Наконец, последнее требование: возможность *выделения* из нее частей, меньших *подсистем* (элементов). Так, например, атомы, входящие в молекулу, относятся к уровню более «низкому», чем сама молекула. Элементарные частицы, входящие в каждый из атомов, относятся к еще более низкому уровню организации. Следуя ленинскому тезису «электрон так же неисчерпаем, как и атом»<sup>1</sup>, мы можем представить себе любую материальную систему как *иерархию уровней*, уходящих в «минус бесконечность». Другими словами, можно сказать, что любой элемент материальной системы представляет в свою очередь также систему, состоящую из еще меньших элементов, и т. д.

По-видимому, можно утверждать, что выполнения перечисленных четырех условий достаточно, чтобы соответствующее образование рассматривать как систему. Во всяком случае подавляющее большинство реально используемых понятий о системе, как таковой, удовлетворяет перечисленным требованиям.

Рассмотрим теперь эти условия подробнее.

Обычно в понятие системы включается также наличие *связей* или *отношений* между элементами системы, но, трактуя каждый комплекс или при необходимости каждую пару взаимосвязанных элементов как некоторую подсистему, мы можем свести понятие *связи* к понятию *иерархии* входящих друг в друга объектов и рассматривать первое как производное от второго. Аналогичным образом в современной

<sup>1</sup> В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 18, стр. 277.

логике отношения сводят к множествам множеств<sup>1</sup>. С учетом таких связей и подчинений частей понятие системы можно сравнить в известном смысле с понятием *математической структуры* у Н. Бурбаки; действительно, наиболее общие математические определения системы приближаются к этой итоговой абстракции классической математики.

То, что выделение объектов в качестве систем зависит от позиции исследователя, от задачи, которая подлежит решению, не означает, конечно, что реальное образование не выступает в качестве системы вне зависимости от нашего сознания; просто исследователь выбирает объект изучения в соответствии с определенными целями.

Проблема выбора критерия качества — центральный момент всего системного подхода. Если не сформулирован критерий качества, данное множество объектов нет смысла рассматривать как систему. Правда, критерий (или цель) может подразумеваться неявно, что может приводить (и часто приводит) к подмене одной системы другой, состоящей из тех же элементов, но рассматриваемой в ином плане. Как правило, критерий качества системы задается той большей системой, в которую входит рассматриваемая. Изменение цели исследования, уточнение или переосмысление задачи часто заставляют исследователя переходить от данной системы к большей системе — от «части» к «целому» и обратно; так возникают различные уровни системного рассмотрения.

Вопрос о целостности системы тесно переплетается с вопросом об ее *изменчивости*. С одной стороны, абсолютно неизменная система была бы вообще не доступна нашему наблюдению, ибо она не взаимодействовала бы с «соседними» системами и не давала бы ответов на воздействия исследователя. С другой стороны, всегда приходится решать, в какой степени изменяющаяся система остается сама собой. Ответ на этот вопрос, по-видимому, нельзя получить без перехода к большей системе, без рассмотрения критерия качества данной системы, заданного объемлющей системой.

Вообще говоря, система сохраняет целостность до тех пор, пока связи между ее элементами в каком-то смысле *сильнее, теснее*, чем их связи с окружающей средой, с объемлющей системой. Как только внутренние связи данного

<sup>1</sup> См. Д. Гильберт, В. Аккерман. Основы теоретической логики. М., 1947, стр. 199. В их работе сделана ссылка на предложение польского математика К. Куратовского. С подобным предложением выступил в одном из своих первых исследований и Н. Винер.

образования ослабнут, оно перестанет существовать как нечто целое, распадется на отдельные части. С подобной ситуацией мы сталкиваемся при появлении новых междисциплинарных наук. Пока объекты различных наук связаны друг с другом рамками немногих исследований, пока не сформировались общие для данных наук исследовательские методы, пока специалисты разных областей, изучая «одни и те же» объекты, преследуют самостоятельные цели, до тех пор связи этих объектов с породившими их науками остаются более сильными, и мы имеем дело с междисциплинарными исследованиями. Как только таких междисциплинарных исследований становится достаточно много и образованные ими связи становятся сильнее связей их объектов с традиционными науками, образуется новая система — научное направление или наука, вырывающая эти объекты из старых рамок.

Заметим, что в ряде случаев такие «превращения» систем происходят достаточно плавно и установить «точную границу» между двумя различными системами оказывается невозможным. Этот случай может быть выражен на языке расплывчатых (размытых) множеств. На практике поэтому приходится учитывать строгость формулировки критерия качества. Так, системой окружностей с позиций математики является совокупность замкнутых кривых, все точки каждой из которых равноудалены от центра, в практической же деятельности под системой окружностей обычно достаточно понимать совокупность замкнутых кривых, эксцентриситет которых не превосходит некоторой постоянной величины, определяемой требованиями практической задачи.

Требование рассматривать каждую систему вместе с ее окружением, т. е. в рамках некоторой более общей системы, кажется вполне естественным. Однако следует сказать, что математическая теория систем рассматривает — на высоком уровне абстракции — и системы без окружения; У. Р. Эшби называет их *абсолютными*, а многие советские авторы — *автономными*. Исключения составляют также системы, охватывающие всю Вселенную, но здесь обычные системные понятия, например «часть» и «целое», теряют прямое значение и требуют новой трактовки ввиду возникающих парадоксов и антиномий. Некоторые авторы называют подобные сверхсистемы *парадоксальными*.

Существует много попыток общего математического определения системы. Однако они несовершенны: математическая теория систем находится еще в состоянии формирова-

ния и охватывает по существу только отдельные, достаточно простые классы систем. Для действительно сложных и больших систем наличный аппарат часто оказывается слишком грубым и громоздким. Поэтому современные исследователи систем широко используют содержательные, неформальные рассуждения и интуитивные, образные представления.

## 2. ИЗМЕНЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ. КИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Всякая реальная (неабстрактная) система претерпевает изменения, переходит из одного состояния в другое. При этом имеет место взаимодействие системы со средой, в ходе которого происходит передача в пространстве и времени массы, энергии и информации («структурности», упорядоченности), причем «удельный вес» этих трех процессов в разных случаях различен.

Изменения системы могут иметь две крайние и противоположные друг другу формы: *деградацию* (разрушение системы, ее переход в менее упорядоченное состояние, возрастание энтропии) и *развитие* (усложнение системы, накопление ею информации, переход в более упорядоченное состояние). Вместе с тем возможно и *временное равновесие* между системой и средой, благодаря которому система в течение известного времени либо остается *относительно неизменной*, либо испытывает лишь *обратимые изменения*, не нарушающие ее целостности и структуры.

Следуя установившейся традиции, будем называть системы, при исследовании которых можно пренебречь их изменениями во времени, *статическими системами*; условность такого определения очевидна, однако для решения ряда задач, главным образом в теоретической и строительной механике, оно оказывается полезным. Напротив, системы, состояние которых — взаимоотношение со средой, связи между элементами (подсистемами) и т. п. — изменяется во времени, будем называть *динамическими системами*. Заметим, что приводимое здесь понятие динамической системы существенно шире одноименного понятия, обычно употребляемого в теоретической механике. В частности, многие динамические системы (например, наука, система обработки информации и др.) не являются механическими динамическими системами, хотя любая динамическая система механики продолжает оставаться динамической и в смысле приведенного определения. Согласно ска-

занному выше, динамические системы можно разделить на *обратимые* и *необратимые*.

Введение понятия динамической системы позволяет конкретизировать общее абстрактное определение системы и сформулировать ряд проблем, неизбежно возникающих при исследовании изменчивости систем.

Прежде всего, что изменяется в динамических системах? Если рассматривать системы в отвлечении от среды, то изменяться могут, с одной стороны, элементы (подсистемы) данной системы, с другой стороны, связи, отношения между элементами, подсистемами.

Каковы причины происходящих изменений? Они могут быть заложены в самой системе, но могут определяться и воздействиями на нее других систем, образующих по отношению к данной внешнюю среду.

Далее, изменчивость систем предполагает понятие *состояния системы*. Под состоянием системы естественно понимать множество фиксированных в данный момент значений параметров, характеризующих систему. Не давая здесь формального определения параметров системы (по-видимому, строгое определение в общем случае весьма затруднительно), заметим, что в качестве таковых могут выступать любые характеристики системы, интересующие исследователя и *поддающиеся измерению или наблюдению*, в том числе внешние воздействия на систему и ее реакции, т. е. ее воздействия на окружающую среду (другие системы). К числу параметров системы следует отнести и критерий качества, системообразующий параметр. Изменяющаяся во времени последовательность состояний системы определяет ее *поведение*, или *работу*. Таким образом, возникает общая задача обеспечения требуемого — определяемого критерием качества — поведения динамической системы, т. е. задача *управления* динамической системой. В частности, речь может идти о противодействии необратимым изменениям, об *управлении целостностью* системы.

Упомянутая задача позволяет выделить из обширного множества динамических систем так называемые *кибернетические системы*, именуемые также управляющими системами, точнее, системами управления. Таковы многие сложные управляющие машины и устройства, разнообразные живые существа. Удовлетворяя всем требованиям, предъявляемым к системам вообще, кибернетические системы характеризуются следующими особенностями. Система связана с внешней средой; она состоит по крайней мере из двух подси-

стем: управляющей системы и исполнительного органа (исполнительного устройства, управляемой системы); в кибернетической системе имеется по меньшей мере одна замкнутая петля воздействия (обратная связь); для осуществления процессов управления используется информация (т. е. в системе происходит переработка данных). Кибернетические системы — это те же динамические системы, но рассматриваемые с точки зрения обеспечения в них процессов рационального управления, т. е. сохранения критерия качества (цели) в заданных пределах. В частности, целью системы может быть ее собственное сохранение, рост или даже разрушение. Кибернетические системы могут быть обратимыми и необратимыми<sup>1</sup>.

Рассмотрим подробнее перечисленные особенности кибернетических систем.

**Связь с внешней средой.** Как и всякая система, кибернетическая система всегда есть подсистема некоторой объемлющей системы. Обычно объемлющая система точно не определяется, из нее только выделяется окружение, или среда, часть, воздействующая на данную систему. Предполагается, что о среде известно только, что она может воздействовать на изучаемую систему, изменяя ее в определенных пределах. Система в свою очередь воздействует в процессе своей работы на внешние по отношению к ней объекты среды, изменяя их.

Воздействия среды на системы и системы на среду могут иметь самую различную природу, они могут быть «вещественными», связанными с переносами вещества, материалов, могут быть энергетическими, информационными, иметь какую-либо иную природу. Они могут быть строго определенными, детерминированными, а могут иметь и случайный, стохастический характер.

Таким образом, кибернетическая система является существенно открытой, не замкнутой, не изолированной от окружающей ее среды. Заметим попутно, что абсолютно замкнутых систем в действительности не существует, как это следует из определения системы. Понятия «замкнутости — незамкнутости» — это абстракции, позволяющие выделять связи системы со средой, способы воздействия среды на систему и системы на среду.

**Наличие исполнительных и управляющих органов.** Особенностью кибернетических систем является возможность

<sup>1</sup> См. М. Г. Гаазе-Рапопорт. Кибернетика и теория систем. — «Системные исследования». Ежегодник. М., 1973.

выделения в них подсистем, воздействующих на внешнюю среду и называемых исполнительными, или управляемыми, органами, и подсистем, воспринимающих воздействия внешней среды и обеспечивающих нужный ответ на них системы, — управляющих органов. К управляемым органам относятся исполнительный двигатель следящей системы, эффекторы (мотонейроны) нервной системы, мышечная система человека и животных и другие выходные элементы различных систем, воздействующие на «внешнюю среду»; управляющими же органами являются управляющий усилитель, рецепторы и центральная нервная система, вообще подсистемы разнообразных реальных систем, воспринимающие и перерабатывающие воздействия соответствующей внешней среды.

Достаточно сложные кибернетические системы могут содержать несколько исполнительных и управляющих подсистем. Так, сложные системы управления летательным аппаратом могут иметь несколько исполнительных двигателей; живые организмы обладают сложной системой исполнительных органов (мускулатура), отдельные элементы которой способны функционировать как согласованно, так и независимо друг от друга; система управления экономикой имеет множество разнообразных исполнительных элементов, воспринимающих и реализующих управляющие воздействия. Точно так же система может иметь и несколько управляющих органов. Система управления летательным аппаратом может иметь устройство, управляющее курсом полета, систему управления скоростью или высотой и т. п. Мозг живых организмов также содержит целый ряд управляющих подсистем, регулирующих те или иные функции организма.

В ряде случаев кибернетические системы могут быть представлены в виде иерархической последовательности взаимосвязанных кибернетических же подсистем. При этом исполнительный орган подсистемы высшего уровня может играть роль управляющего органа для подсистемы низшего уровня, воздействуя на ее управляющую часть. Так, например, головной мозг вырабатывает управляющие воздействия для спинных отделов нервной системы, которые в свою очередь осуществляют управляющие воздействия на мускулы; в системе управления отраслью народного хозяйства центральный управляющий орган (скажем, на уровне министерства) «выдает» управляющие сигналы «периферийным» системам, которые осуществляют выработку управляющих

воздействий, регулирующих ход технологических процессов на предприятиях, и т. п.

Помимо воздействий, исходящих из внешней среды, управляющие подсистемы кибернетических систем воспринимают также информацию от управляемых ими подсистем. Эта информация касается состояний последних и используется управляющими органами для реализации функций управления и выработки управляющих воздействий. Во многих сложных кибернетических системах бывает трудно локализовать управляющие и исполнительные элементы, связанные разнообразными «пересекающимися» связями, но тем не менее всегда можно выделить элементы, выполняющие функции управления и исполнения.

**Наличие замкнутой цепи воздействий** (обратной связи) также является характерной особенностью кибернетических систем. Выше уже указывалось, что управляющие органы при формировании управляющих воздействий используют как данные о состоянии среды (внешние воздействия), так и данные о состоянии исполнительного органа (воздействия обратной связи). Управляющие воздействия и воздействия обратной связи образуют *замкнутую цепь (контур)* воздействий, «текущих» в системе от исполнительного органа к управляющему и от управляющего к исполнительному. Число таких замкнутых контуров воздействий может быть различным; в сложных кибернетических системах (в живых организмах, экономических и социальных структурах, в биоценозах, популяциях) не всегда можно установить все такие контуры, но по крайней мере один из них выделить удается всегда. Характер воздействий при этом может быть самым различным, варьируя в зависимости от физического носителя сигнала, его формы (дискретной или непрерывной), длительности, скорости передачи воздействий и т. п.

Заметим, что с точки зрения поведения наличие обратной связи не является необходимой чертой кибернетической системы. Любую систему с обратной связью всегда можно заменить функционально эквивалентной ей системой без обратной связи, и наоборот<sup>1</sup>. Тем не менее с точки зрения структуры системы наличие обратной связи представляет собой характерную черту большинства кибернетических систем.

<sup>1</sup> См. М. Г. Гаазе-Рапопорт, А. А. Фельдбаум. Обратная связь, — «Энциклопедия современной техники. Автоматизация производства и промышленная электроника», т. 2. М., 1963.



**Использование информации для управления** также присуще кибернетическим системам. В процессе работы эти системы используют информацию о состоянии внешней среды и исполнительных органов, перерабатывают ее и вырабатывают управляющую информацию, которая поступает в исполнительные органы. Для нормальной работы кибернетической системы не так важно, какие физические носители передают сигналы обратной связи или воздействия внешней среды, важно *содержание*, смысл этих сигналов, т. е. те «сведения» о состоянии и параметрах среды и исполнительных органов, которые с помощью этих сигналов передаются. Управляющие органы оценивают поступающую информацию в соответствии с критерием (целью) функционирования системы и осуществляют воздействия, несущие информацию о желаемом характере поведения исполнительного органа. Потоки энергии, передаваемые сигналами обратной связи или управляющими воздействиями, как правило, незначительны и недостаточны по величине для непосредственного приведения в действие органов, на которые они поступают. Они поэтому преобразуются и усиливаются за счет специального источника энергии, часто оказывающегося внешним по отношению к системе.

Информационный характер управления в кибернетических системах позволяет изучать и сравнивать работу этих систем, отвлекаясь от конкретного вида разнообразных субстратов носителей информации в них. Именно это и является основой широкого использования метода *моделирования* при исследовании систем.

Таковы важнейшие особенности кибернетических систем. В заключение скажем несколько слов о *математических теориях поведения систем*. Для кибернетических систем это хорошо известные теории следящих систем и конечных автоматов, упоминавшиеся еще Винером. Постепенно, однако, развивались и более общие математические концепции динамических систем, детерминированных и стохастических, сначала в трудах кибернетиков, а затем в самостоятельных трудах по математической теории систем. В этих общих концепциях стремятся соединить дискретный случай конечных автоматов (и, в частности, релейных схем) и непрерывный случай классических следящих систем (систем автоматического регулирования)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> См. У. Р. Эшби. Конструкция мозга. М., 1962; В. М. Глушков. Введение в кибернетику. Киев, 1964; У. Портер. Современные основания

Приведем в качестве примера определение динамической системы, принадлежащее Р. Калману, П. Фалбу и М. Арбибу и развитое Э. Л. Наппельбаумом в его лекции в Пушкинской школе по управлению в биофизических системах (1970 г.). Это определение характеризует динамическую систему как упорядоченную восьмерку:

$$\Sigma = \{T, T_x, T_y, X, Y, U, W, S\},$$

где  $T$  — непустая аддитивная группа линейно упорядоченных элементов (время);  $T_x$  и  $T_y$  — некоторые подмножества множества  $T$ , содержательно характеризующие моменты поступления (съема) входных и выходных сигналов из алфавитов  $X$  и  $Y$ ;  $U$  и  $W$  — множества допустимых входных и выходных значений:  $U \subset X^{T_x}$ ,  $W \subset Y^{T_y}$ ;  $S$  — системообразующий критерий — отношение, отображающее  $U$  в  $W$ :  $S \subset U \times W$ , где  $\times$  есть знак операции образования декартова произведения двух множеств.

Накладывая различные ограничения на элементы перечисленной восьмерки, можно получить различные конкретные спецификации систем. Так, в зависимости от дискретности или непрерывности множества  $T$  получаются системы с дискретным или непрерывным временем; задавая соответствующим образом  $T$  и  $S$  и вводя понятие состояния системы, мы получаем конечный автомат и т. п. На базе этого определения динамической системы легко определяется такое понятие, как поведение системы, а при введении топологии для ее траектории — понятия достижимости того или иного состояния, управляемости и пр.

Более абстрактное, отвлеченное от времени определение системы мы находим у М. Месаровича, Д. Мако и И. Такахары<sup>1</sup>. Эти исследователи понимают под системой произвольное отношение  $S$  над абстрактными множествами  $X$  и  $Y$ :  $S \subset X \times Y$ . Если  $X$  — функция, то система называется функциональной;  $X$  и  $Y$  суть множество входов и множество выходов системы соответственно.

Интересна абстрактная концепция Н. Н. Каськова, который стремился учесть многообразную природу связей и за-

общей теории систем; Р. Калман, П. Фалб, М. Арбиб. Очерки по математической теории систем. М., 1971; Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, И. Н. Коваленко. Лекции по теории сложных систем. М., 1973.

<sup>1</sup> См. М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. Теория иерархических многоуровневых систем. М., 1973; ср. М. D. Mesarovic. Development of Mathematical Theory of General Systems. — «XIII International Congress of the History of Sciences». Moscow, 1971.

всисмоностей в реальных сложных системах <sup>1</sup>. Пусть объекту приписаны переменные  $x_1, \dots, y_1, \dots$ , и пусть заданы множества их значений  $X_1, \dots, Y_1 \dots$ . Положим, далее, что на этих множествах определено семейство отношений  $(R_i) i \in I$ , образующих семейство совместных связей. Наконец, пусть даны функции  $(f_j) j \in J$ , согласующие значения переменных  $x_1, \dots, x_n$  с остальными переменными  $y_1, \dots, y_m$ , и пусть

$$X = \bigcup_{i=1}^n X_i, Y = \bigcup_{j=1}^m Y_j. \text{ Тогда отношения из } (R_i) i \in I \text{ бу-}$$

дут определены на множествах  $X$  и  $Y$ , а функции  $(f_j) j \in J$  будут в общем случае частичными многозначными функциями из  $X$  в  $Y$ .

Для этого объекта системой  $S$  называется семейство совместных связей  $(R_i) i \in I$  между переменными  $x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m$  вместе с заданным семейством функций  $(f_j) j \in J$ , согласующих значения переменных  $x_1, \dots, x_n$  со значениями переменных  $y_1, \dots, y_m$ . Это определение системы можно записать кратко в виде равенства  $S = \{X, Y, (R_i) i \in I, (f_j) j \in J\}$ , где множество  $X$  — входы системы, множество  $Y$  — выходы, семейство  $(R_i) i \in I$  — связи, семейство  $(f_j) j \in J$  — законы поведения (или функционирования) системы.

Большинство такого рода математических схем («моделей») описывает преимущественно внешнее поведение системы, ее взаимодействие с окружающей средой. Другие модели, возникшие в теориях сетей разного рода, и в частности в теориях электрических цепей, отражают процесс внутреннего взаимодействия частей (узлов) системы. Таково, например, понятие *кумулятивной сети*, предложенное Г. Н. Поваровым <sup>2</sup>.

Кумулятивная сеть есть тройка  $\{M, \|a_{ij}\|, \{P_n\}\}$ , где  $M$  — множество узлов сети,  $\|a_{ij}\|$  — матрица первичных связей между ними,  $P_n$  — множество допустимых путей взаимодействия длины  $r \leq n$ ,  $\{P_n\}$  — последовательность  $P_1, P_2 \dots$ . Связь  $a_{kl}^{(n)}$  узлов  $k$  и  $l$  на  $n$ -й стадии взаимодействия зависит от первичных связей  $a_{ij}$  и множества  $P_n$ ; предполагается, что эта зависимость линейная:

$$a_{kl}^{(n)} = \sum_{k i_1 i_2 \dots i_{r-1} l \in P_n} a_{k i_1} a_{i_1 i_2} \dots a_{i_{r-1} l}.$$

<sup>1</sup> См. Н. Н. Каськов. Теоретико-множественное определение понятия системы. — «Системные исследования. 1971». Ежегодник. М., 1972.

<sup>2</sup> См. Г. Н. Поваров. Краткий очерк теории кумулятивных сетей. — «Проблемы передачи информации», 1960, вып. 6; его же. Об одной математической теории систем. — «Прикладные проблемы теории систем и системотехники». Материалы семинара. М., 1973.

Так как  $P_{n-1} \subset P_n$ , то взаимодействие узлов аккумулируется (отсюда и название сети):

$$a_{kl}^{(n)} = a_{kl}^{(n-1)} + \sum_{k i_1 i_2 \dots i_{n-1} l \in P_n} a_{k i_1} a_{i_1 i_2} \dots a_{i_{n-1} l}.$$

Связи могут измеряться в различных алгебрах: числовой, булевой и пр. Общность их рассмотрения достигается при помощи нового алгебраического аппарата — теории нумерондов. Нумерондом называется алгебра с двумя операциями: сложением и умножением, если они ассоциативны, коммутативны и имеют соответственно ноль и единицу, а умножение дистрибутивно относительно сложения (как известно, этими свойствами обладают операции над натуральными числами). Так построенная теория кумулятивных сетей позволяет исследовать взаимодействия в широком классе реальных сетей, включая, например, релейные схемы, сети связи, сети событий, сети целей и т. д.

В других работах по математической теории систем можно найти много иных интересных идей. Например, Ю. А. Шрейдер рассматривает систему не как «множество частей», а как «целостный объект», допускающий различные членения, для чего предлагается особый аппарат.

### 3. БОЛЬШИЕ И СВЕРХБОЛЬШИЕ СИСТЕМЫ

В настоящее время трудно дать точное определение понятия «большая система», хотя в литературе их немало. Не избывая очередной формулировки, мы попытаемся перечислить здесь важнейшие особенности больших систем.

*Первое* — наличие большого числа элементов, а следовательно, и чрезвычайно большого числа состояний, в которых может находиться система и которое практически не поддается перебору. Системы, называемые большими, содержат тысячи и более элементов. Например, современная телефонная сеть города и страны обслуживает миллионы абонентов, мозг человека содержит около 10 млрд. нервных клеток (нейронов). В силу наличия такого огромного числа элементов, способных изменять свои состояния, общее количество теоретически допустимых состояний, в которых может находиться система, хотя и ограничено, но столь велико, что может считаться практически бесконечным.

Заметим, что речь идет о независимых состояниях или о таких, которые не поддаются простому аналитическому

описанию. Такая система, как рычаг, тоже принимает бесконечно большое число (континуум) состояний, однако если координату одного из плечей рычага принять за вход ( $x$ ), то координата второго плеча ( $y$ ) однозначно определится соотношением:  $y = Kx$ . Вряд ли имеет смысл считать такую систему большой или сложной.

*Второе* — наличие большого числа разнообразных связей между элементами системы, не позволяющее изучать функционирование системы поэлементно. Так, знание конструкции реле недостаточно для понимания работы телефонного узла, а знание структуры и свойств отдельных нейронов далеко не достаточно для понимания принципов функционирования мозговых структур. Связи в больших системах могут иметь как детерминированный, так и стохастический характер.

*Третье* — наличие во многих случаях прямой или косвенной связи с биологическими системами, живыми организмами и, далее, организмами, наделенными психикой. Небиологические большие системы весьма часто содержат в себе биологические объекты или по крайней мере взаимодействуют с ними. Так, при проектировании больших технических систем мы должны учитывать поведение людей, которые обслуживают их или обслуживаются ими, так что фактически речь идет о некоторых человеко-машинных комплексах. Вообще сложность как бы концентрируется в явлениях жизни, достигает здесь своего пика<sup>1</sup>.

Естественно, что большие системы, будучи системами кибернетическими, обладают и всеми перечисленными выше свойствами последних: целостностью, наличием подсистем и объемлющих систем, исполнительных и управляющих органов, информационными связями и пр. С кибернетической точки зрения характерной чертой многих больших систем является *иерархическая структура управления*. Такие системы содержат большое число источников, воспринимающих информацию, идущую от внешней среды, и образующих первый уровень системы. Устройства этого уровня либо только воспринимают информацию о внешней среде и передают ее устройствам второго уровня, либо осу-

<sup>1</sup> Некоторые авторы приписывают космогоническим процессам еще более высокую сложность («парадоксальные системы», управляющие пространством и временем, см. гл. IV данной части). Впрочем, процессы становления жизни (биогенез) и становления разума (ноогенез) также имеют космический характер.

шествовать первичную обработку воспринятой информации и передают следующему уровню уже результаты обобщения поступившей информации. На следующем уровне может осуществляться накопление и дальнейший анализ и обобщение поступившей информации. На самом высшем уровне на основе анализа обобщенной информации принимается решение, которое затем конкретизируется и реализуется с помощью ветвящейся иерархической системы, управляющей разветвленной сетью исполнительных элементов. Встречаются большие системы и другой структуры, которые состоят подобно улью или муравейнику из относительно однородных автономных элементов, функционирующих в соответствии со своими локальными критериями качества и обменивающихся между собой информацией<sup>1</sup>. Существуют также разнообразные промежуточные структуры.

Построение единой теории больших систем затрудняется в силу их чрезвычайного разнообразия. Здесь и сложные автоматизированные технические системы (например, упомянутые системы телефонной связи); сложные экономические системы (от крупных предприятий и промышленных объединений до целых отраслей народного хозяйства и всего народного хозяйства в целом); различные биологические системы (от клетки и организма до популяции, биоценоза, биосферы); различные социальные структуры. По существу следовало бы говорить о целой гамме уровней сложности, требующих к себе особых подходов. В частности, из множества больших систем можно выделить особую группу *сверхбольших систем*, таких, например, как живые организмы или сложные экономические и социальные структуры.

Рассмотрим в качестве примера автоматизированную систему управления отраслью (ОАСУ). В этой большой системе всегда удастся выделить иерархическую структуру. Низшим ее звеном являются предприятия и их управляющие системы, следующий уровень иерархии образует кусты и фирмы и, наконец, высший иерархический уровень составляет министерство — центральный управляющий орган системы. Каждый уровень такой системы может рассматриваться как одна или несколько ее подсистем.

Членение ОАСУ на относительно самостоятельные подсистемы можно провести и по другому принципу, выделяя в системе несколько слоев («срезов»), охватывающих все

<sup>1</sup> Ср. Ю. С. Голубев-Новожилов. Многомашинные комплексы вычислительных средств. М., 1967.

рассмотренные выше иерархические уровни. К таким подсистемам относятся:

— Система административного управления отраслью, включающая в структуру и основные принципы управления, определяемые действующими правовыми нормами. Она охватывает все элементы ОАСУ.

— Система технических средств, используемых для управления отраслью; она представляет собой комплекс средств, используемых для сбора, передачи и обработки информации в рамках ОАСУ (средства вычислительной техники, связи, оргтехники и др.), распространяется на все элементы иерархической структуры ОАСУ и обладает в рамках последней целостностью и достаточной автономией.

— Функциональная (математическая) система, представляющая собой комплекс алгоритмов, средств математического обеспечения ОАСУ в целом (программы задач, решаемых системой в процессе ее функционирования). Эта система охватывает всю совокупность информационно-вычислительных средств ОАСУ и, следовательно, все ее элементы.

Каждая из трех систем (подсистем) ОАСУ имеет иерархическую структуру, развивается по собственным, ей присущим законам и является большой системой. Очевидно также, что эти три подсистемы связаны между собой в рамках ОАСУ. Так, изменения административной подсистемы оказывают влияние на объем потоков перерабатываемой информации и, следовательно, на выбор технических средств; подсистема технических средств оказывает влияние на подсистему математического обеспечения и может привести к некоторому ее изменению. Естественно также, что изменение задач, решаемых системой, и их алгоритмов может повлечь за собой изменения подсистемы технических средств.

В рационально организованной ОАСУ все эти взаимовлияния не должны быть сильными. Они должны быть «индуктивными», являясь лишь относительно мелкими «наводками» на другие подсистемы. Это означает, что каждая из подсистем должна обладать достаточной автономией и устойчивостью и иметь возможность взаимодействовать с остальными подсистемами при их изменениях в относительно широких пределах. Так, система технических средств не должна существенно перестраиваться при переходе от отраслевого к территориальному принципу управления или при внесении изменений и уточнений в алгоритмы управ-

ления. Подобным образом изменение технических средств, замена существующих ЭВМ более совершенными не должны приводить к ломке системы математического обеспечения или к перестройке общих принципов управления, принятых в ОАСУ.

Аналогичная ситуация (когда в рамках единой иерархической структуры большой системы можно выделить несколько относительно автономно функционирующих, но взаимосвязанных и взаимодействующих больших подсистем) наблюдается и в живых организмах, где можно, например, выделить центральную нервную систему, систему гуморального управления метаболическими процессами, вегетативную нервную систему, систему гомеостатических регуляций и др. Все эти подсистемы большой системы — организма, являясь также большими системами, функционируют в основном автономно, оказывая в то же время «индуктивные» воздействия друг на друга.

Таким образом, сверхбольшие системы предстают перед нами как совокупности «индуктивно» связанных между собой больших подсистем. Основной особенностью сверхбольших систем является повышенная стабильность входящих в них больших подсистем, способных за счет избыточности (структурной и материальной) выполнять свои функции в условиях весьма широких изменений каждой из них. Такую повышенную стабильность можно назвать *системным гомеостазом*. Нетрудно видеть, что к сверхбольшим системам относятся такие социальные системы, как государство, общественная формация, народное хозяйство в целом, а также такие системы биологической природы, как популяция, биоценоз и др.

Методологический смысл выделения сверхбольших систем в самостоятельную группу заключается в том, что при их анализе (и проектировании в случае их целенаправленного «конструирования») оказывается возможным и целесообразным пренебрегать на отдельных этапах индуктивными связями и рассматривать соответствующие большие подсистемы как автономные. При этом в качестве гарантии возможности их последующего синтетического рассмотрения или объединения в одну систему вводится некоторая избыточность. Такой подход оказывается, например, полезным при разработке сложных экономических систем управления, таких, как ОАСУ, ОГАС и др. Этот же подход облегчает анализ и исследование многих биологических систем.



#### 4. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БОЛЬШИХ СИСТЕМ

Многообразие конкретных систем, различающихся по функциям, структуре и сложности, делает малообоснованными и маловероятными надежды на создание в ближайшем будущем полной и достаточно общей теории систем. Также трудно, по-видимому, рассчитывать на формулирование достаточно содержательных общих положений на высшем уровне абстракции. Тем не менее практическое значение систем — особенно *больших* и *сверхбольших* — приводит к быстрому росту числа так называемых *системных исследований*. Развитие теоретических построений в этой области должно, вероятно, идти по пути накопления и обобщения фактов, касающихся отдельных видов или групп систем, выявления специфических особенностей и свойств таких групп.

Охарактеризуем в общих чертах некоторые важные подходы к исследованию больших и сверхбольших систем. На практике они часто сливаются, и не всегда легко определить, какой аспект является в той или иной конкретной работе ведущим. Тем не менее такой обзор полезен как первое приближение.

**Информационный подход.** Выше отмечалось, что кибернетические, а значит, и большие системы характеризуются тем, что в них осуществляется переработка информации, используемой для управления ими. Это определяет интенсивное применение кибернетических методов для исследования систем.

Сущность кибернетических методов заключается здесь в информационном подходе к изучению систем, в рассмотрении их как *устройств для переработки информации*: в определении потоков информации, их объемов, способов кодирования циркулирующей в системе информации, алгоритмов ее переработки. Такой подход позволяет рассматривать различные по субстрату системы, одинаковым образом перерабатывающие информацию, как *эквивалентные в информационном смысле* и переносить результаты исследования систем одного субстрата на все информационно-эквивалентные им системы вообще. На этом принципе, в частности, основан метод моделирования.

Информационный подход позволяет сформулировать объективные критерии для расчленения системы на подсистемы в зависимости от их роли и функций в общем про-

цессе переработки информации системой. Так, могут быть выделены подсистемы, воспринимающие информацию (рецепторные), подсистемы, ее передающие, осуществляющие ее перекодирование или обрабатывающие ее по определенным алгоритмам. Исследования выделенных таким образом подсистем позволяют выявить их роль в общем процессе переработки информации системой и могут служить исходными данными для последующего синтеза всей системы. Математически информационный подход опирается главным образом на статистическую теорию информации и теорию автоматов <sup>1</sup>.

**Структурно-логический подход.** Сторонники общей теории систем пытаются дать формальное, структурно-логическое описание систем, не останавливаясь подробно на информационных аспектах. Основное внимание здесь обращается на *естественную структуру систем*: выделяются различные виды *системных иерархий* и делаются попытки сформулировать строгое математическое описание работы системы. В случае больших систем их приходится, однако, значительно развивать и дополнять, чтобы получить эффективный рабочий аппарат.

Формально-логический подход исследует организацию больших систем и устанавливает связи и закономерности между особенностями организации системы и ее функциями. В силу этого его можно назвать также *теоретико-организационным подходом*.

Необходимо отметить, что изучение структуры и организации больших систем, изучение их функционирования невозможно без рассмотрения информационных аспектов работы систем. Поэтому фактически указанные информационный и структурно-логический подходы, исторически сложившиеся как два независимых направления, в настоящее время все в большей степени смыкаются в единый подход к исследованию больших и сверхбольших систем <sup>2</sup>.

**Эвристические методы.** Высокая сложность больших систем часто делает невозможным использование для их

<sup>1</sup> См., например, книгу Г. Х. Гуда и Р. Э. Макола «Системотехника. Введение в проектирование больших систем» и другие работы по системотехнике и системному планированию.

<sup>2</sup> См., например, «Общая теория систем»; «Проблемы формального анализа систем», М., 1968; «Исследования по общей теории систем»; В. А. Горбатов. Схемы управления ЦВМ и графы. М., 1971; Б. С. Флейшман. Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем. М., 1971; М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. Теория иерархических многоуровневых систем.

анализа и проектирования точных математических методов. Поэтому большое распространение получили так называемые *эвристические методы* — совокупность эмпирически сформулированных правил или рекомендаций, которые принимаются без доказательства, но во многих случаях бывают полезными<sup>1</sup>. Часто эмпирические правила носят методический характер и в этом смысле являются обобщением достаточно большого практического опыта. К ним относятся, например, такие: *принцип разумной универсализации*, рекомендующий не увлекаться созданием «сверх-универсальных» систем, а ограничиваться экономически разумной степенью универсализации; и *принцип иерархичности управления*, декларирующий необходимость иерархического управления в больших системах, так как при централизованном непосредственном управлении процессору пришлось бы обрабатывать слишком много информации. Принцип этот в применении, например, к административным системам требует, чтобы число подразделений, непосредственно подчиненных данной иерархической единице (так называемый *спан*), не превосходило 3—5. Естественно, что использование для управления в таких системах средств автоматизации и вычислительной техники может несколько увеличить эти значения, но принцип сохраняется и в этом случае.

Следует назвать еще *принцип подготовки развития*, требующий при создании большой системы предусматривать возможности ее дальнейшего роста и преобразования, заложив в структуру системы необходимую избыточность. С этим принципом часто приходится сталкиваться при проектировании транспортных систем, систем связи, массового производства на крупных предприятиях и т. д.

Часто эвристические рекомендации формулируются в виде некоторой последовательности эмпирических правил, выполнение которых обычно приводит к достижению цели. Так, исследования больших систем обычно рекомендуется проводить по следующему плану: выделение подсистем; установление связей между выделенными подсистемами; выделение подсистем высшего ранга; установление целей этих подсистем; перенесение целей на подсистемы низшего ранга; изучение взаимоотношений целей; выделение областей параметров, соответствующих каждой цели; отыскание единой цели всей системы; оптимизация системы.

<sup>1</sup> См., например, «Вычислительные машины и мышление». М., 1967; В. М. Глушков. Введение в АСУ.

Могут быть сформулированы и другие последовательности эвристических рекомендаций, также оказывающиеся полезными при изучении больших систем, например: установление общих целей и задач системы; определение вида и объемов входной информации; формирование общей схемы алгоритма обработки информации; выделение функциональных подсистем; информационный анализ подсистем и определение частных алгоритмов переработки информации, реализуемых ими; выделение варьирующих параметров в подсистемах; формулирование условий информационного сопряжения подсистем; оптимизация всей системы в целом.

В обоих случаях рекомендуется лишь определенная последовательность выполнения операций, но ничего не говорится о том, как следует выполнять ту или иную рекомендацию. Здесь в свои права вступают индивидуальный опыт исследователя и конкретные особенности того или иного конкретного класса систем.

Существует иной аспект использования эвристических методов при исследовании больших систем. Как известно, под *эвристическими* исследованиями понимают научное направление, изучающее творческое мышление человека, работу головного мозга в процессе мышления. Поскольку мозг и вообще человек являются большими системами, их исследования могут рассматриваться как специфическая часть теории больших систем.

Исследования показали, что в процессе творческой деятельности в мозге человека формируется «внутренняя модель» внешней среды, непрерывно изменяющаяся и уточняющаяся, на которой он (часто бессознательно) проверяет возможные решения и выбирает рациональные. В работах Д. А. Поспелова и Ю. И. Клыкова принцип построения «внутренней модели» внешнего мира был использован для создания сложных управляющих систем, решающих задачи выбора поведения в условиях некоторого достаточно широкого класса изменяющихся ситуаций. Такие искусственные системы были названы *гироматами*<sup>1</sup>.

**Сетевые методы.** В ряде случаев большие системы изображаются в виде *графов*. Этот метод часто используется в процессе разработки больших систем и получил наимено-

<sup>1</sup> Ю. И. Клыков, Д. А. Поспелов. Создание модели внешнего машинного мира в памяти вычислительной машины. — «Проблемы эвристики». М., 1969; Д. А. Поспелов. Теория гироматов. — «Проблемы бионики». М., 1973. Этот подход часто выделяют из эвристического как лингвистический или семиотический (см. гл. I четвертой части).

вание метода *сетевого планирования и управления* (СПУ). В этом случае модель процесса (или системы) — ориентированный граф, вершины которого соответствуют событиям или целям, а ребрами обозначены работы, необходимые для реализации соответствующего события (достижения цели).

Возможны и другие схематизации систем с помощью графов; так, вершины могут представлять элементы системы (подсистемы), выполняющие определенные функции, например по обработке информации, а ребра — потоки информации и их направления.

Изображение систем в виде графов позволяет использовать формальные методы для их анализа и контроля. Так, наличие циклов дает возможность судить о наличии логических противоречий в структуре системы, ярусно-параллельная форма графа часто оказывается полезной для согласования времен обработки информации в отдельных узлах системы и т. п. Преобразования графов позволяют также сравнивать структуры систем, определяя функциональную и структурную эквивалентность систем, внешне сильно различающихся между собой<sup>1</sup>.

Известен ряд обобщений сетевого подхода, приводящих к различным алгебрам связей между узлами. Примером может служить теория кумулятивных сетей, а также тензорные методы анализа сложных сетей, которые с 30-х годов разрабатывались Г. Кроном<sup>2</sup>.

**Моделирование.** Наиболее распространенным и, пожалуй, наиболее перспективным для исследования больших систем и для выбора способов рационального управления ими является использование с этой целью всех видов моделирования.

Одним из наиболее изящных и удобных его видов является *математическое моделирование*. Здесь свойства элементов системы и связи между ними изображаются математическими соотношениями, допускающими формальный анализ. Основным достоинством математического моделирования является возможность точной оценки сделанных

<sup>1</sup> См. Р. В. Миллер. ПЕРТ — система управления. М., 1965; «Сетевое планирование и управление». М., 1967; С. Сешиу, М. Б. Рид. Линейные графы и электрические цепи. М., 1971; Е. С. Венцель. Исследование операций. М., 1972; Д. А. Поспелов. Введение в теорию вычислительных систем. М., 1972.

<sup>2</sup> См. Г. Крон. Исследование сложных систем по частям — диакоптика. М., 1972. (Методы Крона долгое время были предметом острой дискуссии.)

допущений и упрощений и, следовательно, возможность заранее установить степень точности и область применимости результатов моделирования. В то же время математические модели сложных систем нередко оказываются сами настолько сложными, что их исследование встречает большие затруднения.

Использование средств вычислительной техники иногда позволяет обойти это препятствие, но в ряде случаев возможности даже самых производительных ЭВМ оказываются недостаточными для реализации математической модели в полном объеме.

Для преодоления подобных трудностей Н. П. Бусленко предложил метод агрегирования<sup>1</sup>. Этот метод позволяет осуществлять исследование большой системы (ее математической модели) в несколько этапов. Сначала система представляется в виде совокупности сравнительно самостоятельных агрегатов, выделяемых по специальным формализованным правилам, зависящим от вида систем. Затем каждый агрегат исследуется самостоятельно и в результате заменяется совокупностью обобщенных характеристик. Такие обобщенные характеристики могут предполагать ряд упрощающих допущений. Во многих случаях, например, рассматриваются кусочно-линейные и кусочно-непрерывные агрегаты. Далее строится и анализируется «полная» математическая модель системы, рассматриваемая уже не как совокупность элементов и связей между ними, а как совокупность значительно меньшего числа агрегатов и соответственно меньшего количества связей между ними. Такой многоступенчатый подход к исследованию систем позволяет упростить исследуемые математические модели и сделать их поддающимися машинной реализации.

К методам математического моделирования относятся также *машинные испытания* — испытания средствами ЭВМ. Сложность формально-математического описания больших систем часто делает невозможным получение точных и однозначных зависимостей, выражающих поведение системы в тех или иных условиях воздействия на нее внешней среды. В ряде случаев, когда, например, внешние воздействия имеют случайный характер или когда отдельные элементы системы или ее связей изменяются по случайным

<sup>1</sup> См. Н. П. Бусленко, Моделирование сложных систем; Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, И. Н. Коваленко, Лекции по теории сложных систем.

законам, получение такой однозначной зависимости вообще невозможно. Единственным выходом здесь является многократное испытание математической модели системы, реализованной на ЭВМ, в различных условиях, которые могут изменяться и по случайным законам, с получением средних статистических закономерностей, описывающих функционирование систем. Математический аппарат, который нашел широкое применение в методе машинных испытаний, включает теорию статистических испытаний (метод Монте-Карло), теорию массового обслуживания, теорию эксперимента, методы исследования операций и теории игр. Конкретный выбор аппарата определяется особенностями исследуемых систем и целями моделирования.

Сложность больших систем, многообразие их элементов и связей превращают составление математической модели и ее машинную реализацию (программирование) в сложную и трудоемкую задачу. В то же время многие, часто сильно отличающиеся друг от друга, системы содержат сходные элементы и аналогичные постановки целей и задач исследования. В связи с этим естественно возникла задача унификации и систематизации подходов к математическому моделированию сложных систем. Исследования в этом направлении и интенсивное развитие языков программирования для формализованного описания различных решаемых с помощью ЭВМ задач привели к многочисленным попыткам создания специальных *формальных языков*, которые предназначены для описания отдельных классов больших систем. Получив описание системы на таком языке, его можно реализовать на какой-либо ЭВМ с помощью транслятора; в результате в распоряжении исследователя оказывается математическая модель, которую можно подвергнуть последующему машинному эксперименту.

В настоящее время разработано и успешно используется в упомянутых выше целях много различных языков моделирования. Примерами могут служить языки Симскрипт, Симула, упомянутый выше язык моделирования дискретных ситуационных схем, разработанный Ю. И. Клыковым, и др.<sup>1</sup> По-видимому, можно считать, что работы по созданию

<sup>1</sup> См. Г. Марковиц, Б. Хауснер, Г. Карр. Симскрипт. Алгоритмический язык для моделирования. М., 1966; О. И. Дал, К. Нигард. Симула — язык для программирования и описания систем с дискретными событиями. — «Алгоритмы и алгоритмические языки», вып. 2. М., 1967; «Языки программирования». М., 1972; А. Л. Семенов, Е. Т. Семенова. Программирование. — «Радиоэлектроника в 1970 году», вып. 6.

языков моделирования образуют практически самостоятельное математико-лингвистическое направление в исследованиях больших систем.

Среди методов моделирования, применяющихся для исследования больших систем, заметную роль играют также методы *физического моделирования*.

Выше уже отмечалось, что большие системы часто состоят из элементов различной структуры и природы и для их моделирования могут оказаться полезными различные виды моделирования, применяемые совместно. Это приводит к построению *смешанных*, или *комплексных*, *моделей*, когда одни элементы системы представляются в виде математических моделей, другие — в виде физических моделей или моделей иной природы, а некоторые части заменяются так называемыми реальными объектами. Так, при моделировании сложных человеко-машинных систем управляемый орган часто заменяется математической моделью, органы управления — физической, а в качестве операторов, как и в реальной системе, выступают люди. Комплексные модели из элементов различной природы используются также и при моделировании больших систем социально-экономической природы или глобальных природных явлений.

***Бионический подход и теория самоорганизации.*** Большие и сверхбольшие технические системы, как правило, должны для обеспечения нормального функционирования обладать рядом свойств, до недавнего времени считавшихся присущими только биологическим системам.

Перечислим некоторые из этих свойств. Большие технические системы требуют обычно для своего создания весьма значительного времени, нередко превышающего срок службы их элементов. Этим, в частности, объясняется тот факт, что при разработке первых больших систем часто оказывалось, что ко времени их создания они морально устаревали. Поэтому искусственные большие системы должны обладать способностью *развиваться*, т. е. быть способными к замене устаревших блоков и узлов без перерыва в функционировании. Большие системы должны также обладать *высокой надежностью* и способностью продолжать работу при разрушении части элементов, передавая вре-

М., 1971; А. Л. Семенов, Е. Т. Семенова. Программирование. — «Радиоэлектроника в 1971 году», вып. 6. М., 1972; А. Л. Семенов, Е. Т. Семенова. Программирование. — «Радиоэлектроника в 1972 году», вып. 6. М., 1973.



менно, до их восстановления, соответствующие функции другим элементам.

Способности к развитию и перестройке составляют характерную черту биологических систем и могут быть названы обобщенно способностью к *самоорганизации*. Биологические системы являются также примером сочетания централизации со значительной автономией отдельных органов; они обладают весьма полезным для технических систем свойством адаптации, устойчивости по отношению к внешним воздействиям (гомеостазом), высокой системной надежностью, хотя элементы их часто намного менее надежны, чем соответствующие элементы технических систем.

Эти свойства биологических систем — свойства, реализация которых в больших искусственных системах резко повысила бы эффективность их функционирования, — делают живые системы своеобразными образцами, *прототипами сложных технических систем*. Здесь мы имеем дело с подходом, обратным моделированию. При моделировании изучаются свойства модели для исследования соответствующих свойств оригинала, здесь же биологические системы выступают в виде образцов, оригиналов для создания технических систем, по сути дела воспроизводящих, моделирующих их свойства. Моделирование здесь из метода исследования превращается в необходимое условие для создания эффективно функционирующей системы. Такой *бионический* подход к разработке больших систем позволяет широко использовать опыт природы, накопленный в процессе длительной эволюции.

Несмотря на то что принципы бионического подхода при разработке больших систем в настоящее время играют роль лишь источника методических рекомендаций и имеют эвристический характер, они часто оказываются полезными. Успехи бионических исследований позволяют предполагать, что в не очень далеком будущем они займут достойное место в теории больших систем<sup>1</sup>.

Еще большего можно ожидать от развития *общей теории самоорганизации*, тесно связанной с исследованиями по созданию *искусственной жизни и искусственного разума*.

<sup>1</sup> М. G. Gause-Rapoport. Bionika, nový obor kybernetiky. — «Dva-  
cáté století». Praha, 1963; См. Бир. Кибернетика и управление произ-  
водством, изд. 2. М., 1965; «Бионика». М., 1965; «Проблемы бионики.  
Биологические прототипы и синтетические системы». М., 1965; «Вопросы  
бионики». М., 1967; «Биология и техника». М., 1969; И. Б. Литинецкий.  
На пути к бионике. М., 1972; «Проблемы бионики». М., 1973.

## Глава II

### ПРОБЛЕМА ИЕРАРХИИ

Большим кибернетическим системам, как правило, свойственно ярко выраженное *иерархическое строение*. Мы находим в них четкую последовательность уровней, которым соответствуют различные подсистемы и которые обладают по отношению друг к другу известной самостоятельностью. Представим себе, например, ступенчатую, многоуровневую организацию государства, армии, крупного производства или сложное строение живых существ с их клетками, тканями и органами. Еще Гоббс создал знаменитый образ Левиафана, человека-государства, состоящего из меньших людей; само слово «иерархия» возникло в общественной жизни и первоначально обозначало соподчиненность духовных должностей. Иерархические структуры широко представлены и в технике, особенно в современных автоматических и автоматизированных системах управления.

Иерархический порядок обнаруживается и в неживой природе. В главе I этой части понятие системы было вообще определено через понятие иерархии. Это позволяет говорить о *многоуровневой иерархической организации всей материи*. В кибернетических системах эта иерархическая организация становится *особенно заметной и развитой*, а взаимодействие уровней между собой — особенно интенсивным и важным для функционирования систем.

#### 1. ОБ УРОВНЯХ УПРАВЛЕНИЯ

Существование иерархических структур в обществе, природе, технике известно давно. В «Кибернетике» Н. Винер говорит о иерархической организации сложных систем управления и связи<sup>1</sup>. Однако лишь в наши дни развитие

<sup>1</sup> См. Н. Винер. Кибернетика, изд. 2. М., 1968. В гл. 8, посвященной социальным применениям кибернетики, Винер писал: «Идея организации, элементы которой сами суть малые организации, не является чем-то новым и необычным» (стр. 227).

теории больших систем и общего системного подхода к вопросам управления привело к необходимости разработки теории *иерархических многоуровневых систем*.

Выбор оптимальной, научно обоснованной структуры управляющей системы вырастает в центральную проблему техники больших систем. Сюда входит нахождение числа уровней управления и распределение между ними реализуемых функций или алгоритмов. Вопросы эти стали математически рассматриваться сравнительно недавно и во многом еще остаются неясными. Из-за отсутствия теоретически обоснованных методов проектировщикам управляющих систем поневоле приходится довольствоваться интуитивными решениями или прибегать к аналогии с уже построенными объектами.

Проблему отыскания оптимального числа уровней управления можно понимать как проблему определения оптимального соотношения *централизации и децентрализации*. В такой формулировке она часто обсуждалась экономистами. «Отдельные контуры экономического регулирования, — писали А. И. Берг и Ю. И. Черняк, — не только взаимодействуют между собой, но и могут заменять друг друга. Научная организация управления экономикой сводится к выбору такого сочетания контуров экономического управления, которое наиболее соответствует развитию производительных сил и производственных отношений на современном этапе. Основная проблема заключается в том, чтобы найти наилучшее соотношение централизованных непосредственных методов административного управления с децентрализованными... В настоящее время такая настройка осуществляется на ощупь на основе экспериментов и накопленного опыта»<sup>1</sup>.

Первые успехи кибернетики, и в частности теории информации, вселили во многих уверенность в успешном решении этих сложных вопросов на основе существующего аппарата. Нередко, например, можно было встретить такие оптимистические заявления: «... применение современных методов математики и кибернетики, несомненно, позволит точно определить для любых высокоорганизованных систем и для каждой функции оптимальные сочетания централизации управления и повышения относительной независимости, автономности частей»<sup>2</sup>. Постепенно, однако, росло понима-

<sup>1</sup> См. А. И. Берг, Ю. И. Черняк. Информация и управление. М., 1966, стр. 41, 43.

<sup>2</sup> М. Ф. Веденов, В. И. Кремянский. Специфика биологических структур. — «Структура и формы материи». М., 1967, стр. 634.

ние трудности и своеобразие проблемы. Например, А. Г. Бутковский, поставив вопрос, «почему же иерархическая структура большой системы является ее существенной и, наверное, неотъемлемой особенностью», приходит к заключению, что наука пока может высказать здесь лишь более или менее правдоподобные предположения. Что же касается возможностей современных методов математики и кибернетики для определения оптимального соотношения централизации и децентрализации в структурах систем, то, «по-видимому, бессмысленно пытаться решать эту проблему в лоб, на основе прямого применения существующих сейчас методов оптимизации»<sup>1</sup>.

И действительно, мы еще не располагаем эффективным методом, который позволял бы однозначно определять (если это вообще возможно) число уровней управления и распределение потоков информации между ними при синтезе больших систем. Это обстоятельство отмечается многими авторами<sup>2</sup>. Даже в математически наиболее развитой теории М. Месаровича и его коллег конструктивные решения получаются лишь для более простых структур. «Сама по себе рассматриваемая авторами теория, — пишет об этом подходе Г. С. Поспелов, — еще далека от завершения, и о возможности непосредственного практического применения достигнутых результатов говорить пока еще рано»<sup>3</sup>.

Указанные трудности имеют не только технический, но в значительной мере и *принципиальный, методологический характер*, свидетельствуя о недостаточно удачном выборе исходных понятий. В результате применения *чрезмерно абстрактного, обедненного понятия* сложной системы для выведения закономерностей иерархического членения систем и их структурообразования вообще исходная модель оказывается неоправданно упрощенной.

В этой ситуации можно было бы попытаться определить более адекватное объекту понятие сложной системы, построить на его основании модель и из этой модели вывести закономерности делимости систем и строения структур из

<sup>1</sup> А. Г. Бутковский. Что такое оптимальное управление. М., 1966, стр. 44.

<sup>2</sup> См., например, А. И. Кухтенко. О теории сложных систем с иерархической структурой управления. — «Сложные системы управления». Киев, 1966; В. А. Ильин. Большие системы телемеханики. М., 1967.

<sup>3</sup> Г. С. Поспелов. Предисловие к русскому изданию; М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. Теория иерархических многоуровневых систем, стр. 10.

элементов. Но умозрительное определение такого понятия имеет пока мало шансов на успех. Дедукция и здесь должна быть подготовлена индукцией, и прежде всего *наблюдением на объектах, являющихся прототипами понятий*<sup>1</sup>. В этом отношении большой интерес представляет *бионический подход*, тесно связанный с теорией самоорганизующихся систем.

## 2. ПОТОКИ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИИ И КАЧЕСТВЕННАЯ РАЗНОРОДНОСТЬ ЧАСТЕЙ

При первых подходах к проблеме иерархии была выдвинута гипотеза, согласно которой число ступеней управления зависит от соотношения между *мощностью потока информации, которую необходимо обработать, и пропускной способностью обрабатывающих информацию элементов*. Если управляющий элемент способен обработать образующуюся в системе информацию, то в использовании других элементов, в создании дополнительных ступеней управления не возникает надобности<sup>2</sup>.

Практическая реализация этого подхода показала, что он не всегда обеспечивает удовлетворительные результаты. При создании автоматических систем управления с одним управляющим органом обнаружили существенные изъяны соответствующей методики. «... Попытки заменить первичные регуляторы в системах управления производством одной центральной управляющей и достаточно производительной (по объему перерабатываемой информации) вычислительной машиной обычно кончаются неудачей»<sup>3</sup>, — констатировал в 1966 г. А. И. Кухтенко.

В последнее время проблема определения необходимого числа иерархических уровней при проектировании управляющих систем исследуется в теоретической кибернетике весьма активно. Так, разработаны методы расчета числа уровней управления исходя из заданных потерь от ненадежности аппаратуры местной автоматики и централизо-

<sup>1</sup> См. В. Л. Хартон. Исследование факторов, определяющих иерархичность структур в сложных системах управления. — «Автоматизированные системы управления». Минск, 1969.

<sup>2</sup> См. А. Г. Бутковский. Что такое оптимальное управление; А. Я. Радченко. Общие аспекты управления промышленным производством. — «Проблемы научной организации управления социалистической промышленностью». Материалы Всесоюзной научно-технической конференции, сек. 1. М., 1966.

<sup>3</sup> А. И. Кухтенко. О теории сложных систем с иерархической структурой управления. — «Сложные системы управления», стр. 6—7.

ванной системы управления, выбора и расчета числа уровней по критерию полных затрат и др.<sup>1</sup> Предложены игровые подходы к построению иерархических систем управления<sup>2</sup>. Ю. Н. Павловским исследована возможность строгого подхода к агрегированию и построению иерархических управляющих структур для сложных систем. Обращаясь к вопросу об определении числа уровней в проектируемых системах, он пишет: «На практике выбор конкретной иерархической системы должен, по-видимому, определяться из «физических» соображений, лежащих «за пределами» описания ... самого управляемого процесса. Поэтому формальная постановка задачи о выборе иерархической системы управления в терминах только описания процесса затруднительна»<sup>3</sup>.

Таким образом, мы приходим к необходимости учета *содержательных характеристик* управляемых систем. Именно с этой точки зрения следует анализировать принципы существующих подходов к проблеме иерархии, в частности попытаться оценить обоснованность, «вес» исходных предпосылок и конечных выводов каждого из подходов.

Гипотеза о том, что причиной иерархичности структур управляющих систем является несоответствие объема потока информации в системе пропускной способности управляющих элементов, основана на определенной информационной модели управления. Эта модель проверена практикой проектирования и использования простых, однопараметрических систем управления. Сущность ее заключается в том, что управление рассматривается как *обработка потока информации*, носящего, так сказать, *однокачественный, бесструктурный* характер. Этот поток разветвляется лишь в силу «внешней» необходимости, в силу ограниченных возможностей управляющих элементов. При проектировании сложных управляющих систем это распределение потока информации между управляющими элементами связано с *выделением подсистем, или декомпозицией систем*.

<sup>1</sup> См. Г. А. Шастова, А. И. Коекин. Выбор и оптимизация структуры информационных систем. М., 1972.

<sup>2</sup> См. Ю. Б. Гермейер, Н. Н. Моисеев. Игровые подходы к построению иерархических систем управления. — «Проблемы прикладной математики и механики». М., 1971.

<sup>3</sup> Ю. Н. Павловский. К вопросу об агрегировании и построении иерархических управляющих структур для одного класса сложных систем. — «Журнал вычислительной математики и математической физики», 1971, т. 11, № 6, стр. 1519.

Поскольку в теоретическом плане современное понятие сложной системы близко к понятию *органического целого*, проблему декомпозиции системы целесообразно трактовать в плане отношений *части и целого*. Этот вопрос, как показывает анализ, является коренным в выявлении природы иерархичности.

Прежде всего рассмотрим взаимосвязь иерархичности с централизацией и децентрализацией. Многочисленные контуры в системе управляют элементарными параметрами. В свою очередь они управляются по группам. Каждой группой управляет один контур. Контуры укрупняются до такой степени, когда на вершине структуры остается один орган, координирующий все параметры. Органы, управляющие элементарными параметрами, образуют одну ступень иерархии. Органы, управляющие укрупненными параметрами и задающие параметры управления первым, образуют следующую ступень. Каждый управляющий орган с контуром управления и управляемыми параметрами образует подсистему.

Распределение «полномочий» по управлению процессами целостной системы между подсистемами воплощает тенденцию *децентрализации*. Замыкание всех контуров управления на единый орган, т. е. сосредоточение прав по принятию любых решений в едином центре, воплощает противоположную тенденцию — *централизации*. Правила выделения элементарных подсистем и правила их группирования в подсистемах более высокого уровня определяют число уровней в управляющих системах.

Основой для выделения элементарных подсистем должен служить общий подход к разделению структуры целого на элементы. Целое с целью выделения элементов мысленно делится лишь до таких наиболее простых элементарных образований, которые сохраняют подчиненность *общим закономерностям* функционирования данного целого<sup>1</sup>. В условиях систем управления это — элементарные подсистемы, задающие изменения параметров управляемого объекта; объединение элементарных подсистем в звенья дает подсистемы низшего уровня.

В больших системах децентрализация и централизация всегда взаимосвязаны: ни одна из тенденций не может полностью исключить другую. Абсолютная децентрализация,

<sup>1</sup> См. В. Г. Афанасьев. Проблема целостности в философии и биологии. М., 1964.

т. е. представление частям системы самостоятельности в управлении изменениями любой переменной, превращает систему в скопление ничем не связанных элементов. Абсолютная же централизация, сосредоточение управления в едином центре, предполагает образование неделимого однородного целого, что исключает сохранение большой системы в общепринятом понимании. Большая, или сложная, система как объект познания отличается от простой системы наличием *выделенных подсистем, частей, качественно неоднородных*.

В некоторых теоретических направлениях кибернетики выработаны определенные подходы к проблеме декомпозиции систем, порой ведущие к различным результатам. Приняв за исходную модель системы граф конечных преобразований, У. Р. Эшби показал, что выделение частей в системе зависит от точки зрения наблюдателя. Ст. Бир, исходя из понятия системы как комплекса взаимосвязанных процессов, склонился к противоположной точке зрения<sup>1</sup>. В книге М. Месаровича, Д. Мако и И. Такахара проблема декомпозиции рассматривается как координация подсистем, подгонка их поведения друг к другу в процессе автономной работы. «Под декомпозицией мы понимаем решение следующей проблемы. Дана глобальная задача; найти задачи, которые могли бы быть поставлены перед вышестоящим и нижестоящим решающими элементами так, чтобы выполнялся постулат совместимости... Проблема декомпозиции сводится к трем... проблемам, а именно к проблеме синтеза координирующего элемента, к проблеме модификации и к отысканию самой процедуры координации. В самом деле, имеется много способов разложить данную глобальную задачу на подзадачи. Реальная трудность, однако, заключается в том, как их скоординировать; это прежде всего требует выбора принципа координации (т. е. задачи, которая будет поставлена на вышестоящем уровне), затем модификации подзадач и, наконец, разработки метода отыскания координирующего их сигнала»<sup>2</sup>.

Координация предполагает самоорганизацию, связанную с модификацией алгоритмов и правил поведения, и управление, относящееся к выбору координирующего вме-

<sup>1</sup> См. У. Р. Эшби. Принципы самоорганизации. — «Принципы самоорганизации», стр. 320; Ст. Бир. Кибернетика и управление производством, стр. 304.

<sup>2</sup> М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. Теория иерархических многоуровневых систем, стр. 133.



шательства при фиксированных правилах. Сущность координации состоит в таком распределении усилий между элементами различных уровней, при котором эти элементы, следуя каждый своим собственным целям (и, быть может, вступая при этом в конфликты), обеспечивали бы вместе с тем решение глобальной задачи.

Месарович, Мако и Такахага стремятся создать математический аппарат для такого подхода, исходя из абстрактного понимания системы как отношения между входами и выходами  $S \subset X \times Y$ , где  $S$  — отношение,  $X$  — множество возможных входов (т. е. входных сигналов),  $Y$  — множество возможных выходов (выходных сигналов),  $X \times Y$  означает декартово произведение этих множеств. Однако авторы ограничиваются двухуровневыми системами и решают задачи координации и декомпозиции при помощи видоизмененных приемов динамического программирования. В качестве общих принципов координации рассматриваются принципы прогнозирования, согласования и оценки взаимодействий.

Для правильной оценки различных теоретических подходов к декомпозиции хорошо представить себе реальное содержание проблемы, как оно выступает в проектной практике, реальный практический смысл введения иерархии в систему.

Прототипами теоретического, идеального объекта — *большой системы* — являются промышленное предприятие, организм, общественное производство. Те же реальные объекты являются прототипами понятия «органического целого» («органической системы») по К. Марксу<sup>1</sup>. И большая система, и органическое целое в функциональном плане представляют собой комплекс взаимосвязанных процессов. Управление обеспечивает единство, целостность динамических объектов, характеризующихся как сложные совокупности процессов или органические целостные системы. Но единство управления как единство цели, единство реагирования может быть достигнуто только в том случае, если объект, выделенный как целое из окружающей среды, управляется *единым органом*. Как указывал В. И. Ленин, имея в виду управление производством, «*беспрекословное подчинение* единой воле для успеха процессов работы, организованной по типу крупной машинной индустрии, безусловно необходимо»<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> См. К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. 46, ч. 1, стр. 229.

<sup>2</sup> В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 36, стр. 200.

Если целое разделено на относительно автономные части, то для обеспечения его существования необходим единый орган управления, подчиняющий органы управления выделенных частей, управляющий ими, координирующий их деятельность. Возьмем простейший случай: целое представляет собой совокупность двух взаимосвязанных процессов. Так как процессы относительно выделены, различны и каждый из них имеет свои параметры и границы их изменения, оба процесса обычно управляются разными алгоритмами. Но поскольку из условий существования целого необходимо координировать течение обоих процессов, необходим алгоритм, управляющий обоими частными алгоритмами управления. Таким образом, признание объективной необходимости выделения частей органического целого (подсистем сложной системы) приводит к признанию *объективной необходимости ступенчатости, иерархии управления*.

Вернемся теперь к гипотезе о зависимости числа уровней управления только от соотношения количества перерабатываемой информации и мощностей управляющих элементов. На чем основан вывод об отсутствии каких-либо других объективных предпосылок декомпозиции (кроме чисто количественно-информационных) — вывод о *произвольности* деления целого на части? По нашему мнению, главным образом на том, что все протекающие в сложных системах процессы, элементы и их связи считается возможным признать *однородными*, как это часто делается при рассмотрении *простых* систем.

Если бы элементы действительно были однородными, мы не совершали бы никакой ошибки, произвольно объединяя их в части и разделяя в пределах совокупности. В действительности это не так. Сложная система представляет собой *единство разнообразного*, а не *сумму однообразного*.

Известно, что функциональные элементы любых объектов, интерпретируемых как большие системы или как органические целые, выделялись в структуре именно путем дифференциации функций, специализации. Одновременно с дифференциацией частей происходило усиление связей и зависимостей между частями. Но связи между разными частями и функциями не могут быть одинаковыми. Разнообразие форм и видов связей между выделившимися частями организма является бесспорным фактом в биологии. Так, например, И. И. Шмальгаузен классифицирует виды корре-

лятивного взаимодействия частей организма<sup>1</sup>. Следовательно, пытаясь экстраполировать вывод Эшби о произвольности выделения подсистем в системе (полученный на модели простой системы) на сложные системы, мы совершили бы методологическую ошибку.

В системах типа органического целого, т. е. и в организмах, и в производственных системах, определяющим является *разнокачественность частей*. А поскольку части различны и объективно выделены в целом, различны и их взаимосвязи между собой; стало быть, и управление, направленное на координацию взаимодействий частей, должно строиться на основе существующих разнохарактерных связей, отражать эти связи и их разнохарактерность. Выражением последней является разнообразие алгоритмов управления и различная степень их взаимодействия. В свое время Эшби сформулировал *закон необходимого разнообразия*, гласящий, что разнообразие сложной системы требует управления, которое само обладает необходимым разнообразием<sup>2</sup>. Мы можем принять здесь этот принцип, но с упором на разнообразие не только поступающей по различным каналам информации, но и алгоритмов для ее обработки.

Подход М. Месаровича и его коллег кажется с этой точки зрения относительно реалистическим, полнее учитывающим сложную природу проблемы иерархичности, хотя вопрос о границах эффективного применения предложенного ими формального аппарата остается пока открытым.

### 3. ОБЪЕКТИВНЫЕ ОСНОВЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ

Разработчик систем не может довольствоваться общим предложением стремиться к объективной декомпозиции систем с учетом разнокачественности их компонентов и необходимых для управления этими компонентами алгоритмов. Он нуждается в *теоретических принципах* такого учета, в *общей сравнительной морфологии сложных систем*, в *законах правильного, пропорционального развития частей*. Такая морфология только зарождается, идет поиск возможных

<sup>1</sup> См. И. И. Шмальгаузен. Значение корреляции в эволюции животных. — «Памяти академика А. Н. Северцова», т. 1. М.—Л., 1939.

<sup>2</sup> См. У. Р. Эшби. Введение в кибернетику.

путей ее создания. По существу речь идет еще об одном аспекте проблемы *самоорганизации*.

Как уже указывалось выше, большой интерес в этом отношении представляет бионический подход. Изучение закономерностей делимости и строения систем удобно вести на *биологических объектах*. По общему признанию, процессы управления в этих системах достигли высокого совершенства. Кроме того, при изучении биологических систем накоплен громадный фактический материал, в частности касающийся процессов формообразования в живых организмах.

Исследования по исторической морфологии животных (особенно их нервной системы) могут быть использованы в качестве эмпирической базы для исследования закономерностей структурообразования сложных управляющих систем. Г. П. Шубиной принадлежит попытка объяснить иерархичность управления в организмах на основании материалов исторической морфологии животных. «В историческом развитии организм как целое, как система с подчинением органов развивался одновременно с обособлением частей. Этим и объясняется «многоэтажное» построение регуляторного аппарата в работе внутренних органов»<sup>1</sup>.

Это объяснение хорошо согласуется с естественнонаучными данными. Но описание процесса возникновения еще не дает знания закономерностей и факторов, определяющих явление. Знание истории возникновения не позволяет воспроизвести процесс в новых условиях, неизвестна внутренняя взаимосвязь этих факторов. В частности, из признания того, что структура систем иерархична в силу историчности процесса ее становления, нельзя вывести исходные принципы построения, конструирования, синтеза систем. Из признания этого факта нельзя также извлечь заключение о «правиле», какими должны быть в каждом конкретном случае системы управления — многоступенчатыми или одноступенчатыми. Известно, что не все складывающиеся в ходе развития структуры организма являются целесообразными. Не есть ли многоступенчатость нервной системы лишь рудимент, остаток прежнего нерационального решения?

<sup>1</sup> Г. П. Шубина. Методологическая роль категорий целого и части в решении проблемы целостности организма. — «Методологические проблемы современной науки». М., 1964, стр. 163.

Необходимо выяснить *причинный механизм явления*, на основе которого можно было бы построить модельные представления о процессах становления многоступенчатых структур. Адекватность этих модельных представлений отображаемым явлениям необходимо затем проверить на фактическом материале.

Любое органическое целое появляется в процессе исторического развития: в ходе эволюции сложные системы проходят последовательные этапы усложнения и дифференциации. «Прогрессирующая дифференциация означает возрастание разнородности частей системы; но в то же время развитие органического целого характеризуется противоположным по форме процессом интеграции, т. е. усилением связей и зависимостей между частями и тем самым повышением уровня целостности системы»<sup>1</sup>.

М. И. Сетров подчеркивает процессуальный характер организации живых систем, растущую полноту функционального использования их свойств и структур. «Организацией является только такая совокупность явлений, в которой свойства последних проявляются как функции сохранения этой совокупности и выполнения основной функции в целостности более высокого порядка. Степень же организованности системы зависит от степени актуализации функций ее элементов, выражающейся в полноте «использования» возможных связей или отношений между элементами системы одного уровня»<sup>2</sup>.

Процесс развития органического целого характеризуется появлением *новых связей* между наличными элементами, а также возникновением *новых элементов*. Поскольку функции новых элементов образуются в основном путем выделения из функций ранее существовавших элементов, совокупность вновь образованных функций является детализацией одной из имеющихся. Поэтому аппарат управления каждой вновь образованной функцией обычно оказывается подчиненным аппарату управления некоторой ранее существовавшей функцией.

Но для решения проблемы структурообразования существенна не столько *историческая преемственность*, сколько *разная степень взаимозависимости* одного процесса от другого, различие в плотности корреляционных связей между

<sup>1</sup> И. В. Блауберг. Проблема целостности в марксистской философии. М., 1963, стр. 65—66.

<sup>2</sup> М. И. Сетров. Организация биосистем. Методологический очерк принципов организации живых систем, стр. 137—138.

функциями, выделявшимися из одной общей, им предшествовавшей.

По каким же закономерностям должны выделяться и объединяться подсистемы больших систем искусственного происхождения, *не имеющих истории?*

Специализация, деление материальных функций органического целого имеют объективный характер. Дифференциация функций и специализация частей — важнейшая форма прогрессивного развития. Каждая выделившаяся в результате этого процесса элементарная функция в силу вероятностной изменчивости среды должна быть объектом управления. Поскольку управляемая функция *специфична и относительно выделена*, управление также должно быть относительно специфично и автономно, т. е. каждый управляемый параметр (или небольшая группа близких параметров) управляется собственным контуром по определенному алгоритму.

Выделение элементарных контуров управления происходит в соответствии с особенностями контролируемых функций. Но в рамках единого целого как первое условие его существования должно быть обеспечено *единство* функционирования — координации функций. Возникает своего рода противоречие, которое разрешается следующим образом. *Наиболее тесно взаимосвязанные, наиболее взаимокоррелирующие* функции оказываются соподчиненными *одному управляющему центру*. Менее тесно связанные функции могут иметь *более опосредствованную* связь на уровне более крупных подсистем или подчиненности более высокого порядка. Происходит «укрупнение» функций, и необходимая для существования целого степень координации достигается их соподчинением одному центру через некоторое число ступеней иерархии.

Эта схема порождения подсистем структуры соответствующими элементарными функциями не нуждается в представлении о постепенности дифференциации функций, в прослеживании генезиса каждой элементарной функции. Исходным для описанного выше причинного механизма структурообразования и иерархизации моментом является функциональная взаимосвязь элементарных специализированных процессов в больших системах. Процесс  $P$  может «сильно» влиять на процессы  $Q$  и  $R$  и быть достаточно безразличным для процессов  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

Однако сказанное об источнике иерархической структурности касается простых случаев. Для пояснения более

сложных случаев полезно привлечь соображения Месаровича, Мако и Такахары. Они различают управляющие системы трех типов: *одноуровневые одноцелевые, одноуровневые многоцелевые и многоуровневые многоцелевые*. В случае одноуровневых одноцелевых систем цель определяется для всей системы и все переменные выбираются так, чтобы обеспечить достижение этой цели. Современная теория систем автоматического регулирования имеет дело с одноуровневыми одноцелевыми системами. Такие системы могут быть и многопараметрическими, и довольно сложными. К тому же цель может быть многомерной и может возникать необходимость в оптимизации и прогнозировании. Однако отличительной особенностью таких систем является *отсутствие конфликтов* внутри системы.

«Количественно-информационный» подход к разработке систем в технике пригоден именно для однопараметрических одноцелевых систем. Изложенные же выше соображения о механизме образования иерархий касаются многоуровневых одноцелевых систем. «Единство функционирования», о котором шла речь, — это по сути дела подчинение поведения единой цели (заданной системе извне или в ней самой вырабатываемой).

Но «единство функционирования» может быть существенно сложнее уже в одноуровневых многоцелевых системах, которые состоят из элементов *со своими собственными целями*, быть может конфликтными. Системы, которые исследуются средствами современной теории игр (см гл. II первой части), как раз такого рода. Что касается теории многоуровневых (иерархических) многоцелевых систем, то в настоящее время она только создается.

Теперь можно дать общую картину действия факторов, приводящих к многоступенчатости сложных систем. Изменчивость и разнообразие условий существования требуют от развивающегося органического целого разнообразия специализированных функций. Разнообразие функций как разнообразие внутренней среды в силу принципа необходимого разнообразия (Эшби) требует разнообразия и управления, т. е. различных механизмов (алгоритмов в случае технических систем) управления, выделенных контуров управления и т. д. Но коль скоро разнообразие функций управления не может быть реализовано в *едином бесструктурном* органе (ибо условием прогресса является специализация, разделение труда, в том числе и в управлении), то и процесс управления *распределяется между частями струк-*

туры, сообразно специфике реализуемых механизмов или алгоритмов, или (более обще) специфике управляемых материальных процессов. А поскольку условием существования целого является *единство реагирования*, или (применительно к управлению в одноцелевых системах) *единство цели*, то каждой группой «равноправных» специфических механизмов (в частности, алгоритмов) управления должен управлять координирующий орган. Укрупнение идет до формирования *единого управляющего блока (алгоритма) системы*.

Таким образом, функции группируются, укрупняются до тех пор, пока над все более укрупняющимися функциями целого не образуется единой функции управления, координирующей все подчиненные и осуществляющей единство реагирования в пределах всей большой системы. Такова картина в отношении систем, *не содержащих конфликтов*, где подсистемы не наделены функциями принятия решения.

В многоцелевых системах ситуация усложняется и возникают новые мощные факторы, стимулирующие иерархическое структурообразование. Выделение подсистем управления здесь тем более определяется не только ограничениями *количества информации*, которое могут обрабатывать управляющие устройства, или *количеством элементов* управляемой системы. Существует также ограничение, связанное с необходимостью *разрешения конфликтных ситуаций* между подсистемами, обладающими известной «свободой действий». Границы последней лишь в случае одноуровневых многоцелевых систем допускают непосредственное замыкание на единый орган управления всей системой; обычно же возникает необходимость ряда слоев (уровней, эшелонов) координаций. Таким образом, иерархичность управления существенно необходима для реализации «феномена автономии», когда верхние уровни контролируют целенаправленное поведение нижних, которым тем не менее предоставляется известная свобода в выборе поведения.

В создаваемых человеком технических системах автономная работа нижних уровней позволяет экономить затрачиваемые ресурсы. Можно показать, что для эффективного использования многоуровневой структуры необходима некоторая *автономия элементов нижних уровней*. «Единство функционирования» в многоуровневой системе возникает в результате сложного информационного взаимодействия управляющих механизмов промежуточных уровней — «ко-



ординаторов». «Каждый элемент имеет собственную цель, которая зависит от координирующего параметра, получаемого от координатора. Координатор имеет цель, отличную от глобальной цели, и выбирает координирующий параметр так, чтобы обеспечить выполнение своей собственной цели. Если зависимость между этими целями закономерна, система может достигнуть глобальной цели. С позиций внешнего наблюдателя вполне уместно считать, что система преследует некую глобальную цель, хотя попытки найти в системе элемент, задача которого состояла бы в достижении именно этой цели, обречены на провал»<sup>1</sup>. Интегральное поведение системы определяется действиями координирующих блоков управления, каждый из которых имеет собственную цель и структуру связей между целями.

Итак, можно считать, что в каждой сложной системе существует некоторое объективно обусловленное соотношение централизации и децентрализации (автономии), определяемое структурой взаимных связей элементов управляемого сложного процесса или системы, в случае многоцелевых систем, взаимодействием целей автономных и координирующих подсистем и элементов. Возможность преобразования подлинно больших иерархических систем в функционально эквивалентные им простые, одноуровневые системы благодаря применению управляющих устройств с произвольным быстродействием, памятью и т. д. есть возможность чисто абстрактная. Минимальное число уровней управляющей системы определяется разнообразием механизмов (алгоритмов) управления, разной степенью их взаимосвязи, разпокаченностью параметров и частей управляемого объекта, автономностью звеньев управляющей системы, возможными конфликтами между ними и т. д. Число уровней может быть увеличено при недостаточной пропускной способности управляющих органов, т. е. из чисто «количественных» соображений, но (во всяком случае для больших систем) не может быть уменьшено сверх некоторой границы, определяемой «природой» системы.

При конструировании современных технических систем типа АСУ — по крайней мере тогда, когда отвлекаются от социально-психологических факторов и сводят к минимуму феномен «свободы действий» подчиненных уровней иерар-

<sup>1</sup> М. Месарович, Д. Мако, И. Такахага. Теория иерархических многоуровневых систем, стр. 51—52.

хии, — имеют дело с иерархическими одноцелевыми системами. Уже здесь приходится решать сложные вопросы о целесообразном распределении функций между частями управляющей системы, о соподчинении частей для обеспечения единства функционирования объекта<sup>1</sup>. Еще более трудными являются проблемы формализации многоцелевых систем, каковыми представляются весьма многие системы, в которых существен «человеческий фактор». Во всех случаях, однако, очевидно, что эффективная реализация принципа иерархичности требует разработки соответствующего понятийного и формального аппарата. Такой аппарат постепенно создается и уже находит практические приложения<sup>2</sup>. Важно иметь, однако, ясное понимание принципов, которые кладутся в его основу, и надежные критерии для оценки предлагаемых решений.

<sup>1</sup> В. Л. Хартон, Б. А. Соболев. Системы управления предприятиями машиностроения с применением вычислительной техники. М., 1966; В. Л. Хартон. Иерархичность структур сложных систем управления и проблема целостности в кибернетике (вопросы методологии исследования). — «Методологические проблемы кибернетики». Материалы к конференции, т. 2. М., 1970.

<sup>2</sup> См. В. Т. Кулик. Алгоритмизация объектов управления. Киев, 1968; М. Мангейм. Иерархические структуры. Модель процессов проектирования и планирования. М., 1970; Б. С. Флейшман. Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем; Б. Б. Тимофеев. Алгоритмизация в автоматизированных системах управления. Киев, 1972.

### Глава III

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЛЕКТИВОВ

Важным частным случаем систем являются «коллективы» живых организмов (особенно животных, людей). Коллективы обладают всеми признаками кибернетических систем. Это динамические системы, связанные с внешней средой — физической средой обитания и другими коллективами, обладающие «управляющей» и «исполнительной» частями, обратными связями и использующие информацию для управления. Входящий в коллектив элемент (животное, человек) является (с точки зрения абстракций, принятых в науке об управлении и переработке информации) в свою очередь кибернетической системой, т. е. образуется достаточно сложная иерархия уровней. В результате коллектив — во всяком случае более или менее «обширный» — есть *сложная (большая)* или даже *сверхбольшая* система.

Более тонкий анализ показывает, что коллективы, особенно человеческие, могут быть различной («переменной») сложности вплоть до ультрасложных с признаками парадоксальности (ср. гл. IV).

Коллективы представляют собой весьма удобный объект системного исследования: они могут рассматриваться на различных уровнях абстракции. При этом в любом случае получаются заключения, представляющие интерес как с системно-кибернетической точки зрения, так и сами по себе. В частности, на коллективах может отрабатываться эффективный математический аппарат «системного анализа».

Социологические исследования позволили установить интересную закономерность массовых коммуникаций, согласно которой в обществе резко возрастает «ценностный статус» сообщения, если в сообщении в той или иной форме затрагивается человек, человеческий фактор<sup>1</sup>. Это оправдывает особое внимание к исследованию человеческих коллективов, которым в основном и будет посвящена данная глава.

<sup>1</sup> См. А. Моль. Социодинамика культуры.

## 1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД И ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛЕКТИВОВ

Изучение с помощью современных формализованных методов строения больших систем, возникающих в сообществах живых организмов и человеческом обществе, — одна из наиболее трудных и волнующих задач общей теории систем. Исследования коллективов особенно нуждаются в сочетании комплексного, системного подхода с применением математико-кибернетических идей и средств. Здесь особенно вредны упрощения, из-за которых может быть утеряна конкретная специфика изучаемых образований. Всякого рода физико-кибернетические аналогии при всей их прагматической и эвристической полезности должны применяться в этой области особенно корректно и ни в коем случае не абсолютизироваться. Самое опасное в данном случае — это принять частные предпосылки, закладываемые в конкретную модель, за обязательные аксиомы. Ведь известно, что целый ряд методологических предпосылок или представлений, например о космосе, которые принимаются почти как очевидные при исследовании физических процессов в неживых системах, должны подвергаться тщательному пересмотру при исследовании живых организмов и их коллективов<sup>1</sup>.

Для системного подхода, как мы видели, характерно многоуровневое, многоаспектное представление о живых системах. При этом формализованное описание явлений одного уровня сочетается с диалектическим анализом взаимодействий и отношений этого уровня с остальными. Расчленение системы на формально выделяемые элементы сочетается с учетом целостных свойств организма, коллектива, «органического целого».

Живые системы, биоценозы, человеческие общества — это «организмы» с настолько сложной структурой, что сама возможность их объективного описания нетривиальна. Однако это еще не основание для отказа от признания правомерности точного (математического) описания подобных структур. Дать такое описание — значит научиться создавать более или менее адекватные теории био- и социальных структур и оценивать пределы применимости соответствующей

<sup>1</sup> Подробнее об этом см.: Ю. А. Шрейдер. Сложные системы и космологические представления. — «Системные исследования». Ежегодник. М., 1975.

щих теорий. Вопрос о том, на каких принципах допустимо строить эти теории, правомерен ли здесь детерминистский подход или соответствующие модели должны быть принципиально недетерминированными (размытыми), какие характеристики могут быть учтены в этих теориях, — все это уже относится к другой области исследования.

Научная ценность моделирования социальных явлений не должна зависеть от того, на каком уровне абстракции мы к ним подходим: представляем ли человеческие коллективы в виде разросшихся автоматов (либо системы автоматов) или же стремимся в полной мере учесть их качественные особенности<sup>1</sup>. Ведь точное описание не дискредитируется, если его нельзя применить непосредственно для оптимизации социальной структуры, а приходится ограничиваться объективной регистрацией и осмысливанием фактической ситуации, реально существующих отношений. К тому же развитая научная теория описывает не только реально наблюдаемые явления, но и теоретически возможные.

Модель социальной структуры (пусть даже самой частной) должна помогать прежде всего выяснению того, по каким правилам эта структура функционирует, чем определяется и ограничивается ее функционирование и за счет чего вообще она может функционировать. Вопрос об оптимальных способах управления и преобразования этих структур возникает на следующем этапе модельного исследования.

Изучение моделей, объективно описывающих социальные структуры (например, структуру взаимоотношений внутри научных коллективов), может оказать влияние на развитие этих структур.

Воздействие на коллектив оказывают и самые, казалось бы, незначительные факторы, порой просто мнения исследователей коллективов. Так, отчетливое выявление Д. Прайсом<sup>2</sup> роли так называемых невидимых коллективов (т. е. совместно работающих групп ученых, не связанных официальными отношениями) позволяет отказываться от стремления при организации исследований по какой-либо теме непременно собирать под одной крышей всех участников работы, облегчая научные контакты между разрозненными группами.

<sup>1</sup> В связи с вопросом о качественном отличии человеческого сознания от «машинного интеллекта» ср. Ю. А. Шрейдер. Присущ ли машинам разум? — «Вопросы философии», 1975, № 2.

<sup>2</sup> См. Д. Прайс. Малая наука, большая наука. — «Наука о науке».

Модели социальных структур, учитывающие чисто экономические отношения, имеют интегральный характер, описывают взаимодействия очень крупных социальных групп. Это обусловлено необходимостью статистически усреднить влияние разнообразных внеэкономических факторов<sup>1</sup>.

Нередко в этих математико-кибернетических моделях экономики приходится принимать во внимание информационные характеристики<sup>2</sup>. Например, на стоимости товара может существенно сказаться наличие или отсутствие необходимой научно-технической информации: становится выгодно финансировать поисковые научно-исследовательские работы или просто покупать лицензии<sup>3</sup>.

Если перейти к моделям более частных структур (достаточно крупных, чтобы говорить о моделировании коллектива, но не настолько, чтобы вопросами тонкой структуры коллектива и взаимодействия подколлективов можно было пренебречь), то здесь изучение информационных связей между элементами приобретает уже решающий характер. Например, модель, описывающая структуру научных коллективов, должна отражать их информационные характеристики. Действительно, оценка деятельности такого коллектива по непосредственно приносимому экономическому эффекту далеко не проста и не всегда является оценкой собственно научного коллектива. Экономический эффект связан с объемом затрат в той отрасли хозяйства, с которой непосредственно связан этот коллектив. Вместе с тем объективная научная ценность результатов данного коллектива вполне может быть оценена компетентным составом ученых. Плодотворность научной работы стимулирует его связи с другими коллективами, оказывает решающее воздействие на изменение общей структуры научных связей. Существенным фактором в структуре научных коллективов является наличие групп или отдельных личностей, влияющих на оценку значимости работ. В результате возникают своеобразные узлы, вокруг которых концентрируются научные связи.

<sup>1</sup> R. Stone. Mathematics in the Social Science and Other Essays London, 1966.

<sup>2</sup> J. A. Szrejder. Informacja a wartości materialne. — «Informacja a Dokumentacja», 1966, N 4.

<sup>3</sup> Таким образом, уже в интегральных моделях экономики нельзя ограничиться чисто экономической моделью отношений в обществе.

Из этих соображений можно сделать вывод, что структура научных коллективов характеризуется главным образом информационными связями, обеспечивающими необходимую согласованность в действиях этих коллективов, возможность объективной оценки их работы, возможность опираться на результаты других коллективов. Поэтому модели научных коллективов могут быть особенно полезны при изучении социальных структур как в некотором смысле чистый пример математико-кибернетических моделей, основанных на информационных связях.

Вполне возможно, что анализ структуры научных коллективов, способов принятия решения в хорошо работающих коллективах даст полезный фактический материал для формирования принципов целесообразной организации информационных и управляющих связей в более широком классе социальных структур.

## 2. КОЛЛЕКТИВ И ЕГО СТРУКТУРА

Объединение группы людей в коллектив характеризуется тем, что большая часть определенного типа связей замыкается в пределах этой группы. Каждому типу информационных связей соответствует свое членение некоторого «фрагмента» общества на коллективы. Таким образом, одно и то же лицо оказывается членом ряда коллективов. Взаимное влияние участников коллектива приводит к тому, что в коллективе вырабатывается определенное «правосознание», определяющее комплекс прав и обязанностей внутри коллектива. Это «правосознание», т. е. нормы поведения, признаваемые коллективом как естественные, сказывается на «юрисдикции» коллектива<sup>1</sup>.

При интенсификации информационных связей членение общества на сложную систему коллективов становится неминуемым, иначе количество связей, приходящихся на одно лицо, превысило бы все возможные пределы. Различное «правосознание» и интересы отдельных коллективов могут приводить к конфликтным ситуациям, усугубляю-

<sup>1</sup> Термин «правосознание» коллектива, таким образом, употребляется нами в смысле, отличном от понятия «правосознание», как оно фигурирует, например, в теории государства и права. Для наших целей необходимо понятие о системе разрешений, запретов и рекомендаций, действующих внутри коллектива, и именно для его обозначения применяется упомянутый термин.

щимся тем, что эти коллективы имеют непустые пересечения. Адекватная модель некоторой социальной структуры обязана учитывать членение на коллективы и объяснять, за счет чего возможно устойчивое функционирование этой структуры. Так, группа, состоящая из сколько-нибудь значительного количества ученых, работающих над общей проблемой, всегда, как показывает опыт, распадается на подгруппы с частично противоречивыми интересами. Положение не спасает даже наличие очень сильного лидера в этом коллективе. Возникает вопрос: за счет чего вообще возможна более или менее согласованная работа такого научного коллектива над общей проблемой?

Следует резко возразить против высказываемой иногда на Западе точки зрения, что наличие коллективов является социально отрицательным явлением. В философском словаре (под редакцией Г. Шмидта), изданном в ФРГ, дается следующее определение коллектива: «... группа, характеризующаясь особыми признаками, так, что в ней почти полностью исчезают отдельные личности. Коллективы в этом смысле существуют уже с момента возникновения тоталитарных государств. Эти государства используют коллективы для поддержания характера демократии и для того, чтобы, не подчиняя индивидуумов воле государственного руководства непосредственно, достичь точного выполнения ими всех его распоряжений. Как правило, таким коллективом является соответствующая государственная партия. Но и другие группы, когда поблизости существует могущественный коллектив, легко превращаются в коллективы, обладающие менее значительной властью. Индивид все теснее охватывается коллективами, так что он, чтобы приобрести себе некоторую свободу движения, вынужден вступать в коллектив. Поэтому в тоталитарных государствах индивида оценивают по тому, к какому коллективу он принадлежит и какую роль в этом коллективе играет»<sup>1</sup>.

Это «определение» коллектива не представляет ценности для науки. В словаре коллектив представляется как форма организации, навязанная обществу. На деле, однако, коллектив — это форма организации, вытекающая из объективных закономерностей развития общества. Можно говорить о том, какие структуры коллективов необходимы для того, чтобы общество и личность в обществе могли успешно функционировать и развиваться. Более того, возникновение той

<sup>1</sup> «Философский словарь» (пер. с нем.). М., 1961, стр. 294—295.



или иной структуры коллективов имеет место в любом обществе. Но конечно, тип общества определяет качественную сторону коллективов и их структуру. Социалистическое общество вырабатывает способы построения коллективов, в которых гармонически сочетались бы интересы личности и коллектива и в основе которых лежит принцип демократического централизма<sup>1</sup>.

Для построения модели структуры коллективов полезно рассмотреть следующую формальную схему.

Пусть множество  $M$  состоит из элементов, образующих коллективы (независимо от их природы). Не будем рассматривать силу отдельных информационных связей между членами коллектива, а будем исходить из того, что такие связи имеются<sup>2</sup>. Учет всех информационных связей приводит к понятию так называемого *полного коллектива*. Но в полном коллективе существуют подколлективы. Именно их структура и важна для понимания устройства коллектива в целом.

Один и тот же элемент может функционировать сразу в нескольких коллективах. Это очень типично именно для структуры человеческого общества. Скажем, школьник, являясь учеником своего класса, может быть членом спортивной секции, участником компании сверстников, живущих в одном доме, он — член своей семьи и т. п. Для взрослого человека количество связей с разными коллективами (постоянных или временных) может быть еще большим. Но связи членов коллективов могут быть не только непосредственными. Существуют связи второго порядка. Например, если ученый  $x$  цитирует ученого  $y$ , а ученый  $y$  —

<sup>1</sup> В этой связи интересно и важно было бы рассмотреть особенности выработки коллективного «правосознания» (вообще самосознания коллектива). Но здесь общесистемный подход недостаточен, а необходим более глубокий конкретно-философский анализ, основанный на методологии исторического материализма. Системный подход может в данном случае играть только роль полезного инструмента для выработки необходимых философских категорий. Поэтому и материал данной главы следует в значительной мере рассматривать как попытку создать *инструментальные средства* для исследования коллективов разной природы.

<sup>2</sup> Можно исходить из некоторой оценки количества информации, передаваемой от элемента  $x$  элементу  $y$ . Мы будем говорить, что между  $x$  и  $y$  существует связь ( $x \sigma y$ ), если это количество превышает выбранный порог. Впрочем, все дальнейшие рассуждения без особого труда переносятся на случай, когда различаются интенсивности разных связей.

ученого  $z$ , то, очевидно, существует связь второго порядка между учеными  $x$  и  $z$ <sup>1</sup>.

Будем обозначать через  $xou$  отношение « $x$  связан с  $y$ » или « $x$  получает информацию от  $y$ ». Пусть  $M$  есть некоторое множество объектов, а  $E$  его (произвольное) подмножество:  $E \subseteq M$ . Тогда для всякого  $E$  можно ввести три числовые характеристики:  $\lambda(E)$  — число всех пар из множества  $E$ , для которых выполняется отношение  $xou$  (если выполняется также и  $yox$ , то эта пара  $\{x, y\}$  считается дважды);  $\Lambda^+(E)$  — число всех пар, для которых выполнено  $xou$ , при условии, что  $x \notin E$ ,  $y \in E$ ;  $\Lambda^-(E)$  — число всех пар, для которых выполнено  $xou$ , при условии, что  $x \in E$ ,  $y \notin E$ . Величина  $\lambda(E)$  характеризует число внутренних связей в  $E$ , а  $\Lambda^+(E)$  и  $\Lambda^-(E)$  — числа входящих и выходящих внешних связей элементов из  $E$ . Условие, что  $E$  есть коллектив, записывается в виде выражения:

$$\Lambda^+(E) + \Lambda^-(E) \leq \lambda(E).$$

Связь второго порядка между  $x$  и  $y$  означает<sup>2</sup>, что выполнено отношение  $xo^2y$ . Соответственно можно ввести характеристики  $\lambda_n(E)$ ,  $\Lambda^+(E)$  и  $\Lambda^-(E)$ , позволяющие определить коллективы  $n$ -го уровня. Например,  $\lambda_2(E)$  — это число пар, для которых выполнено отношение  $xo^2y$  при  $x \in E$  и  $y \in E$ .

Разумеется, коллективы характеризуются не только связями (о природе которых мы сознательно ничего не говорим), но и общностью цели, общностью сознания (обеспечивающей взаимопонимание и способность к согласованным действиям), наличием одного или нескольких лидеров и т. п.

Рассмотрение сети связей позволяет выделить в коллективе *потенциальных лидеров* — тех членов коллектива, которые имеют связи вне своего коллектива. Ясно, что коллективы второго уровня образуются за счет связей между потенциальными лидерами.

Простейшая структура коллективов — *иерархическая*, о которой уже шла речь (см. гл. II). В применении к коллективам она выглядит следующим образом. Все члены; не

<sup>1</sup> На учете связей по цитированию разных порядков основан алгоритм выделения тематических областей в науке, предложенный А. Трыбульцем: А. Trybulec, Metody socjometryczne w zastosowaniu do zagadnień informacji. — «Informacja NTE w zarządzaniu». Konferencja naukowa. Warszawa, 1968.

<sup>2</sup> Отношение  $\sigma^2$  — «квадрат отношения  $\sigma$ » — есть такое отношение между  $x$  и  $y$ , что существует объект  $z$ , удовлетворяющий условиям  $xou$  и  $yoz$ .

являющиеся потенциальными лидерами, входят только в один коллектив первого уровня (определенный через непосредственные связи). Каждый коллектив первого уровня входит целиком в какой-либо коллектив второго уровня. Каждый коллектив второго уровня входит целиком в некоторый коллектив третьего уровня. Аналогичное условие выполняется для коллективов любого уровня. При некотором  $n$ , характеризующем глубину иерархии, существует единственный коллектив  $n$ -го уровня, охватывающий всех участников.

Примером иерархической организации является армейская структура, когда солдаты образуют взводы, из взводов составляются роты, затем батальоны и т. д. до самого верхнего уровня. Взаимодействие частей и соединений организуется через командиров («лидеров») <sup>1</sup>.

Преимущество иерархической организации коллективов состоит в простоте организации информационных потоков, в минимальности противоречащих влияний в них, в быстроте прохождения управляющих сигналов. По-видимому, в ситуациях с четко определенной целью, где важно сокращение времени достижения цели, иерархические организации действительно являются оптимальными.

Если научный коллектив выполняет совершенно определенную задачу, где ясно сформулирована цель и можно строго разделить функции отдельных групп, то и в этом случае очевидны преимущества иерархической структуры. Однако для научных коллективов более типична ситуация, когда цель не является четко определенной <sup>2</sup>. В этом случае

<sup>1</sup> Иерархический принцип организации оказался сущей находкой при конструировании вычислительных машин. Благодаря такой структуре удалось четко разграничить функции устройств, синхронизировать их работу и вести управление счетом по четко заданной программе. Несколько позже выявились и теневые стороны: машина умеет успешно решать задачи, где четко сформулирована не только конечная цель, но и подробно расписана вся организация действий. Гораздо хуже она «чувствует себя», когда в задании процесса счета допускается свобода, т. е. когда локальные цели не определены однозначно. И она совсем ничего не может сделать, если цель сформулирована нечетко. Математику вполне естественно искать ответы на проблемы типа: «как ведет себя некоторая функция» или «что можно сказать о решениях данного уравнения?». Для современной вычислительной машины такие вопросы не имеют смысла. По-видимому, отличие «машинного интеллекта» от человеческого разума связано с тем, что для первого существеннее наличие четких целей. Ср. Ю. А. Шрейдер. Присущ ли машинам разум? — «Вопросы философии», 1975, № 2.

<sup>2</sup> Более того, типична ситуация, когда цели исследования изменяются под влиянием получаемых результатов.

иерархическая организация отнюдь не является оптимальной.

Для творческой (в частности, научной) деятельности характерна, как правило, неясность окончательной цели, неопределенность в том, что, собственно, подчас будет считаться решением проблемы.

При расплывчатых целях деятельности жесткая иерархическая структура теряет свои преимущества: нет возможности заранее поставить четкие задачи коллективам различного уровня. А образовать новые необходимые связи данная структура не позволяет.

Эффект самоорганизации в научных коллективах был, видимо, впервые четко сформулирован Д. Прайсом<sup>1</sup>. Он отметил, что, чем более творческой является научная область, чем она дальше от «интеллектуальной индустрии», тем сильнее реальные научные связи ученых (как личные, так и в плане взаимного цитирования работ) отклоняются от административных связей. Интересный анализ таких структур можно найти в книге В. В. Налимова и З. М. Мульченко<sup>2</sup>.

### 3. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУР КОЛЛЕКТИВОВ

Анализ информационных связей помогает формально выделить коллективы в объемлющей структуре, однако он недостаточен для формального изучения структуры взаимодействий коллектива. Для такого изучения целесообразно использовать понятие «правосознание» коллектива, о чем говорилось выше. Чтобы определить, как «правосознание» коллектива связано с численностью и характером этого коллектива, нами была использована анкета, в которой фигурировали следующие характеристики: (1) право на отказ в приеме новых членов, (2) обязанность помогать своим членам в пределах деятельности коллектива, (3) право распределения обязанностей членов внутри коллектива, (4) право отчуждения результатов работы членов коллектива, (5) право квалификационной оценки деятельности членов коллектива, (6) обязанность заботиться о квалификации коллектива, (7) право контроля связей вне коллектива, (8) право на контроль высказываний о коллективе.

<sup>1</sup> См. Д. Прайс. Малая наука, большая наука. — «Наука о науке».

<sup>2</sup> См. В. В. Налимов, З. М. Мульченко. Наукометрия. М., 1969.

Каждая из этих характеристик оценивалась по четырехбалльной системе: 3 — полный объем прав (соответственно обязанностей), 2 — ограниченный объем, 1 — малый объем, 0 — отсутствие такого права или обязанности в данном коллективе. Всякий раз имелись в виду права по отношению к членам своего коллектива. Для каждого из подвергшихся изучению коллективов было проставлено 8 оценок, которые затем были суммированы. Результаты, характеризующие уровень «правосознания» коллективов разных типов, выглядят следующим образом:

Группа соавторов . . . . .	17
Семья . . . . .	15
Производственная ячейка (бригада) . . .	14
Большой семинар <sup>1</sup> . . . . .	13
Производственное подразделение (отдел, большая лаборатория) . . . . .	6
Предприятие (институт) . . . . .	4
Коммунальная квартира . . . . .	3
Жилищный кооператив . . . . .	2
Коллеги по узкой профессии . . . . .	5
Научное общество . . . . .	2

Коллективы здесь расположены примерно в порядке возрастания их численности.

В этих сравнительных и достаточно приближенных оценках можно увидеть следующую общую закономерность. Объем прав уменьшается с увеличением численности коллектива<sup>2</sup>. Более точная формулировка, по-видимому, должна быть следующей: чем интенсивнее связи внутри коллектива, чем большая доля информационных связей его членов замыкается внутри этого коллектива, тем значительнее его объем прав<sup>3</sup>. Поскольку общий уровень информационных связей одного человека ограничен, то наиболее интенсивные связи проявляются в малых коллективах, связанных единством решаемых задач. В очень большом коллективе, по-видимому, начинает играть роль суммирование по большому числу слабых связей.

<sup>1</sup> Типа университетских кафедральных семинаров.

<sup>2</sup> Это не касается, по-видимому, самых крупных «коллективов» (типа государства). См. Ю. А. Шрейдер. К вопросу о структуре коллективов. — «Методологические проблемы кибернетики». Материалы к Всесоюзной конференции, т. 2. М., 1970, стр. 375—376.

<sup>3</sup> Было бы интересно попытаться установить примерный количественный характер зависимости объема прав коллектива от уровня его внутренних связей.

К полученным численным оценкам необходимы некоторые комментарии.

1. Анкета заполнялась опрошенными лицами, по возможности исходя из сложившегося в данном коллективе «правосознания» оценивалось *мнение* об объеме прав и обязанностей коллектива данного типа, а не фактическая юрисдикция коллектива. Практическая реализация коллективом своих прав и обязанностей может не соответствовать этому «правосознанию». Обычно такая ситуация воспринимается как аномалия, мешающая нормальному функционированию коллектива.

2. При оценке права коллектива низкий балл выводился в двух случаях: либо если коллектив всегда осуществляет это право в малой степени, либо если для осуществления этого права нужна особая, сравнительно редкая ситуация. Например, город не занимается распределением обязанностей своих жителей, но может предъявить к ним серьезные требования в момент стихийного бедствия. При более тонком анализе объема прав коллектива эти два случая, возможно, придется различать. Последний случай особенно характерен для временных коллективов (туристская группа, пассажиры парохода или самолета и т. п.).

3. Значительный объем прав и обязанностей в коллективе может быть связан еще и с тем обстоятельством, что данный коллектив держится только на внутренних связях. Типичный пример — это группа соавторов, где нарушение некоторых взаимных обязательств неминуемо приведет просто к разрушению коллектива.

4. Приближенность приведенных оценок связана с тем, что опрашиваемым предлагалось оценивать типы коллективов, а не конкретные коллективы.

5. Приведенные оценки не различают разные типы коллективов по способу выработки «правосознания». Эта очень глубокая проблема лежит вне рамок настоящего рассмотрения.

Более детальный анализ структур коллективов приводит к появлению дополнительных характеристик этих структур.

Одна из них — способность структуры к образованию *новых, не регламентированных заранее связей*. Этот фактор (будем обозначать его  $C_f$ ) можно оценить количественно, например как отношение числа всех связей к числу связей, заранее регламентированных. Ограничимся, однако, лишь делением структур на жесткие ( $C_f \approx 1$ ) и свободные ( $C_f$  достаточно велико).

Ю. Б. Кнорозов предложил другую важную характеристику коллектива — уровень *фасцинации*<sup>1</sup> в коллективе, или степень «затягивания» коллективом своих участников. Этот фактор обозначим  $K_f$ . Фасцинация тесно связана с распределением связей по интенсивности. Равномерное распределение связей соответствует, вообще говоря, высокой фасцинации в коллективе. Можно ввести понятие «температура» коллектива и его отдельных подколлективов. «Горячие» коллективы — это коллективы с высокой фасцинацией<sup>2</sup>.

Припишем каждой паре  $(x, y)$  число  $E(x, y)$ , характеризующее сложность установления связи в этой паре. В частности, если такая связь невозможна, то будем считать, что  $E(x, y)$  равно бесконечности. Пусть  $p(x, y)$  — вероятность осуществления данной связи. Поставим вопрос о наиболее вероятном распределении связей при условии, что математическое ожидание суммарной сложности (энергии) заранее задано. Опуская хорошо известные из термодинамики рассуждения, запишем окончательный результат:

$$p(x, y) = Ce^{-\alpha E(x, y)}, \quad (1)$$

где  $C$  и  $\alpha$  — константы. Величину  $1/\alpha$  назовем температурой. Можно говорить о внутренней температуре коллектива какого-то уровня, о температуре связей, выходящих из данного коллектива или входящих в него.

С помощью факторов  $C_f$  и  $K_f$  можно (разумеется, очень приближенно) провести классификацию структур коллективов.

Случай I:  $C_f = 1$ ,  $K_f$  — велик. Это чисто иерархическая структура с точно регламентированными связями и четко определенными задачами каждого члена коллектива и подколлектива.

Случай II:  $C_f \approx 1$ ,  $K_f$  — нормален. Это, например, структура научного учреждения с естественной степенью самоопределения научных групп в выборе предмета и направления занятий.

Случай III:  $C_f$  — велик,  $K_f$  — нормален. Это структура с достаточно свободными связями и фасцинацией, обеспечивающей единство коллектива (сознание единства целей,

<sup>1</sup> От лат. *fascino* — заговаривать, обвораживать.

<sup>2</sup> Нам приходится расширить принятую ранее модель структуры, введя понятие вероятности возникновения данной связи, характеризующей ее интенсивность. Чем больше  $C_f$ , тем меньше доля связей с единичной вероятностью.

общность оценок и т. п.). Примером такого коллектива является научное общество, «клуб интересов» и т. п.

Случай IV:  $C_f$  — велик,  $K_f$  — велик. Это свободный коллектив с высокой fascinацией. Крайним вариантом этого случая является толпа, объединенная общим порывом.

I и IV типы структур, несмотря на внешнее различие, обладают важной общей чертой. В обоих случаях невозможно свободное образование новых микроструктур. В I случае это происходит из-за невозможности образовать новые связи, кроме жестко регламентированных. В IV случае причина заключается в «затягивании», вызываемом тем, что коллектив слишком разогрет. Толпа, разбившаяся на самостоятельно действующие группки, уже не толпа. Для структур II и III типов, где в каждом коллективе существует несколько потенциальных лидеров, характерна постоянная смена лидеров.

Разумеется, приведенная классификация описывает только «чистые» типы структур, в реальных структурах типовые черты смешаны.

#### 4. О НАУЧНЫХ КОЛЛЕКТИВАХ. КОЛЛЕКТИВЫ И ОРГАНИЗАЦИЯ

Структура *научных* коллективов, помимо информационных связей в них, обладает еще одной важной особенностью. Деятельность маленькой ячейки, если она вообще способна функционировать как совместно работающий научный коллектив, основана на взаимном благоприятствовании членов этого коллектива. В данном случае такое взаимное благоприятствование основано на непосредственном контакте, общности целей и понимании ценностей.

В структуре научных коллективов возникает отношение благоприятствования и к коллективам, с которыми нет непосредственного контакта.

Хотя в структуре научных коллективов могут возникать конфликтные ситуации между конкурирующими группами, в целом для коллективов выгодна атмосфера благоприятствования. Наличие ряда параллельно работающих над родственными проблемами коллективов создает некоторый общий уровень развития науки, обмена идеями, который необходим для успешного функционирования каждого из этих коллективов.

Эта взаимная потребность в поддержании общего уровня и благоприятствования в среднем превышает действие таких



факторов, как конкуренция и соперничество. Аналогичная картина наблюдается, например, в соревнованиях по бегу, где каждый участник хочет прийти первым, но твердо знает, что абсолютный результат будет лучше при участии сильных соперников. В частности, всякий нормальный работающий научный коллектив заинтересован в том, чтобы возможно полнее информировать других о своих результатах, даже если это затрагивает вопросы приоритета.

Основной вопрос, который встает при изучении коллективов, сводится к выяснению того, за счет каких свойств данная структура коллектива способна существовать и достигать своих целей. Цели коллектива (идея, объединяющая коллектив, воплощающаяся в нем) тесно связаны с его организацией и со свойствами его членов.

Нарушение правильных соотношений между целями и организацией приводит к вырождению коллектива. Когда научный коллектив отождествляет свою цель не с добыванием научной истины, а с сохранением своего престижа, он теряет право называться научным коллективом. Но и противоположный случай — слепое подчинение всех членов коллектива одной узко понимаемой цели, приводит к нарушению гармонии в структуре, как бы омертвляет саму эту цель. Истина состоит в диалектической борьбе противоречий, в живом динамическом равновесии различных тенденций.

Следующий шаг при модельном описании структуры научных коллективов состоит в том, что каждому коллективу «приписывается» свой тезаурус, отражающий уровень знаний коллектива. Особенности этого тезауруса определяют возможности коллектива воспринимать внешнюю информацию. Тем самым возникает возможность говорить не только о наличии или отсутствии информационных контактов между группами, но и выделять возможные типы контактов. Наиболее интересным и трудным вопросом является проблема согласования коллективных тезаурусов. Чтобы некоторый коллектив мог устойчиво функционировать, необходимо, чтобы каждый индивид понимал получаемую информацию по крайней мере в том объеме, который определяется его задачами, и чтобы задачи, возлагаемые на данный индивид разными коллективами, в которые он входит, не были взаимно противоречивыми.

Хороший коллектив обычно состоит из людей с достаточно широкими интересами, одновременно входящих в другие коллективы. Коллективный тезаурус определяет тот

язык, на котором возможно общение внутри коллектива, ту сферу понятий, которая объединяет коллектив, причем не только сферу понятий, определяющую способ восприятия информации, но и систему фасцинации (по Ю. В. Кнозову).

В некотором смысле коллективный тезаурус — это пересечение тезаурусов отдельных членов коллектива, достаточное для того, чтобы коллектив мог существовать. Но и объединение этих тезаурусов должно быть достаточным, чтобы в целом члены коллектива «перекрывали» необходимую область интересов. Поскольку возможности разных индивидуумов не так уж сильно отличаются, то эти два условия — максимум пересечения и максимум объединения тезаурусов — взаимно противоречивы.

Если данная область науки достаточно развита, в ней возникает много частных задач. Тогда члены коллектива как бы «разделяются» по этим задачам, так что на одного лидера с широким диапазоном интересов и знаний приходится достаточно много лиц с более узкими интересами, занимающихся частными задачами. Эта ситуация связана с узкой специализацией внутри данной области. Наоборот, в только начинающих развиваться областях науки достаточно четкие частные задачи сравнительно редки. В таких коллективах важно отношение дополнения тезаурусов, когда разные члены коллектива пытаются подойти к вопросам с различных сторон, опираясь на разный опыт и разный научный багаж.

При изучении структур и способов функционирования коллективов важно учитывать то обстоятельство, что сама возможность деятельности сложной системы в большой мере зависит от присущей этой системе «организации».

Понятие «организация» в интересующем нас смысле было введено И. М. Гельфандом и М. Л. Цетлиным<sup>1</sup> в связи с изучением моделей биологических систем и сложных вычислительных процедур. «Организация» системы проявляется в так называемом принципе наименьшего взаимодействия. Этот принцип в отличие от вариационных принципов механики носит не энергетический, а информационный характер: хороший коллектив разбивается информационно на слабо связанные группы, каждая из которых выполняет свою задачу, не очень интересуясь действиями других групп.

<sup>1</sup> См. И. М. Гельфанд, М. Л. Цетлин. Об управлении сложными системами. — «Успехи математических наук», 1962, № 1.

Попытаемся «приложить» его к человеческому коллективу. С этой целью выделим в нем две части: *принцип предсказуемости* и *принцип обусловленности*<sup>1</sup>.

Принцип предсказуемости заключается в том, что каждый член коллектива, располагая ограниченным объемом информации о поведении связанных с ним (непосредственно или короткой цепочкой связей) других членов коллектива, способен с большой вероятностью на ограниченный срок предсказать поведение существенной для него части коллектива при конкретном выборе своего собственного поведения. Этот принцип утверждает, что в хорошо организованных структурах решение, принимаемое любым членом коллектива, может быть ответственным, поскольку последствия этого решения могут быть в основном предугаданы. Здесь существенно, чтобы срок прогнозирования для данного участника примерно совпадал со временем, в течение которого его решение может более существенно изменить ход событий, нежели решения других. Решения, принимаемые членами коллектива с более сильным влиянием в нем, должны носить более «абстрактный» характер, с тем чтобы их результаты могли статистически прогнозироваться на более длительный срок. Любое отклонение от принципа предсказуемости ухудшает организацию структуры. Например, нельзя менять правила игры после того, как ход уже сделан.

Однако сам принцип предсказуемости заведомо недостаточен даже для того, чтобы обеспечить ответственность решения. Действительно, наилучшая предсказуемость существует в полностью детерминированных структурах, где никакое решение не может изменить заранее запрограммированный ход событий. Если в структуре заложен подобный детерминизм лапласовского толка, если любое решение вызывает лишь видимость действия, то оно не может быть ответственным. Ответственность возможна только при наличии «свободы воли». Поэтому представляется естественным выдвинуть дополнительный к предыдущему принципу — принцип обусловленности.

Его можно сформулировать так. Решения, принимаемые и выполняемые любым членом коллектива, существенны для любых связей этого члена коллектива. Иными словами, влияние извне на некоторый участок структуры может

<sup>1</sup> Подробнее см.: Ю. А. Шрейдер. Сложные системы и космологические представления. — «Системные исследования». Ежегодник. М., 1975.

вызвать равносильную реакцию внутри этого участка, способную в большинстве случаев преодолеть это влияние. Этот принцип по существу утверждает у членов коллектива способность не только принимать, но и осуществлять решения. Такая возможность не противоречит предсказуемости поведения системы. Только прогнозирование теперь осуществляется не на основе статистической экстраполяции наблюдений, а из оценки целей, определяющих решения. Таким образом, связи в хорошо организованной структуре базируются на существовании общности и взаимного понимания целей у отдельных членов этой структуры.

В свете этого уместно подчеркнуть, что организация «биологических» коллективов в значительной мере основывается на целесообразных и целеполагающих факторах, в то время как в неживых структурах прежде всего на причинно-следственных связях. Примером структуры с неудачной организацией является вычислительная машина, где система контроля отключает любой блок, не выполняющий команды, идущие от верхних ярусов иерархической структуры. В последнем случае принципу предсказуемости придано настолько большое значение, что нарушается принцип обусловленности. Впрочем, для машины это является скорее положительным свойством. По-видимому, оба этих принципа находятся в отношении дополнительности, и хорошая организация структуры состоит в сохранении равновесия между ними.

## Глава IV

### СТУПЕНИ СЛОЖНОСТИ

Выше отмечались трудности, с которыми сталкиваются попытки строго определить ключевое понятие сложности системы. Несмотря на ряд интересных предложений, оно остается в значительной мере интуитивным. Главную причину этого, несомненно, следует видеть в недостаточном развитии логической основы системного подхода — общей теории систем. Теория эта долгое время разрабатывалась качественными методами, а математические модели относились к частным случаям. Даже появившиеся в последние годы общие модели систем (см. гл. I данной части) лишь очень неполно и условно передают многие важные аспекты их функционирования и часто оказываются недостаточными для адекватного отображения действительно сложных ситуаций. В этих условиях возникает потребность разработать хотя бы грубую индуктивную классификацию систем по уровням сложности, с тем чтобы получить известный общий эталон, известную общую шкалу для изучения этого фундаментального свойства, ускользающего от точного анализа. Такую шкалу можно было бы сравнить, например, с условной шкалой Бофорта для измерения силы ветра. При всей своей грубости она должна облегчить нам общую ориентацию в системных вопросах и рациональное планирование исследований.

Мы опишем здесь шкалу, предложенную в 60-х годах одним из авторов настоящей книги<sup>1</sup>, и рассмотрим возможности использования ее для исследования общих тенденций развития науки и техники. Кратко такое исследование можно

<sup>1</sup> См. Г. Н. Поваров. Сложность систем как показатель научно-технического прогресса. — «Проблемы исследования систем и структур». Материалы к конференции; *его же*. Об уровнях сложности систем. — «Методологические проблемы кибернетики». Материалы к Всесоюзной конференции, т. 2; *его же*. Το Δαίδαλον πτερό (К познанию научно-технического прогресса). — «Системные исследования». Ежегодник. М., 1972.

охарактеризовать как род обобщенного (или укрупненного) системного анализа, где все системы того же уровня представлены одной грубой моделью.

## 1. ИНДУКТИВНАЯ ШКАЛА

Классификация систем, о которой идет речь, требует содержательной, не стесненной каким-либо определенным формализмом трактовки материала. Понятие «система» будет поэтому здесь использовано в самом широком смысле, как синоним *сложного целого*<sup>1</sup>. Системы, изменяющие свое состояние во времени, суть *динамические системы*. Допускаются, однако, также системы из единственного элемента (*несобственные*, или *предметы*) и системы неизменные (*статические*).

Сложность системы определяется *числом элементов* системы и *характером связей* между ними, степенью и разнообразием их взаимодействия. В настоящее время мы не располагаем хорошей математической теорией этих связей, но общее сопоставление известных классов систем позволяет выделить, с некоторым приближением, следующий ряд (шкала Поварова): (1) *единое*, или *простое, целое*; (2) *малые*, или *простые, предметы*; (3) *превращающиеся предметы*; (4) *большие*, или *сложные, предметы*; (5) *малые*, или *простые, системы*; (6) *большие*, или *сложные, системы*; (7) *превращающиеся*, или *ультрасложные, системы*; (8) *парадоксальные системы*, или *сверхсистемы*.

Можно объединить второй, третий и четвертый уровни в один общий *уровень предметов*, а пятый, шестой и седьмой — в *уровень собственных систем*. Первый и последний уровни являются самостоятельными.

Каждому уровню сложности можно сопоставить *определенную стадию научно-технического прогресса*, когда этот уровень был господствующим среди изучаемых людьми природных и создаваемых ими искусственных систем. Тогда средний уровень сложности систем может рассматриваться как своеобразное *мерило власти человека над природой, некоторый суммарный показатель состояния науки и техники в данное время*<sup>2</sup>. Таким образом, шкала яв-

<sup>1</sup> Ср. приведенное (гл. I этой части) определение из словаря С. И. Ожегова.

<sup>2</sup> Слово «наука» употребляется здесь как синоним знания вообще. Это и развитая современная наука, и эмпирическая наука древних, и скромные знания первобытных дикарей.

ляется не только логической, но и исторической. В определенном смысле она отображает последовательное расширение человеческого знания и могущества.

Прежде чем обсуждать каждый уровень в отдельности, рассмотрим то, что можно было бы назвать *принципом множественности системных образов вещей*<sup>1</sup>. Каждая система содержит в себе различные подсистемы, которые обычно имеют различные уровни сложности. Человек овладевает сложным не сразу, а по частям, шаг за шагом. Он начинает с поверхности, с простого и постепенно проникает в глубину объекта, разделяя его на все более мелкие части и прослеживая все более тонкие связи. Поэтому на разных стадиях исследования или — шире — на разных стадиях научно-технического прогресса одни и те же вещи могут рассматриваться и использоваться на разных уровнях сложности.

Принято говорить о менее и более точных моделях вещей, но следует иметь в виду, что за каждой моделью, имеющей хотя бы ограниченное объективное значение, скрывается некоторая реальная подсистема изучаемой системы. Иными словами, *язык моделей эквивалентен языку подсистем*.

Принцип множественности системных образов вещей был известен в той или иной форме многим исследователям и по существу является лишь одним из выражений диалектической взаимосвязи относительной и абсолютной истины.

Напомним также о предварительном характере рассматриваемой шкалы сложности. Несомненно, она нуждается в дальнейшей проверке и детализации: стоит задача более глубокого, математического исследования природы сложности. Тем не менее в первом приближении эта шкала позволяет проследить движение познания от простого к сложному, от внешней стороны явлений к их скрытой сущности.

Это движение можно рассматривать как переход от исследования целого к исследованию частей (анализ) и затем опять к исследованию целого, но на новой, более богатой и сложной основе (синтез). Вершиной развития аналитических тенденций можно считать стадию малых систем, и особенно ее зрелый период — XIX век, тогда как нынешняя стадия больших систем открывает эпоху синтеза. В своих

<sup>1</sup> См. Г. Н. Позаров. To Daidálu pteró. — «Системные исследования». Ежегодник.

работах «Анти-Дюринг» и «Диалектика природы» Энгельс указал на необходимость развития в науке нового синтетического мышления в противоположность господствовавшему аналитическому, но естествознание и технические науки встали на этот путь в целом лишь в XX в.

## 2. УРОВНИ СИСТЕМНОЙ СЛОЖНОСТИ И СТАДИИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА

*Единое, или простое, целое* — это простейшая модель Вселенной, мир до его членения на части. Еще более упрощая, можно сделать это целое неподвижным и получить элеатский образ чистого бытия (может быть, следовало бы разбить первый уровень на два отдельных и говорить о простом целом и целом превращающемся). Динамическая трактовка дает мир цельных, нерасчлененных событий, каким он, например, выступает в логике высказываний.

Можно думать, что животные воспринимают мир как именно такой поток событий. Хотя у высших млекопитающих и обнаруживаются некоторые способности к выделению предметов, однако обычно животное противостоит среде как целому и воспринимает ее прежде всего как целое, как единый комплекс раздражителей<sup>1</sup>. В результате животное не имеет власти над средой, но может к ней приспособливаться.

Следующий шаг — расщепление окружения на независимые цельные предметы, вступающие друг с другом в кратковременные, эпизодические контакты. Это уровень *простых, или малых, предметов*, господствовавший в первобытной технике палеолита. Мир дикаря, первобытного охотника и собирателя, предстает собранием сталкивающихся частиц, своего рода «системным газом».

*Превращающиеся предметы* — это цельные предметы, но способные к взаимным превращениям. Дерево вспыхивает огнем, семя дает растение, обожженная глина обретает твердость. Медленно, звено за звеном, человек раскрывал эти естественные метаморфозы и ставил их себе на службу, пока, наконец, в неолите не произошел скачок: техника пре-

<sup>1</sup> D. Katz. Mensch und Tier. Zürich, 1948; Э. Г. Вацуро. Исследование высшей нервной деятельности человекообразных обезьян. Л., 1957; Я. Дембовский. Психология животных. М., 1959; Л. Дж. Милн, М. Милн. Чувства животных и человека. М., 1966.



вращающихся предметов — искусство земледелия и скотоводства — стала основой хозяйства. Тогда же появилась керамика, а позже начала развиваться и металлургия. Молекулы «системного газа» стали участвовать в «реакциях».

Интересно отметить, что, работая преимущественно с цельными предметами, первобытный человек и мысленно плохо умел делить их на части. Отсюда ассоциативный, метафорический характер его мышления, текучесть образов, поэтическое восприятие явлений. Эта особенность ума первобытного человека подчеркивалась многими исследователями<sup>1</sup>. Некоторые, подобно Л. Леви-Брюлю, говорили даже о дологическом, эмоциональном мышлении, не чувствительном к противоречиям. Естественнее, однако, связать это с отсутствием надлежащих понятий о сложном, еще не выработанных опытом. Формы мышления развиваются вместе с нашими знаниями о природе и обществе, и древнее суждение было не дологическим, а раннелогическим<sup>2</sup>.

Переходное звено между несобственными (одноэлементными) и собственными (многоэлементными) системами составляют *большие, или сложные, предметы*, образованные жесткими соединениями малых (простых) предметов. Таковы разные составные орудия, ткани, различные сооружения и т. п. С одной стороны, они имеют много элементов, с другой — из-за постоянства связей внешне подобны цельным предметам и как бы заменяют их. «Системный газ» сгущается, «атомы» слипаются в «системные кристаллы».

Зачатки техники больших предметов мы находим еще в каменном веке, но истинно крупные сооружения появляются лишь с возникновением городского, цивилизованного общества. Стадия больших предметов — это эпоха строительства и перевозок, городов и дорог; это древние и средневековые цивилизации, восхищающие нас своими прекрасными памятниками. Наука этой стадии характе-

<sup>1</sup> Э. Б. Тэйлор. Первобытная культура. М., 1939; Л. Леви-Брюль. Первобытное мышление. М., 1930; А. Ф. Лосев. Античная мифология в ее историческом развитии. М., 1957.

<sup>2</sup> Искусство как метод познания действительности в укрупненных, синтетических формах и поныне остается по существу на уровне пре-вращающихся предметов, хотя и обогащенное «системными обертонами» высших уровней (ср. Г. Н. Поваров. Новое путешествие на Геликон, или История культуры в свете общей теории системы. — «Точные методы в исследовании культуры и искусства». Материалы к симпозиуму, ч. 1. М., 1971).

ризуется прежде всего накоплением и систематизацией знаний; недаром границу между варварством и цивилизацией часто видят в изобретении письма.

Большие предметы мы относим в общем к несобственным системам. Следующие же три уровня охватывают *динамические системы в собственном смысле*. Такие системы состоят из многих элементов, связанных между собой переменными отношениями. Продолжая предыдущие сравнения с фазами вещества, можно уподобить системы этого типа «системной жидкости» (хотя это лишь наглядный образ).

Термины «малая» и «большая» системы, употребляемые в литературе в разных смыслах (ср. гл. I этой части), получают в данной классификации более узкое и специфическое значение, впрочем, довольно естественное. *Малыми*, или *простыми*, мы называем системы с малым числом элементов ( $10^1$ — $10^3$ ) и определенным, детерминированным их взаимодействием<sup>1</sup>. Их поведение можно проследить во всех подробностях. Это как бы «системные жидкие кристаллы».

Знакомство человека с малыми системами началось очень рано, но шло медленно. Первые автоматы — капканы — появляются еще в верхнем палеолите, древние общества, и особенно греческое и римское, располагали богатым арсеналом машин и известными элементами математического естествознания, но подлинный расцвет науки и техники малых систем произошел лишь в новое время. Хронологически это примерно XV—XIX вв.

Наука малых систем — это классическое, ньютоновское естествознание, проникнутое строгим детерминизмом и опирающееся на индивидуальный эксперимент. Оно сыграло выдающуюся роль в промышленном перевороте XVIII—XIX вв., но приносило ценные плоды и раньше, в эпоху великих географических открытий.

*Большие*, или *сложные*, системы характеризуются гораздо большим числом элементов (скажем, порядка  $10^4$ — $10^7$  и выше) и массовым, случайным их взаимодействием. Это системы стохастические, вероятностные<sup>2</sup>. Поведение каждого элемента в них нельзя проследить и предсказать полностью, но с помощью теории вероятностей можно

<sup>1</sup> Ср. понятия детерминированной машины со входом в книге У. Р. Эшби «Введение в кибернетику» и детерминированной относительно обособленной системы в книге Г. Грневского «Кибернетика без математики» (М., 1964).

<sup>2</sup> Ср. понятия стохастической машины со входом (Эшби) и стохастической относительно обособленной системы (Грневский).

оценить совокупный эффект. Обилие элементов часто сочетается с их разнородностью, что также требует обобщенного, комплексного подхода к системе, упора на ее интегральные свойства. Образно такие системы можно было бы назвать «системными коллоидами» или «системными гелями».

Стохастические связи событий, подобно детерминистическим, — форма проявления причинности, но форма более сложная и скрытая. Иногда говорят о стохастическом детерминизме, противопоставляя его детерминизму строгому, о котором мы говорили выше. Заметим, что современная физика не требует принципиального сведения вероятности к строгому детерминизму и допускает существование в микромире первично случайных процессов, но даже и при классической трактовке механики стохастический подход к сложным системам является объективно неизбежным и методологически оправданным.

Примером больших систем в технике могут служить современные автоматические телефонные станции. Их нагрузка случайна, и их оборудование рассчитывается по законам вероятностей. Станция должна обеспечить быстрое соединение любых абонентов при данной частоте вызовов. XX век — эпоха больших систем. Искусство их создания и эксплуатации получило название системотехники; прежняя техника малых систем выступает теперь по отношению к ней в роли поставщицы компонентов.

Естествознание впервые «столкнулось» с большими системами в молекулярно-кинетической теории газов и статистической термодинамике. Затем стохастический подход утвердился в атомной физике, метеорологии, биологии и т. д. Индуктивная логика и теория эксперимента обогатились методами математической статистики. Этот переворот в методологии науки завершился приблизительно в середине XX в.; последним его актом было возникновение кибернетики, неотъемлемой частью которой является стохастическая концепция информации и управления. Винер подчеркивал связь кибернетики с новой физикой и созданной ею вероятностной концепцией Вселенной<sup>1</sup>. В жестком механическом мире Ньютона — Лапласа управление было бы только иллюзией.

<sup>1</sup> См. гл. I в «Кибернетике» Н. Винера и его предисловие «Идея вероятностной Вселенной» к «Кибернетике и обществу» (Н. Винер. Кибернетика и общество. М., 1958); см. также Л. Бриллюэн. Наука и теория информации. М., 1960.

Правда, кибернетика включает и теории малых, детерминированных автоматов, где неопределенность входов исследуется в плане возможностей, а не вероятностей. Дж. фон Нейман говорил в этой связи о точной и о вероятностной теории информации<sup>1</sup>. Однако в общей системе управления мы неизбежно сталкиваемся со случайными сигналами, случайной нагрузкой, случайными ошибками и должны заботиться о разумном страховании от риска.

Кибернетика окончательно дорисовывает стохастическую картину мира, показывая механизмы устойчивости больших систем, пути борьбы с рассеянием энергии и ростом хаоса. Информация была отождествлена с отрицательной энтропией. Обратная связь позволяет обращать причинность, формируя целенаправленное поведение. Кибернетика внесла важный вклад и в общую теорию систем, обогатив и расширив ее математический аппарат (иногда отождествляли даже обе области).

Этот смелый синтез оказал глубокое влияние на всю науку. Одно время казалось, что тайны мышления и жизни будут окончательно раскрыты. Однако вскоре стало ясно, что в биологии и социологии мы сталкиваемся с еще более высоким уровнем сложности — с превращающимися, или ультрасложными, или сверхбольшими системами, настолько же отличными от обыкновенных больших систем техники и физики, насколько те отличны от малых систем.

*Превращающиеся (ультрасложные, сверхбольшие) системы* — это системы, способные к росту, развитию, самоорганизации; число элементов в них имеет порядок  $10^8$ — $10^{30}$ . Образно их можно назвать «системной органикой». Примерами могут служить живые организмы и объединения людей — человеческие общества. Конечно, речь идет не об уподоблении социальных процессов биологическим, а о том, что здесь также действуют механизмы самоорганизации, хотя и более мощные и быстродействующие. Общественные процессы справедливо считаются более сложными, чем биологические, но в целом и те и другие основаны на переработке потока информации, поступающей из окружающей среды.

Теория самоорганизации становится одним из главных направлений роста науки. «Проблема организации...», — писал Винер, — это тема глубокого социологического, равно

<sup>1</sup> См. Дж. фон Нейман. Теория самовоспроизводящихся автоматов. М., 1971, стр. 62.

как и биологического, значения, связанная с теорией информации теснейшими узами»<sup>1</sup>. Наука и техника еще не вступили в стадию превращающихся систем. Это произойдет лишь тогда, когда будет синтезировано живое вещество и будут созданы подлинно эффективные «мыслящие машины».

Превращающиеся системы можно рассматривать как динамические системы, изменяющие не только свои состояния, но и свою структуру, а тем самым и законы своего поведения. Вероятно, здесь важно специфичное и тонкое сочетание детерминизма и случайности.

Последнюю, высшую ступень системной сложности, различимую сегодня с известной уверенностью, составляют *парадоксальные системы*, или *сверхсистемы*. Это системы столь обширные и сложные, что они способны управлять пространством и временем и изменять космические формы своего бытия. Здесь мы сталкиваемся с непривычным парадоксальным строением материи, парадоксальными отношениями между частью и целым, когда часть, управляющая целым, как бы сама делает его своей частью. Рассмотренные же ранее обыкновенные динамические системы функционируют в не зависимом от них пространстве и времени. Не исключено, что существует даже несколько уровней парадоксальных систем. В свете релятивистских представлений позволительно предположить существование естественных парадоксальных систем, к которым, вероятно, принадлежит и нынешняя расширяющаяся Вселенная. В принципе возможно и создание искусственных систем такого рода, например релятивистских звездолетов.

Число элементов парадоксальной системы можно грубо оценить как  $10^{30}$ — $10^{200}$  (ср. подсчеты мировых элементов у Э. Бореля<sup>2</sup>); впрочем, эти пределы еще более приближительны и условны, чем для предшествующих уровней, ибо мы только начинаем проникать в тайны космогонии.

Некоторые зачатки парадоксальности есть уже в превращающихся системах, которые в этом плане можно рассмат-

<sup>1</sup> Н. Винер. Мое отношение к кибернетике. Ее прошлое и будущее. М., 1969, стр. 20; см. также: «Самоорганизующиеся системы». М., 1964; «Принципы самоорганизации». М., 1966; М. Антер. Кибернетика и развитие. М., 1970; М. И. Сетров. Организация биосистем. Методологический очерк принципов организации живых систем; Дж. фон Нейман. Теория самовоспроизводящихся автоматов; А. Г. Ивахненко. Системы эвристической самоорганизации в технической кибернетике. Киев, 1971.

<sup>2</sup> См. Э. Борель. Вероятность и достоверность. М., 1964.

ривать как промежуточный класс между обыкновенными и парадоксальными системами. Проявляется здесь в начальных формах и парадокс взаимоперехода части и целого («части только у трупа», гласит известный афоризм). Еще острее черты парадоксальности у человеческого мозга, моделирующего в себе весь окружающий мир и позволяющего проникать в прошлое и будущее.

Наука стадии парадоксальных систем будет гораздо сложнее возникающей науки стадии превращающихся систем. Вероятно, что прообраз такого «системно-парадоксального» мышления будет найден в диалектической логике. На таком высоком уровне обобщения мысль неизбежно должна приобретать парадоксальный характер. Это видели еще древние диалектики (ср., например, известные апории Зенона). Если обратиться к современной логике и математике, то можно указать на трудности формализации, связанные с логическими парадоксами.

Хотя системный подход воплощает в себе идеи диалектики, последняя, разумеется, не сводится к нынешней теории систем, будучи гораздо сложнее и шире последней.

### 3. ДИНАМИКА ПРОСТОГО И СЛОЖНОГО

Теперь рассмотрим подробнее динамику движения науки и техники с одних уровней сложности на другие. При этом будут высказаны некоторые гипотезы, заслуживающие, по нашему мнению, дальнейшей разработки, хотя в конечном счете они могут оказаться слишком упрощенными.

Мы уже видели, что в науке и технике данной эпохи наряду с основным, господствующим уровнем сложности содержатся *подчиненные* слои более низкой и более высокой сложности, слои, продолжающие прошлое и предвосхищающие будущее. По примеру А. Л. Тахтаджяна<sup>1</sup> это явление можно назвать *гетеробатмией*. Так, культура стадии больших предметов опирается на развитое сельское хозяйство — технику превращающихся предметов — и включает фрагменты, иногда довольно значительные, техники малых систем. На стадию малых предметов падает такое важное изобретение техники превращающихся предметов, как завоевание огня. Явно многослойны и последние стадии —

<sup>1</sup> См. А. Л. Тахтаджян. Тектология: история и проблемы. — «Системные исследования. 1971». Ежегодник. М., 1972.

малых и больших систем. Именно наличие в них зачатков идей и проектов высшей сложности позволяет делать прогнозы о том, что ожидает нас в грядущем.

Слои разной сложности постоянно находятся в движении. Верхние постепенно консолидируются и расширяются, нижние мало-помалу вытесняются, размываются, преобразуются и вытесняются верхними. Так, современное сельское хозяйство по-прежнему основано на естественных метаморфозах вещей и тем самым связано в конечном счете с техникой превращающихся предметов, но оно глубоко изменено и преобразовано применением машин, химии, автоматики — техники малых и больших систем. В промышленности продукты низшей сложности часто изготавливаются на оборудовании более высокого уровня; например, большие системы используются для массового выпуска малых систем.

Стадии научно-технического прогресса, соответствующие последовательным уровням системной сложности, образуют *естественную внутреннюю периодизацию* истории науки и техники. Научно-технический прогресс предстает перед нами как постепенное овладение все более высокой сложностью в природе. Можно думать, что анализ этих тенденций будет полезен не только при оценке современных научно-технических достижений, но и при прогнозировании и планировании будущего технологического развития<sup>1</sup>. Однако реализация внутренних тенденций науки и техники, и в частности хронология наступления стадий, зависит от конкретных исторических обстоятельств, и прежде всего от характера общественных отношений.

В каждой стадии научно-технического развития можно выделить два периода: начальный и зрелый. Переход от начального периода к зрелому представляет собой научно-технический переворот, узловой момент развития. Таковы, например, переворот на рубеже среднего и верхнего палеолита — революция стадии малых предметов<sup>2</sup>; земледельческая революция неолита; «городская революция», от которой неотделимо появление высоких цивилизаций древности<sup>3</sup>; технический переворот стадии малых систем (упрочивший

<sup>1</sup> О системной футурологии см. Г. Н. Поваров. То Daidálu pteró. — «Системные исследования». Ежегодник.

<sup>2</sup> См. М. О. Косвен. Очерки истории первобытной культуры, изд. 2-е. М., 1957.

<sup>3</sup> См. Г. Чайлд. Прогресс и археология. М., 1949; Дж. Бернал. Наука в истории общества. М., 1956. Термин «городская революция»

торжество машин), который известен как первая промышленная революция; переход к большим системам в современной технике (автоматизация производства), иногда называемый второй промышленной революцией. Последним соответствуют две революции в науке: первая, создавшая классическое естествознание, и вторая, детище XX в., внедрившая в науку стохастическое восприятие мира. Перевороты предшествующих стадий также сопровождались глубокими перестройками мышления.

Нынешняя научно-техническая революция, революция стадии больших систем, началась приблизительно в середине нашего века. Первая половина XX в. — начальный период этой стадии, и, видимо, мы уже вступаем в ее зрелый период.

Кибернетика, завершая науку больших систем, показывает нам путь в будущее — к науке превращающихся систем. Сейчас трудно сказать, будет ли завтрашняя теория самоорганизации частью кибернетики или самостоятельным направлением, но их связь и преемственность не вызывают сомнения. Необходимы *новые обобщения и синтезы*, сопоставляющие и сближающие кибернетику с молекулярной биологией, психологией, социологией, этикой, теорией ценностей и т. д., синтезы, которые откроют новые подходы и точки зрения.

Стадия превращающихся систем, по-видимому, принесет много глубоких перемен в науке и практике. В частности, можно ожидать «биологической революции» — перестройки человеком своего организма и своих способностей<sup>1</sup>. Тем большее сулит овладение сверхсистемами.

Было бы также интересно проследить метаморфозы сложности в природе и создать своего рода *естественную историю систем*. Здесь мы видим обширное и заманчивое поле работы, где многое остается неясным. Вселенная бесконечно сложна и диалектически текуча. В ней существуют сразу все уровни сложности, но вместе с тем существует и движение систем между этими уровнями. Одни системы, развиваясь, увеличивают свою сложность, другие теряют ее. Сложность может также концентрироваться и рассеиваться.

обозначает процесс возникновения городов и городской жизни. Мы рассматриваем технические аспекты этого переворота.

<sup>1</sup> Ср. Г. Н. Поваров. Норберт Винер и его «Кибернетика». — Н. Винер. Кибернетика; А. Ч. Кларк. Черты будущего. М., 1966; П. Л. Капица. Будущее науки. — «Наука о науке». М., 1966.



Парадоксальные космические системы выделяют из себя ряд более простых и устойчивых образований, таких, как галактики, звезды, планеты, твердые оболочки планет. Затем в этих простых системах начинается встречное движение, в ходе которого возникает ультрасложная жизнь и разум и которое, наконец, становится историей завоевания сложности человеком. Это встречное движение начинается на границе простого и сложного — в геосфере планет.

Проблема сложности в природе, технике и обществе требует глубоких и интенсивных исследований. Нам трудно сейчас предвидеть их результаты, но эти исследования составляют необходимую предпосылку решения многих теоретических и практических вопросов и могут принести значительную пользу в познании научно-технического прогресса и управлении им.

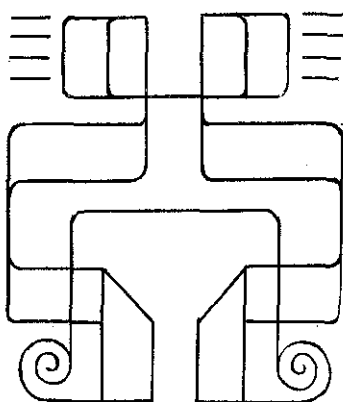
Для теории систем существование различных уровней сложности означает, что она сама должна быть *многослойной*, иметь различные математические варианты. Когда теорию систем противопоставляют обобщенной теории цепей<sup>1</sup>, речь идет именно о новом скачке — атаке на ультрасложность; для малых и больших систем нынешняя теория кажется в общем адекватной. Вместе с тем, несомненно, изучение парадоксальных систем принесет в будущем новые трудности. Тем не менее, видимо, возможна и какая-то математическая теория системной сложности, которая уточнила бы нашу эмпирическую шкалу и расширила бы понимание внутренней природы систем.

<sup>1</sup> М. D. Mesarovič. Development of Mathematical Theory of General Systems. — «XIII International Congress of the History of Sciences». Moscow, 1971. В этом докладе Месарович высказывает свое несогласие с некоторыми взглядами Заде, хотя последний отмечает специфику живых систем и потребность для их исследования в новом аппарате. Отсюда его идея логики расплывчатых понятий, математики «размытых», «диффузных» величин (ср. гл. IV первой части и гл. IV третьей части). Упомянем также «небулярную логику» В. Т. Кулика (В. Т. Кулик. Современная теория организации систем — системология. Киев, 1971).

# ИНФОРМАЦИЯ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

---

III



Глава I	
«ПРИРОДА» ИНФОРМАЦИИ	175
Глава II	
О ЛОГИКО-СЕМАНТИЧЕСКИХ ТЕОРИЯХ ИНФОРМАЦИИ	195
Глава III	
ИНФОРМАЦИЯ И СОЗНАНИЕ	231
Глава IV	
АЛГОРИТМ — ПРЕДПИСАНИЕ К ПЕРЕРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ	244

## Глава I

### «ПРИРОДА» ИНФОРМАЦИИ

#### 1. О РАЗВИТИИ ПОНЯТИЯ ИНФОРМАЦИИ

Математическая теория информации достаточно молода. Она стала самостоятельной, признанной научной дисциплиной лишь в конце 50-х годов нашего века, когда появились работы Н. Винера и К. Шеннона. Главным источником теории информации была техника связи, стохастическая (вероятностная) в своей основе. Немалую роль сыграли и другие приложения теории вероятностей. В целом теория информации явилась завершающим звеном в формировании современного стохастического подхода в естествознании.

Американский инженер Р. Хартли (1928) определял меру информации, отправляясь от задач ее передачи, а английский математик Р. А. Фишер (1938) ввел аналогичную точную меру для нужд прикладной статистики<sup>1</sup>. Физик Э. Шредингер (1945) наметил термодинамическое истолкование информации как отрицательной энтропии<sup>2</sup>. В подготовку теории информации внесли свой вклад и другие ученые, в том числе представители отечественной науки В. А. Котельников, А. Н. Колмогоров, П. А. Козуляев и др.

Н. Винер и К. Шеннон показали фундаментальное значение понятия информации для кибернетики и дали толчок математической разработке проблемы<sup>3</sup>. Влияние работ Шеннона было настолько сильным, что статистическую теорию информации нередко называют шенноновской. С тех пор теория информации превратилась в плодотворное направление, привлекающее к себе значительные научные силы

<sup>1</sup> См. Р. Хартли. Передача информации. — «Теория информации и ее приложения». М., 1959; Р. А. Фишер. Статистические методы для исследователей. М., 1961.

<sup>2</sup> См. Э. Шредингер. Что такое жизнь с точки зрения физики? М., 1947.

<sup>3</sup> Мы имеем в виду прежде всего опубликованные в 1948 г. «Кибернетику» Н. Винера и «Математическую теорию связи» К. Шеннона (см. К. Шеннон. Работы по теории информации и кибернетике. М., 1963).

во многих странах мира, а ее понятия и методы проникли в самые различные науки о живой и неживой природе, обществе и познании, не говоря уже о технических приложениях.

Вместе с тем возник вопрос о *философском осмыслении* информационного подхода, о его значении для диалектико-материалистической картины мира и места человека в нем. Вопрос этот сложен, имеет много аспектов и требует глубокого методологического анализа ряда проблем современной науки.

Теория информации впервые обратила внимание на *совершенно новое свойство, новую сторону* материальных объектов. Понятие информации, отражающее эту новую для науки сторону, в настоящее время переросло в *общенаучное понятие*.

Перерастание тех или иных понятий, первоначально возникших в некоторых частных областях знания, в понятия общенаучного характера и содержания представляет собой интересное явление в современной науке<sup>1</sup>. К числу таких понятий, характерных для науки середины XX в., относятся наряду с понятием информации такие понятия, как «алгоритм», «знак», «модель», «изоморфизм», «обратная связь», «симметрия» и др. Мало уступая философским понятиям по своей общности, общенаучные понятия отличаются тем, что их можно выразить в понятиях, которые уже непосредственно употребляются в строго построенных теориях, можно эксплицировать в терминах математики, теоретической кибернетики, логики. Известно, например, что содержательное (неуточненное, интуитивное<sup>2</sup>) понятие алгоритма эксплицируется в точном понятии алгоритма той или иной теории алгоритмов, интуитивное понятие симметрии — в математической теории групп. Рассматриваемые понятия общенаучны не только потому, что применяются в широком спектре предметных областей (это, конечно, существенное обстоятельство), а прежде всего потому, что они (разумеется, с различной степенью полноты) уточняются средствами наук, пользующихся *строгими языками* математики, математических кибернетики и логики и т. п. Именно это придает им эффективность:

<sup>1</sup> См. Б. В. Бирюков. Кибернетика и методология науки; В. С. Готт, А. Д. Урсул. Общенаучные понятия и их роль в познании. М., 1975.

<sup>2</sup> Термин «интуитивное» употребляется здесь в смысле противоположного формальному.

превращает построенные для их уточнения или с их существенным участием теории в источник *эвристических приемов*, применимых зачастую далеко за пределами их генезиса<sup>1</sup>.

Поскольку общенаучные понятия используются в различных областях, вместе с ними в эти области входят и методы соответствующих теорий. При этом как сами эти понятия, так и уточняющие их теории часто подвергаются необходимым модификациям (трансформация понятия «алгоритм» в педагогике в понятие «предписание алгоритмического типа»; см. гл. IV данной части).

Все это многое объясняет в развитии теорий информации и их приложений.

Уточнение понятия информации, сделанное в рамках шенноновской статистической теории связи, было далеко не исчерпывающим. В этом плане ситуация с «информацией» оказалась гораздо более сложной, чем, например, с понятием алгоритма. Известно, что это понятие уже в первых теориях алгоритмов — Черча, Поста и Тьюринга получило достаточно полную экспликацию. Между тем неполнота уточнения понятия информации в шенноновской теории для ряда психологических, социологических, кибернетических и иных задач была осознана очень рано. Это и привело к работам по теории семантической информации, к исследованиям представлений о ценности информации для получателя, к разработкам в области «документальной информации»<sup>2</sup> и т. п.

Область исследования общенаучных понятий как интуитивно-содержательных научных представлений, в гносеологическом плане предшествующих своим экспликациям, составляет преимущественно поле деятельности философии. Однако философской «мысли здесь существенно помогают те дисциплины, в рамках которых строятся соответствующие экспликации. Если говорить о понятии информации, это означает, во-первых, что его анализ как общенаучного понятия есть *философский анализ*; во-вторых, что этот анализ должен опираться на *результаты существующих теорий информации*. В задачу анализа входит рассмотрение вопроса

<sup>1</sup> См. Б. В. Бирюков, Г. Вейль и методологические проблемы науки; Г. Вейль. Симметрия.

<sup>2</sup> Следует отметить, что первые попытки уточнения понятия документальной информации были сделаны в работах по теории журналистики (см. об этом В. Г. Афанасьев, А. Д. Урсул. Социальная информация. — «Вопросы философии», 1974, № 10).

об отношении уточняющих понятий — экспликатов информации к содержательному общенаучному понятию информации (и понятию информационного процесса).

На вопросах содержательно-философского анализа понятия информации мы и сосредоточим свое внимание.

## 2. О МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЭКСПЛИКАЦИЯХ ФЕНОМЕНА ИНФОРМАЦИИ

Первоначальное представление об информации естественным образом связывалось со сведениями, сообщениями. Уже к середине нашего века бурное развитие радио, телефона, телеграфа, телевидения и других средств связи вызвало потребность в количественной характеристике передаваемых сообщений. Ответом на эту потребность и явилась статистическая, шенноновская теория информации. В этой теории был совершен переход от «смутного» представления об информации как о сведениях того или иного рода к точному понятию «количества информации». Это понятие определялось на вероятностной основе.

Как известно, понятие вероятности применяется для описания ситуаций, содержащих неопределенность (при этом неопределенность может рассматриваться присущая как знаниям о некотором объекте или положении вещей, так и самому объекту). Если сообщение не дает ничего нового, т. е. не снимает (хотя бы частично) неопределенности, то с позиций рассматриваемой теории считается, что в нем не содержится информации. Информация — это лишь такие сведения, которые уменьшают или снимают существовавшую до получения их неопределенность. Уменьшение неопределенности всегда связано с выбором (отбором) одного или нескольких элементов (альтернатив) из некоторой их совокупности. Такая взаимная обратимость понятий вероятности и неопределенности и послужила основой использования понятия вероятности для измерения степени неопределенности в статистической теории информации. Детальнее математическое осуществление этой идеи заключается в следующем.

Пусть исходная неопределенность состоит в возможности выбора из некоторого числа  $N$  равноправных гипотез, и сообщение устраняет эту неопределенность, указывая на одну из них. Мера его «содержательности» (количество информации  $I$ ) окажется в этом случае функцией от  $N$ , причем к этой функции естественно предъявить требование

аддитивности, состоящее в том, что при поступлении последовательных сообщений количество информации должно складываться; это выразится условием  $I(N_1 \cdot N_2) = I(N_1) + I(N_2)$ <sup>1</sup>.

Положив  $N_1 = x$ ,  $N_2 = 1 + \frac{h}{x}$ , получим равенство

$$I(x+h) = I(x) + I\left(1 + \frac{h}{x}\right), \quad \text{откуда} \quad \frac{I(x+h) - I(x)}{h} = \frac{I\left(1 + \frac{h}{x}\right)}{h}.$$

Разделим числитель и знаменатель правой части на  $x$  и введем обозначение  $\frac{h}{x} = y$ . Тогда будем иметь:

$$\frac{I(x+h) - I(x)}{h} = \frac{1}{x} \frac{I(1+y)}{y}.$$

Теперь перейдем к пределу при  $h \rightarrow 0$ , в результате чего и  $y \rightarrow 0$ . Слева по определению получится производная:

$$I'_x = \frac{1}{x} \lim_{y \rightarrow 0} \frac{I(1+y)}{y}.$$

Заметим, что функция  $I$  либо дифференцируема при любом  $x$ , кроме нуля, либо не имеет производной ни в одной точке — это зависит от существования или несуществования конкретного предела  $\lim_{y \rightarrow 0} \frac{I(1+y)}{y}$ . Из интуитивных соображений мы можем утверждать, что нам подходят только гладкие функции. Тогда указанный предел существует; обозначив его через  $A$ , мы получим  $I'_x = \frac{A}{x}$ , откуда

$$dI = A \frac{dx}{x} \quad \text{и}$$

$$I(x) = A \ln x + B. \quad (1)$$

Для отыскания константы  $B$  учтем, что предел величины  $\frac{I(1+y)}{y}$  может существовать только в том случае, если числитель стремится к нулю вместе со знаменателем (иначе

<sup>1</sup> Смысл этого условия достаточно прост: указать одну из  $N_1 N_2$  гипотез можно либо сразу (тогда количество информации выражается левой частью равенства), либо в два приема: указанием вначале одной из групп в  $N_2$  гипотез (таких групп  $N_1$ , и количество информации выражается первым слагаемым правой части), а затем окончательной фиксацией единственной гипотезы из этой группы (эта дополнительная информативность будет выражаться вторым слагаемым).

получится бесконечно большая величина). Это значит, что, поскольку функция  $I$  непрерывна,  $I(1) = 0$ . Положив в (1)  $x = 1$ , получим  $B = 0$ . Итак,

$$I(x) = A \ln x. \quad (2)$$

Для отыскания константы  $A$  нужны дополнительные *содержательные соображения*, т. е. «физическая гипотеза». Ею может быть соглашение, что при сообщении, разрешающем альтернативу (ответ «да» или «нет»), передается единица информации. Следовательно,  $I(2) = A \ln 2 = 1$ , откуда  $A = \frac{1}{\ln 2}$ . Подставим это в (2)  $I(x) = \frac{\ln x}{\ln 2} = \log_2 x$ . Соотношение, более устраивающее нас по своей форме, будет таково:

$$I(N) = \log_2 N; \quad (3)$$

его называют *формулой Хартли*. Поскольку при  $N$  равноправных гипотез вероятность  $p$  каждой из них есть  $1/N$ , этой формуле можно придать и другой вид:

$$I(p) = -\log_2 p. \quad (4)$$

Ситуация, взятая в более сложном случае, такова. Источник передает элементарные сигналы  $k$  различных типов. Проследим за достаточно длинным отрезком сообщения. Пусть в нем имеется  $N_1$  сигналов первого типа,  $N_2$  сигналов второго типа, ...,  $N_k$  сигналов  $k$ -го типа, причем  $N_1 + N_2 + \dots + N_k = N$  (общее число сигналов в наблюдаемом отрезке). Введем обозначения  $f_1 = \frac{N_1}{N}$ ;  $f_2 = \frac{N_2}{N}$ ; ...;

$f_k = \frac{N_k}{N}$ . Числа  $f_1, f_2, \dots, f_k$  суть *частоты* соответствующих сигналов. Предположим, что свойства источника таковы, что при возрастании длины отрезка каждая из частот имеет фиксированный предел, т. е.  $\lim_{N \rightarrow \infty} f_i = p_i, (i = 1, 2, \dots, k)$ .

Числа  $p_i$  будем считать *вероятностями* сигналов. Поставим вопрос об удельной информативности источника, т. е. о среднем количестве информации, приходящемся на один сигнал.

Пусть пришел сигнал  $i$ -го типа. Поскольку его вероятность равна  $p_i$ , согласно формуле (4), он принес  $-\log_2 p_i$  единиц информации. Возьмем отрезок сообщения длиной в  $N$  символов, где  $N$  велико. Тогда  $i$ -й сигнал встретится в нем примерно  $N p_i$  раз, и общая информация, доставленная сигналами этого типа, будет равна  $-N p_i \log_2 p_i$ .



То же относится к сигналам любого другого типа, поэтому полное количество информации, доставленное отрезком из  $N$  сигналов, будет примерно равно  $-N \sum_{i=1}^k p_i \log_2 p_i$ . Чтобы получить удельную информацию, нужно это число разделить на  $N$ . При неограниченном росте  $N$  приблизительное неравенство перейдет в точное, и мы получим асимптотическое соотношение:

$$I = - \sum_{i=1}^k p_i \log_2 p_i. \quad (5)$$

Это формула Шеннона. Она позволяет легко ответить на вопрос, при каком соотношении частот источник будет обладать наибольшей информативностью. Рассмотрим сначала случай  $k = 2$ . Тогда  $I = -p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2$ , причем  $p_1 + p_2 = 1$ . Обозначим  $p_1$  через  $x$  (тогда  $p_2 = 1 - x$ ), а также для удобства дифференцирования вернемся к натуральному логарифму:

$$I(x) = -[x \ln x + (1-x) \ln (1-x)] \log_2 e.$$

Для отыскания максимума приравняем производную нулю:

$$\begin{aligned} I'x &= -[\ln x - \ln (1-x)] \log_2 e = 0; \\ \ln x &= \ln (1-x); \quad x = 1-x; \quad x = 1/2. \end{aligned}$$

То, что этот экстремум является именно максимумом, можно установить, найдя вторую производную в точке  $x = 1/2$ . Полученный результат означает, в частности, что из свидетеля извлекается наибольшее количество информации (при строго определенном количестве вопросов, на которые он дает ответ «да» или «нет») тогда, когда положительные и отрицательные ответы встречаются одинаково часто. Это можно было предвидеть, так как ясно, что выгодно каждый раз устанавливать принадлежность события к одному из двух «равноправных» классов (например, спрашивать: «какая карта — красная или нет?», а не «является ли карта дамой пик?»), а именно в этом случае вероятность каждого из ответов равна 0,5.

Если все время поступает лишь один из двух возможных сигналов, то  $p_2 = 0$ , и выражение  $p_2 \log_2 p_2$  теряет смысл. Однако разумно рассматривать этот случай как предельный при  $p_2 \rightarrow 0$ . Известно, что  $\lim_{x \rightarrow 0} x \ln x = 0$ , кроме того,  $\log_2 1 = 0$ ; значит, в этом случае  $I = 0$ . Это вполне понятно,

поскольку однообразный сигнал не несет никакой информации.

Рассмотрим общий случай. Максимум будем искать методом условного экстремума Лагранжа. Напишем максимизируемое выражение:

$$-[p_1 \ln p_1 + p_2 \ln p_2 + \dots + p_k \ln p_k] \cdot \log_2 e$$

и условие:  $p_1 + p_2 + \dots + p_k = 1$ ,

а затем составим функцию Лагранжа:

$$L(p_1, p_2, \dots, p_k) = -\log_2 e \cdot (p_1 \ln p_1 + \dots + p_k \ln p_k) + \lambda (p_1 + \dots + p_k).$$

Приравнявая нулю все частные производные функции  $L$ , получим:

$$\frac{\partial L}{\partial p_i} = -\log_2 e \cdot (\ln p_i + 1 + \lambda) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k),$$

откуда  $\ln p_i = -(1 + \lambda)$  для всех  $i$ . Поскольку правая часть постоянна, мы приходим к выводу, что все вероятности должны быть равны между собой.

Это — важный результат математической теории связи, подсказывающий способы *оптимального кодирования*. Когда по какой-то линии связи пересылается, скажем, языковой текст, часто по этой линии идут сигналы совсем другой структуры, чем исходные, т. е. происходит зашифровка, или кодирование, букв. Примером служит пересылка по проводу телеграммы с использованием азбуки Морзе. Как выгоднее всего зашифровать буквы или их сочетания, чтобы по линии прошло наибольшее количество информации за единицу времени? Нужно учесть естественные частоты букв языка и обозначить буквы так, чтобы все типы элементарных сигналов, идущих по каналу связи, были представлены равновероятно, т. е. нагружать информацией все типы сигналов равномерно.

Проведенное нами рассуждение отражает лишь наиболее простую часть теории Шеннона. Следующая ее часть связана с рассмотрением не только отдельных сигналов с вероятностями  $p_i$ , но и двойных, тройных и т. д. сочетаний сигналов с соответствующими вероятностями их появления в сообщении. Формула для удельной информации здесь оказывается аналогичной формуле (5). Затем рассматривается новое явление — возможность передачи информации по каналу с *шумом*, т. е. с помехами, приводящими к искажению или исчезновению отдельных сигналов.

Строгая математическая теория канала с шумом, которую мы не будем рассматривать, указывает величину необходимой избыточности при данном уровне шума и подсказывает пути оптимального кодирования сообщений для передачи по такому каналу. Результаты этой теории являются «жемчужиной» шенноновской теории информации. Они оказывают сильное влияние и на другие области знания. Например, выдвинутый У. Эшби «принцип необходимого разнообразия», применяемый к широкому кругу процессов, является прямым обобщением шенноновских результатов для канала с шумом. Этот принцип, грубо говоря, состоит в том, что автоматический корректор искажаемого сообщения должен быть не менее сложным, чем источник шума.

Наряду с «неопределенностной» есть *термодинамическая интерпретация статистического понятия информации*, когда последняя рассматривается как *отрицательная энтропия* (негэнтропия), как разнообразие, «отбираемое» системой, например живым организмом, из окружающей среды для организации своих внутренних процессов. Это дает основание для различения информации *свободной*, рассматриваемой независимо от ее физического воплощения, и *связанной*, отнесенной к микросостояниям какой-либо системы<sup>1</sup>. Большинство приложений теории информации, в том числе к технике связи и управления, имеет дело с расчетом свободной информации, но в физике, химии, биологии термодинамическое толкование представляет значительный интерес, хотя и ставит перед нами ряд тонких и сложных методологических вопросов.

Статистическое понятие информации и основанная на нем мера ее количества выражают прежде всего «структурно-синтаксическую» сторону передачи информации, т. е. отношения сигналов, знаков, сообщений и т. д. друг к другу. С ним поэтому связано определенное огрубление идеи информации — отвлечение от смысла, ценности для получателя, разнородности и других характеристик передаваемых сообщений. Естественно поэтому, что статистическая теория адекватна далеко не всем коммуникативным ситуациям. Согласно статистической теории, получатель информации (адресат) должен располагать определенным набором, «алфавитом» гипотез. Но почему приобретение знаний,

<sup>1</sup> См. Л. Бриллюэн. Наука и теория информации. Н. Винер в книге «Кибернетика» использует обе эти концепции информации, но не разделяет их достаточно ясно.

получение сообщений, сведений должно обязательно предполагать предварительное построение такого «алфавита»? Это не очень ясно. Ведь нередко сообщения о том, о чем получатель и не догадывался и по поводу чего никаких гипотез не выдвигал. Очевидно, статистическая теория формализует не все содержание даже достаточно грубого представления об информации.

Противоречие между трактовкой информации, вытекающей из статистической теории, и тем, более широким ее пониманием, которое диктуется многими коммуникативными и гносеологическими ситуациями, привело к появлению иных подходов в теории информации<sup>1</sup>. Один из них — комбинаторный, при котором количество информации трактуют как функцию от числа элементов (и их комбинаторных отношений) в их совокупностях; при этом какие-либо статистические соображения не используются. Другие, не выходя за пределы «аппаратной» стороны теории Шеннона, придают теории информации иное освещение, существенное для некоторых приложений (в частности, в науках о жизни); таков вариант теории информации, основанный на идеях топологии, в котором количество информации определяется на основе топологических свойств (например, различий вершин графов). В 1965 г. А. Н. Колмогоров ввел принципиально новое, алгоритмическое определение количества информации.

Идея *алгоритмического подхода* в теории информации заключается в том, что количество информации, содержащееся в одном объекте относительно другого, определяется как минимальная длина программы, позволяющая однозначно преобразовать один объект (множество) в другой объект (множество). Программа выражает *сложность* перехода от одного объекта к другому; она измеряет, таким образом, степень тождества (или степень различия) двух объектов, выражает эту степень количеством команд, инструкций о выполнении в определенном порядке системы операций, переводящих один объект в другой.

Если при статистическом подходе аппарат теории информации строится на базе теории вероятностей, то, как показал

<sup>1</sup> На философский анализ нестатистических теорий информации обращается все большее внимание: G. Klaus, *Kybernetik und Erkenntnistheorie*. Berlin, 1966; «Методологические проблемы кибернетики». Материалы к Всесоюзной конференции, т. 1; А. Д. Урсул. Информация. Методологические аспекты.

А. Н. Колмогоров, можно поступить и наоборот: на базе алгоритмического определения количества информации можно строить теорию вероятностей. Случайными событиями в подобном «информационном» построении теории вероятностей считаются такие, которые не содержат информации друг о друге. Отсюда последовательность же, все буквы которой одинаковы, не является случайной: можно сказать, что первая буква содержит всю информацию о всех других элементах последовательности.

Колмогоровская схема построения теории вероятностей подчеркнула, что ни информация, ни вероятность не являются предшествующими друг другу понятиями; на них надо, естественно, смотреть как на «равноправные» понятия, отображающие взаимосвязанные между собой свойства объективной реальности.

### 3. ИНФОРМАЦИЯ, РАЗНООБРАЗИЕ, ОТРАЖЕНИЕ

Ни одну из упомянутых математических трактовок информации нельзя считать отражающей полностью суть дела; каждая из этих трактовок плодотворна в определенной сфере. Возникает вопрос о выборе такого истолкования (или истолкований) идеи информации, которая, согласуясь в общем и целом с интуитивно-содержательными представлениями об информации (скажем, как сведений, сообщений), не расходилась бы с имеющимися уточнениями этого понятия (и его различных аспектов) в существующих «теориях информации». Можно считать, что такие трактовки естественно возникнут, если попытаться разобраться в той «сети» категорий, с «узлами» которой связаны имеющиеся в науке представления об информации. Это соответствует подходу к научным понятиям, который имел в виду Ф. Энгельс, когда писал, что понятия необходимо рассматривать «в их историческом, соответственно логическом, процессе образования»<sup>1</sup>.

Можно выделить две наиболее общие трактовки содержательной идеи информации, согласующиеся (в целом) с различными ее экспликациями. Это — истолкование информации с помощью понятия *неопределенности* и трактовка природы информации на основе понятия *разнообразия*

<sup>1</sup> К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. 25, ч. 1, стр. 16.

(соответственно, философской категории различия) и категории отражения.

Смысл первой трактовки ясен из того изложения, которое было дано в предшествующих параграфах. Теперь обратимся ко второй трактовке. Предварительно, однако, объясним причину того внимания, которое будет уделено «разнообразностной» интерпретации информации. Такая интерпретация плодотворна в том плане, что позволяет хорошо показать *объективность* того феномена, который отображается в идее информации и теории информации. В следующей главе, когда речь пойдет о семантических и прагматических теориях, мы будем иметь в виду идею информации как *устраненной неопределенности*, так как эта идея, по-видимому, более адекватна гносеологическому, чем «онтологическому» аспекту информации.

«Разнообразностная» трактовка информации<sup>1</sup> означает переход от истолкования информации как «снятой» неопределенности к ее трактовке как «снятой» неразличимости. Считается, что информация есть там, где имеется (дано или выявляется) *разнообразие, неоднородность*. Единицей измерения информации можно считать элементарное различие, т. е. различие между *двумя* объектами в каком-либо одном фиксированном свойстве. Чем больше в некотором объекте отличных (в строго определенном смысле) друг от друга элементов, тем больше этот объект содержит информации. Информация есть там, где присутствует различие между хотя бы двумя элементами, и ее нет, если элементы неразличимы.

Концепция разнообразия в середине 50-х годов в развернутой форме была изложена У. Р. Эшби; при этом он оперировал материалом статистической теории информации. В те же годы аналогичными по сути дела установками при построении топологической теории информации пользовался Н. П. Рашевский. Суть концепции разнообразия, по Эшби, заключается в утверждении, что теория информации изучает процессы «передачи разнообразия» по каналам связи, причем «информация не может передаваться в большем количестве, чем это позволяет количество разнообразия»<sup>2</sup>.

В отечественной философской литературе было показано, что не только статистическая теория, но и невероятностные,

<sup>1</sup> См. А. Д. Урсул. Информация. Методологические аспекты. М., 1971; Б. В. Бирюков, А. Д. Урсул. К проблеме объективности информации. — «Методологические проблемы кибернетики». Материалы к Всесоюзной конференции, т. 1.

<sup>2</sup> У. Р. Эшби. Введение в кибернетику, стр. 248.

нестатистические варианты теории информации могут быть интерпретированы в рамках концепции разнообразия<sup>1</sup>. Получающийся в результате этого «расширенный» вариант концепции разнообразия позволяет соответствующим образом истолковать известные математические подходы в теории информации. Применимость концепции разнообразия в математических вариантах теории информации предполагает его измеримость (например, использование теоретико-множественной теории меры). «Классическая» схема процесса передачи информации в свете данной концепции принимает вид: передающее устройство — это носитель передаваемого разнообразия, а объект, которому передается разнообразие, — «приемное устройство».

В такой трактовке «передача разнообразия» выступает как понятие, возникшее на почве информационно-кибернетического подхода к исследованию его объектов. Однако после возникновения кибернетики и теории информации была быстро осознана связь информационных процессов с явлением отражения. Ныне философское осмысление понятия информации обычно осуществляется на основе категории отражения (работы И. Б. Новика, В. С. Тюхтина, Б. С. Украинцева, А. Д. Урсула и др.)<sup>2</sup>.

В. И. Ленин в книге «Материализм и эмпириокритицизм» писал: «...логично предположить, что вся материя обладает свойством, по существу родственным с ощущением, свойством отражения...»<sup>3</sup> Эту идею обычно истолковывают таким образом: свойство отражения, будучи атрибутом материи, заключается в том, что в результате взаимодействия объектов особенности одного «воспроизводятся» в особенностях другого. Это воспроизведение можно рассматривать как «передачу разнообразия». С этих позиций понятие информации можно охарактеризовать как разнообразие одного объекта относительно другого.

Если использовать понятие отражения, то информацию можно понять как *отраженное разнообразие*, а *информационный процесс* — как *отражение разнообразия*. Отраженное разнообразие порождено, «передано» отражаемым объектом и получено, воспринято, «усвоено» отражающим объек-

<sup>1</sup> См. А. Д. Урсул. Нестатистические подходы в теории информации. — «Вопросы философии», 1967, № 2; его же. Информация. Методологические аспекты.

<sup>2</sup> См. А. Д. Урсул. Отражение и информация. М., 1973.

<sup>3</sup> В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 18, стр. 91.

том. Это «усвоение» запечатлевается в структуре, содержании последнего.

Что же касается представления об информации как о разнообразии, заключенном в структуре объекта, то оно может считаться частным случаем трактовки информации как отраженного разнообразия. Здесь можно использовать различие между «потенциальной» (или «структурной») и «актуальной» информацией. Первая есть разнообразие элементов и связей самого объекта, его «структура», вторая — это разнообразие, переданное данному приемнику информации, т. е. «структура», им отраженная. Для каждого информационного процесса информация, принятая, «актуализированная» данным приемником, всегда меньше потенциальной, т. е. той, которая потенциально заключена в структуре передатчика<sup>1</sup>.

«Разнообразностная» трактовка информации находится, по-видимому, в согласии с «общежитейским» представлением об информации как о сведениях или сообщениях (сообщения всегда что-то отражают — события, явления и т. п.). Согласуется оно и с другими концепциями информации, например с «алгоритмическим» определением количества информации; по А. Н. Колмогорову программа (алгоритм) является носителем информации об объекте, конструируемом по этой программе.

Однако «разнообразностное» истолкование информации не следует противопоставлять иным возможным обобщенным ее трактовкам. Это подтверждается, например, тем, что семантико-прагматическим теориям, как будет ясно из следующей главы, более адекватна идея информации как *снятой неопределенности*.

Понимание информации как отраженного (или могущего быть отраженным) разнообразия проясняет вопрос о соотношении «информации» и «отражения». «Информация» («передача информации» как процесс) и отражение (акт, процесс) не синонимы. Идея информации через раскрывающий ее комплекс понятий, таких, как «количество информации», «энтропия источника сообщений», «переработка информации», «кодирование» и т. п., служит углублению

<sup>1</sup> Ср. известный «закон необходимого разнообразия» Эшби (см. У. Р. Эшби. Введение в кибернетику, стр. 293—302).

К данному вопросу можно подойти и по-иному: взглянуть на информацию «саму по себе», т. е. на разнообразие, заключенное в структуре объекта, как на результат «самоотражения» — отражения объекта «в себя». См. А. Д. Урсул. Отражение и информация.



философских представлений об отражении. Открывается путь описания процессов отражения, издавна анализировавшихся философами, средствами математических теорий, путь их моделирования на технических устройствах, создаваемых человеком. Но отражательные процессы (это особенно резко выступает на ступени сознания человека) вряд ли можно исчерпать схемой «передачи разнообразия». В них имеются моменты, связанные с природой *живого, психики, сознания*. Эти моменты обнаруживают себя при исследовании качественных сторон информации.

#### 4. КАЧЕСТВЕННАЯ СТОРОНА ИНФОРМАЦИИ. «БИОЛОГИЧЕСКИЕ» ТЕНДЕНЦИИ

Многоаспектность явления информации находит свое выражение в дальнейшем развитии теории информации *в широком смысле*, связанном с потребностями формализации научного знания и с прогрессом кибернетики.

Развитие метатеоретических исследований в современной науке, являясь основой формализации соответствующих областей научного знания, привело к концепциям логического синтаксиса, семантики и прагматики. В процессе разработки и применения этих концепций возникает необходимость количественного анализа логической структуры, смысла и ценности научной информации. Развитие кибернетического моделирования требует разработки средств отображения семантического и прагматического аспектов информационных процессов. Кроме того, наблюдается развитие специфических информационных концепций в рамках биологических и предбиологических теорий.

Таковы причины возникновения семантических теорий и прагматических концепций информационных процессов, отражающих качественный аспект информации — наличие содержания или смысла (семантика) — и ценностные свойства на уровнях живого и (или) мыслящего (прагматика).

Развитие теории информации в широком смысле можно охарактеризовать в терминах *синхронического* и *диахронического* (генетического) подходов. При первом методологический анализ направлен на *существующие* теории «качества» информации, носящие *формально-математический* характер. При втором подходе внимание сосредоточено на том, как исторически развивались семантические и ценностные свойства информации.

Сначала о первом подходе. Современные математические методы в теории информации, среди которых наиболее развитыми являются статистический и комбинаторный, с семиотической точки зрения описывают лишь структуру сообщений как конфигураций (последовательностей) знаков — букв. Эти методы отвлекаются от семантических и прагматических свойств информации, от ее смысла (значения) и ценности. Такое отвлечение плодотворно в технике связи, в решении вопросов оценки «сложности» объектов, определения мощности потоков информации при ее переработке, но оно становится чрезмерным в случае «человеческой» информации, когда качественная сторона сообщений выдвигается на первый план.

Семантическая концепция информации возникла как попытка измерения смысла сообщений в форме *суждений*, являющихся носителями *знания* и *понимаемых* человеком. Если для теории передачи сообщений в духе Шеннона наиболее важным оказался количественный анализ знаковой структуры сообщений (измерение разнообразия), то для семантической теории главными явились содержательные, смысловые характеристики.

Известно, что в процессах коммуникации количественный аспект информации менее существен, чем сохранение смысла (содержания) сообщений. Но сохранение и воспроизведение содержания предполагает возможность его измерения, выявления «количества смысла», именно этим и занимаются семантические теории информации. Однако уже беглый взгляд на коммуникативные процессы в обществе (науке, управлении и т. п.) показывает, что *помимо* «смысла» информация обладает для ее получателя *полезностью*, потому что может быть *использована*. Ценность (полезность) информации является ее прагматическим свойством, т. е. свойством, влияющим на поведение, на принятие решений тем или иным приемником информации. Иначе говоря, ценность информации влияет на процессы *управления* в системе (приемнике), так что можно говорить о первостепенной важности ценностного аспекта информации в управлении, в частности социальном. Для управления важно не всякое разнообразие, а только такое, которое полезно, значимо для системы; существенно не всякое снятие неопределенности, а только такое, в результате которого возникает знание, могущее служить руководством к действию. Поэтому из всего разнообразия сигналов, которые к ней поступают, кибернетическая система

отбирает именно ценное, полезное разнообразие, которое ведет к осуществлению *цели* управления.

В настоящее время существует несколько подходов к измерению *ценности информации*. Одним из первых на возможность ее измерения обратил внимание А. А. Харкевич<sup>1</sup>, который считал, что величину ценности информации можно выражать через приращение вероятности достижения цели после получения информации. Помимо этого подхода, можно отметить варианты теории ценности информации, связанные с теорией игр и решений (исследованием операций), с теорией оптимального управления и др. Не останавливаясь на описании различных прагматических подходов к информации, укажем на их общие черты. Согласно этим подходам *ценность* информации измеряется через ее *количество* (хотя эта зависимость может иметь различные формы, может вводиться отрицательная мера ценности и т. д.) и понятие ценности связывается с понятием *цели*. В общем случае при одном и том же количестве информации мера ее ценности оказывается зависимой и от «субъекта» (воспринимающей информацию системы управления) и от целей управления.

Переходя к *диахроническому* подходу, отметим, что наибольший материал здесь накоплен в связи с изучением становления *живых систем*. И это не случайно. Как классическая теория информации, так и различные иные теории, в том числе семантические и прагматические, плохо работают или совсем не работают, когда речь идет об «информационных» исследованиях биосистем. В науках о живом нередко решающее значение имеют такие качественные стороны информации, которые непосредственно вплетены в процессы жизни, а оценка именно этих сторон и является слабым местом упомянутых современных теорий информации. Нам представляется, что адекватный теоретико-информационный подход к живому как к естественным информационным системам, погруженным в «информационные» поля, только начинает вырабатываться. Об этом свидетельствуют выводы, к которым приходят исследователи, изучающие принципы возникновения, преобразования, передачи и исчезновения информации в онто- и филогенезе<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> См. А. А. Харкевич. О ценности информации. — «Проблемы кибернетики», вып. 4. М., 1960.

<sup>2</sup> См. Н. Жуков-Вережников. Теория генетической информации. М., 1966; В. А. Ратнер. Генетические управляющие системы. Новосибирск, 1966; Л. Н. Серавин. Теория информации с точки зрения биолога. Л., 1973.

Следует заметить, что сам механизм переработки генетической информации изучен довольно хорошо. Выяснено, что наследственная информация кодируется в структуре дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) в последовательности гетероциклических оснований. С помощью генетического кода информация, заключенная в ДНК, передается молекулам рибонуклеиновой кислоты (РНК), которые отображают, воспроизводят в особенностях своей структуры (в последовательности аминов) особенности ДНК. Транспортная РНК выбирает определенный аминокислотный остаток и выстраивает его вдоль матричной РНК, где между аминокислотами происходит формирование пептидных цепей, в результате чего образуется белок. Последовательность аминокислот в синтезирующемся белке, его молекулярные конфигурации передают структуру ДНК и, значит, структуру биологической системы, передающей наследственную информацию.

Как же исторически *возникла* генетическая информация? Рассматривая гипотетический путь возникновения на Земле первичной генетической информации и ее эволюцию, Н. Н. Жуков-Вережников изображает его в виде многоступенчатого процесса, который начинается с того, что в «первичном бульоне» абиогенным путем стали синтезироваться аминокислоты, нуклеотиды с более или менее наметившейся тенденцией к определенной последовательности аминокислот, и в котором генетическая информация появилась в тот момент, когда произошел *первый ферментный синтез*.

Идеи и выводы многих биологов, занимающихся генетической информацией, совпадают. В. А. Ратнер, например, считает, что молекулы ДНК нельзя рассматривать как носителей информации при отсутствии ферментов. Далее он подчеркивает случайный характер соответствия между аминокислотами и кодонами<sup>1</sup>, в результате чего первая аминокислота могла соответствовать любому кодону, а последующие — лишь неза занятым кодонам. Случайный характер перебора структур первичных полимеров явился причиной первоочередного возникновения кратчайших полипептидов и соответствующих нуклеотидов, а следовательно, и наименьших по величине кодонов. Такой наименьшей величиной кодонов оказался триплет.

<sup>1</sup> Кодоном называют линейно упорядоченную совокупность азотистых оснований, которая определяет включение отдельной аминокислоты в процессе синтеза белка.

Подвести физико-химические основы под аналогичные теоретико-информационные рассуждения пытается М. Эйген, который проводит свой анализ в рамках нелинейной статистической термодинамики. М. Эйген также исходит из того, что *эволюция должна начинаться со случайных событий*<sup>1</sup>. Но весьма существенно, что далее в основу своей теории он кладет *ценность информации*, которую определяет как «селективную ценность», выражаемую через определенные кинетические параметры, а именно через скорости образования и распада, физически определяемые по их «свободным энергиям активации», а также через «фактор качества», связанный с возможностью ветвления реакции в промежуточном состоянии (когда происходит «инструктирование»). Именно свойство «*инструктирования*» на молекулярном уровне является еще одним исходным пунктом теории М. Эйгена. Он считает, что информация «порождается» и обретает ценность в результате отбора среди специфических веществ (макроскопических функциональных структур — белков и нуклеиновых кислот) в особых абиогенных условиях (например, в восстановительной атмосфере и при наличии различных источников энергии).

М. Эйген в конечном счете приходит к выводу, что «эволюция представляется неизбежным событием, если задано присутствие определенного вещества с определенными автокаталитическими свойствами и если поддерживается такая величина потока (свободной) энергии, которая необходима для компенсирования стационарного производства энтропии»<sup>2</sup>.

Информация трактуется М. Эйгеном как некоторая функция, позволяющая различать энергетически вырожденные состояния. Первичная генетическая информация обладает свойством самовоспроизведения и обеспечивает выживание и сохранение наиболее устойчивого (неравновесного) состояния.

Мы не случайно затронули проблемы, связанные с молекулярно-биологическим уровнем живого. Чем выше по иерархии уровней живого мы будем подниматься, тем с менее изученными явлениями нам придется иметь дело. Конечно, и на более высоких уровнях организации живого ис-

<sup>1</sup> См. М. Эйген. Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул. М., 1973, стр. 13.

<sup>2</sup> Там же, стр. 185.

пользуется теоретико-информационный подход<sup>1</sup>, но пока он в основном ограничен рамками общих рассуждений либо приложениями разработанных теорий информации<sup>2</sup>.

Можно быть уверенным в том, что дальнейшее развитие приведет к обогащению существующих и возникновению новых концепций информации, что прояснится картина становления информационных процессов в природе. Существенную роль в этом будут играть теории, *формализующие феномены смысла и ценности* сообщений.

<sup>1</sup> См. А. Моль. Теория информации и эстетическое восприятие. — «Концепция информации и биологические системы»; «На пути к теоретической биологии». М., 1970; Д. Н. Меницкий, М. И. Сетров. Организация биосистем; В. А. Геодакян. О структуре эволюционирующих систем. — «Проблемы кибернетики», 1972, вып. 25; К. Черри. Человек и информация. М., 1972; В. Н. Чудаков, К. И. Кононенко. Термодинамика процессов информации и мышления. Харьков, 1973; В. В. Трубаев. Информация и проблемы высшей нервной деятельности (вероятность и условный рефлекс). Л., 1974.

<sup>2</sup> См. А. М. Вейн, В. Л. Голубев. Проблема «смысла» и «значения» в современной психотерапии. — «Научно-техническая революция и медицина». М., 1973; А. Д. Урсул. Понятие информации в биологических исследованиях. — «Методологические вопросы биокибернетики»; Г. М. Назлоян. О проблеме интуиции и некоторых ее кибернетических аспектах. — «Методологические вопросы биокибернетики». М., 1974.

## Глава II

### О ЛОГИКО-СЕМАНТИЧЕСКИХ ТЕОРИЯХ ИНФОРМАЦИИ

В данной главе мы рассмотрим логико-семантические теории и модели информации, которая трактуется здесь как характеристика определенного *знания* в плане его отношения к обозначаемому объекту и выражаемому содержанию, которое сообщается высказыванием некоторой языковой системы.

#### 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СЕМАНТИЧЕСКИХ ТЕОРИЙ ИНФОРМАЦИИ

Исходным пунктом уточнений идеи семантической (т. е. осмысленной, понимаемой) информации является логико-семантическая спецификация того подхода к информации, при котором последняя рассматривается как *уменьшение* или *устранение неопределенности*. Естественно считать, что семантическая информация высказывания определенного языка исключает некоторые «возможные миры», альтернативы, выражаемые средствами данного языка: чем больше альтернатив исключает высказывание, тем более оно семантически информативно.

Эта идея присутствует во многих вариантах логико-семантических теорий информации, в ее основных понятиях и количественных мерах. Поэтому любой логико-семантический подход в теории информации должен указать путь решения трех связанных друг с другом проблем: (1) определения «*возможного мира*» средствами применяемого языка; (2) *количественной оценки соответствующих альтернатив* (их «*взвешивания*»); (3) определения *мер семантической информации* в данном языке. Опыт более чем 20-летнего развития логико-семантических теорий при всем их внутреннем единстве обнаружил многообразие средств решения этих проблем.

Первой попыткой логико-семантического уточнения информации явилась теория Р. Карнапа и И. Бар-Хиллела<sup>1</sup>. Из нее исходит большинство последующих семантических интерпретаций понятия «информация». Карнап и Бар-Хиллел поставили цель — уточнить донаучное понятие семантической информации исходя из требований, предъявляемых ко всякой научной экспликации Карнапом<sup>2</sup>. Они положили начало применению идей и методов символической логики и логической семантики к анализу информационного содержания языка науки, развивая свою теорию семантической информации применительно к языковым системам, которые одновременно выступают в качестве предмета исследования и модели реальных языковых систем<sup>3</sup>.

Наиболее важную роль здесь играют такие понятия логической семантики и индуктивной логики Карнапа, как понятия «описание состояния» и логической, или индуктивной, вероятности. Дело в том, что задача определения базисных альтернатив в том или ином языке связана с поиском соответствующего логико-семантического принципа симметрии, который давал бы возможность средствами примененного языка отличить один «возможный мир» или «возможные классы миров» от другого.

Карнаповский метод «описания состояния» и сформулированное на его основе понятие «описание структуры» выполняют роль этого принципа. «Описание состояния» есть конъюнкция, содержащая в качестве компонентов для каждого атомарного предложения само это предложение или его отрицание (но не оба вместе) и не содержащая ни-

<sup>1</sup> R. Carnap, Y. Bar-Hillel. An Outline of Theory of Semantic Information. Technical Report MIT, 1952; Y. Bar-Hillel. Semantic Information and its Measures. Transactions of Tenth Conference on Cybernetics. N. Y., 1952; Y. Bar-Hillel. An Examination of Information Theory. — «Philosophy of Science», 1955, v. 22 (эти работы цитируются нами по: Y. Bar-Hillel. Language and Information. London, 1964); Y. Bar-Hillel, R. Carnap. Semantic Information. — «British Journal of Philosophical Sciences», 1953, v. 14; Y. Bar-Hillel. Information and Content: Semantic Analysis. — «Synthese», 1953, v. 9, N 3—5.

<sup>2</sup> Этими критериями являются: сходство (подобие) экспликанда и экспликата, точность, эвристическая ценность и простота экспликата (R. Carnap. Logical Foundations of Probability. Chicago, 1950, p. 7).

<sup>3</sup> Описание этих языковых систем, средств их анализа см.: R. Carnap, Y. Bar-Hillel. An Outline of Theory of Semantic Information, p. 224—227. Краткое описание см.: Л. Бриллюэн. Наука и теория информации, стр. 385—386. Здесь мы ограничиваемся указанием на то, что выбранный ими язык содержит конечное множество индивидуальных констант и одноместных независимых предикатов.



каких других предложений»<sup>1</sup>. Описания состояния, следовательно, могут быть выражены в форме:

$$(\pm) P_1(a_1) \& (\pm) P_2(a_1) \& \dots \& (\pm) P_\pi(a_1) \& \\ \& (\pm) P_1(a_2) \& (\pm) P_2(a_2) \& \dots \& (\pm) P_\pi(a_2) \& \\ \& (\pm) P_1(a_3) \& (\pm) P_2(a_3) \& \dots \& (\pm) P_\pi(a_3) \& \\ \& (\pm) P_1(a_n) \& (\pm) P_2(a_n) \& \dots \& (\pm) P_\pi(a_n),$$

где  $\&$  есть знак конъюнкции, т. е. пропозициональной связи «и»,  $P_1, P_2, \dots, P_\pi$  — одноместные независимые предикаты,  $a_1, a_2, \dots, a_n$  — индивиды, а символ  $(\pm)$  означает, что стоящее за ним высказывание может иметь или не иметь знак отрицания. Смысл описания состояния состоит в том, что оно является высказыванием, полностью описывающим одну из возможных альтернатив в данной языковой системе, а класс описаний состояния — все логически возможные состояния универсума относительно данных свойств и индивидов<sup>2</sup>. Тогда класс альтернатив в рамках данного подхода может эксплицироваться как некоторая дизъюнкция изоморфных описаний состояния. (Два описания состояния, по Карнапу, изоморфны, если, и только если, они могут быть получены один из другого в результате перестановки имен индивидов.) Эти дизъюнкции и были названы Карнапом «описаниями структуры».

Будучи наиболее сильными синтетическими (фактуальными) и непротиворечивыми предложениями, описания состояния через понятия «выполнимость предложения  $i$  в описании состояния языка  $L_n^\pi$ », «область выполнимости предложения  $i$  в языке  $L_n^\pi$ » —  $R(i)$  и определяемые на их основе понятия  $L$ -истинности («логической истинности»),  $L$ -ложности,  $L$ -импликации<sup>3</sup> и т. д. связываются с остальными предложениями языковой системы. Любое высказывание языка  $L_n^\pi$  может быть представлено как дизъюнкция тех описаний состояния, в которых оно выполняется. Тем самым

<sup>1</sup> Y. Bar-Hillel, R. Carnap. Semantic Information, p. 157.

<sup>2</sup> Очевидно, в языке  $L_n^\pi$ , где  $n$  — количество индивидов,  $\pi$  — количество предикатов, будет всего  $2^{\pi n}$  описаний состояния.

<sup>3</sup> Высказывание  $i$   $L$ -имплицирует высказывание  $j$ , если импликация  $i \rightarrow j$  является  $L$ -истинной. Для этого необходимо и достаточно, чтобы  $R(i)$  составляло часть  $R(j)$ , т. е.  $R(i) \subset R(j)$ . Подробнее об  $L$ -понятиях см.: Р. Карнап. Значение и необходимость. М., 1959.

это понятие лежит в основе семантической трактовки информации, сообщаемой тем или иным предложением.

На основе описания состояния определяется элемент содержания  $E$  предложения  $i$  как отрицание описания состояния и содержание предложения  $i$  [ $\text{Cont}(i)$ ] как класс элементов содержания,  $L$ -имплицуемых предложением  $i$ .  $\text{Cont}(i)$ , т. е. класс описаний состояния, исключаемых предложением  $i$ , или тех, в которых выполняется высказывание  $\neg i$  ( $\neg$  есть знак отрицания), принимается в качестве экспликата донаучного понятия семантической информации, сообщаемой предложением  $i$ <sup>1</sup>. Как отмечают Карнап и Бар-Хиллел, этот экспликат «является интуитивно возможным и находится в согласии со старым философским принципом «*omnis determinatio est negatio*»»<sup>2</sup>. Он отвечает всем требованиям адекватной экспликации.

Таким образом, уже в теории семантической информации Карнапа и Бар-Хиллела проявляется специфика и единство синтаксического и семантического аспектов понятия информации: если содержание синтаксической информации (шенноновской, в частности) определяется структурой возможных материальных носителей информации, их синтаксическими отношениями (например, сигналы и их отношения друг к другу), то содержание семантической информации — структурой возможных состояний предмета рассуждения (описаний состояния, по Карнапу и Бар-Хиллелу) и семантическими свойствами материальных носителей информации (например, знаки и их отношения к обозначаемому). Но в обоих случаях остается общим подход к информации как снятой неопределенности, идет ли речь о неопределенности появления того или иного сигнала или об исключении возможных описаний состояния тем или иным предложением языковой системы.

Единство и специфика двух аспектов информации получают дальнейшее развитие на стадии количественного анализа семантической информации. Это связано с применением

<sup>1</sup> Нетрудно видеть, что «содержание»  $L$ -истинного предложения есть пустой класс «элементов содержания»  $\Lambda$  (оно выполняется во всех описаниях состояния),  $L$ -ложного — класс *всех* «элементов содержания»  $V$  (не выполняется ни в одном), фактуального предложения  $i$  есть  $\Lambda < \text{Cont}(i) \subset V$  (выполняется частично) и  $\text{Cont}(j) \subset \text{Cont}(i)$ , если, и только если,  $i$   $L$ -имплицурует  $j$ .

<sup>2</sup> R. Carnap, Y. Bar-Hillel. An Outline of Theory of Semantic Information, p. 232.

Карнапом и Бар-Хиллелом понятия логической, или индуктивной, вероятности<sup>1</sup>. Более того, Карнап и Бар-Хиллел считают, что их теория есть ответвление теории индуктивной вероятности.

Понятие логической вероятности, трактуемой как степень подтверждения одного высказывания (гипотезы) другим (основанием) в определенной языковой системе, придает необходимому условию данной экспликации (количество информации предложения  $i$  должно быть не меньше, чем количество информации предложения  $j$ , если содержание предложения  $i$  включает в себя содержание предложения  $j$ ) более общий и точный смысл: чем больше логическая вероятность высказывания, тем меньше должна быть мера его содержания, т. е. чем больше описаний состояния «разрешает» то или иное высказывание, тем менее должно оно быть семантически информативно, и, наоборот, чем больше описаний состояния им исключается, тем оно должно быть более информативно в указанном смысле. Однако этим его роль не исчерпывается: установление мер содержания семантической информации также опирается на него. Последнее осуществляется на основе так называемой собственной функции меры  $m_p$ .

Являясь регулярной измеряющей функцией<sup>2</sup>, определенной на множестве описаний состояния, она сводит задачу нахождения логической вероятности предложений к более простой задаче нахождения функции меры для описаний состояния, в которых выполняются те или иные предложения. При этом могут быть использованы различные вероятностные меры ( $m$ -функции); одна из них приписывает равные априорные вероятности всем описаниям состояния, другая — одинаковые веса описаниям структуры, которые затем распределяются поровну между входящими в них описаниями состояния<sup>3</sup>. Следовательно, в рамках этой концепции возможно различное решение проблемы количест-

<sup>1</sup> Имеется в виду известная теория индуктивной вероятности, разработанная Карнапом.

<sup>2</sup> Регулярной измеряющей функцией называется  $m$ -функция, удовлетворяющая условиям: а) для каждого  $z_i$  (описания состояния)  $m(z_i) > 0$ ; б) сумма значений  $m$ -функции для всех описаний состояния равна 1; в) для  $L$ -ложного предложения  $j$   $m(j) = 0$ ; г) для любого не  $L$ -ложного предложения  $j$  функция  $m(j)$  равна сумме значений для  $z$  в области выполнимости  $R(j)$ .

<sup>3</sup> Последняя функция, как показывают Карнап и Бар-Хиллел, является более адекватной при семантико-информационном анализе процедур индукции, и прежде всего сингулярного индуктивного вывода.

венной оценки альтернатив (класса альтернатив). Благодаря применению этих мер логическая вероятность предложений языка  $L_n^\pi$  эксплицируется на количественном уровне, устанавливается ее связь с описываемыми объектами, языковой системой в целом и открывается возможность количественной оценки как степени «фактуальности», синтетичности того или иного предложения, так и его «неожиданности» относительно других предложений языковой системы.

Эта возможность реализуется в теории информации Карнапа и Бар-Хиллела формулированием количественных мер семантической информации:

$$1) \text{ cont } (i) = D_f m_p (\neg i);$$

$$2) \text{ inf } (i) = D_f \log \frac{1}{1 - \text{cont } (i)}.$$

И  $\text{cont } (i)$ , и  $\text{inf } (i)$ , названные авторами «мерой содержания» и «мерой информации», находятся на семантическом уровне, основываются на количественном определении логической вероятности и выполняют условия научной экспликации. В то же время эти меры уточняют связанные между собой различные стороны семантического содержания информации — момент синтетичности, фактуальности предложения, который оценивается «мерой содержания», и свойство «редкости» (неожиданности) предложения в данной языковой системе, определяемое «мерой информации». На логико-семантическом уровне это различие связано с тем, что  $\text{cont}$  выступает в качестве меры исключения абсолютного числа описаний состояния, а  $\text{inf}$  — меры исключения их относительного числа (по отношению к другим высказываниям языковой системы).

Можно сказать, что различие между рассматриваемой теорией информации и теорией Шеннона проявляется как в наличии в первой «меры содержания», которая не имеет соответствующего эквивалента во второй теории, так и (и это главное) в специфике логической вероятности по отношению к статистической (частотной) вероятности сигналов, на которой покоится мера Шеннона. Их единство обнаруживается в «инверсивном» характере связи вероятности и информации в обоих случаях и в аналогичности ряда результатов. Эти отношения между различными теориями информации получают свое наиболее полное выражение в идее «исчисления информации», выдвинутой Бар-Хиллелем.

## 2. ПОНЯТИЕ СЕМАНТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ЛОГИЧЕСКИХ ЯЗЫКОВ С ЗАВИСИМЫМИ ПРЕДИКАТАМИ

Известно, что в процессе разработки первых вариантов логической семантики и теории семантической информации обнаружился ряд трудностей. Понятие «описание состояния», которое было исходным в этих теориях, основывалось на допущении *независимости исходных предикатов* заданной логической системы (исчисления одноместных предикатов первого порядка). Лишь в этом случае конъюнкции атомарных предложений были непротиворечивы и выполняли роль описания возможных состояний предмета рассуждения. Это существенно лимитировало возможности данного логико-семантического аппарата в анализе языков науки. Кроме того, в первоначальном изложении Карнапа — Бар-Хиллела понятие аналитических предложений трактовалось слишком узко: в него не включались предложения, связанные с так называемыми постулатами значения<sup>1</sup>; это также ограничивало область применимости их теории.

Дальнейшее развитие семантической теории было предпринято Кемени, разработавшим новый подход к логической семантике. Он попытался преодолеть указанные трудности с помощью понятия «модели-интерпретации» обобщенной логической системы. В его семантике это понятие вводится на основе применения понятий «полумодели» и «модели» логической системы  $L$ , определяемой как «рекурсивное и рекурсивно перечислимое множество символов, удовлетворяющее ряду условий»<sup>2</sup>. Если полумодель, грубо говоря, определяет области возможных значений для каждой переменной и константы логической системы  $L$ , а модель является полумоделью, не противоречивой с аксиомами и правилами системы, то «интерпретацией является полумодель, которая непротиворечива с той же самой, полученной посредством идеализации полной системой аксиом и правил»<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> «Постулат значения» — дополнительная внелогическая аксиома, которая вводится в ту или иную дедуктивную систему с целью учета в ней лингвистического, научного и т. д. употребления тех или иных символов, их логических зависимостей между собой.

<sup>2</sup> J. G. Kemeny. Models of Logical Systems. — «Journal of Symbolic Logic», 1948, v. 13, N 1, p. 17.

<sup>3</sup> J. G. Kemeny. A New Approach to Semantics, Pt. 1. — «Journal of Symbolic Logic», 1956, v. 21, N 1, p. 14.

Введение понятия «модели-интерпретации» приводит к анализу *логических систем с зависимыми исходными предикатами*, распространяет логико-семантический анализ на более широкий и содержательный (чем у Карнапа) класс языков, существенно расширяет множество аналитических высказываний в рамках той или иной дедуктивной системы. На этой базе решается проблема определения «возможных миров» для данной дедуктивной системы и строится теория семантической информации<sup>1</sup>. Понятиям «семантическая информация» и «количество семантической информации» Карнапа — Бар-Хиллела у Кемени соответствуют понятия логической «силы» высказывания и ее меры, определяемой на основе «логической меры функции» — аналога *m*-функции в теории Карнапа и Бар-Хиллела.

Исходя из рекурсивных определений обобщенной логической системы  $L$ , ее модели  $M$ , а также выполнимости любой пропозициональной формулы  $W$  языка  $L$  в его моделях, Кемени определяет логическую меру высказывания  $W$  (меру  $m(W)$ ) как функцию  $n$ , значение которой для любого

$n$  задается формулой:  $\frac{M_n^W}{M_n}$ , где  $n$  — количество индивидов

$L, M_n$  — общее число  $n$ -моделей  $L, M_n^W$  — число  $n$ -моделей  $L$ , в которых формула  $W$  выполнима. В качестве необходимых и достаточных условий применимости этой логической меры выступают: непротиворечивость языка  $L$ , конечность числа различных типов индивидных переменных и констант в  $L$ , конечность порядка каждой константы в  $L$ , а также недоказуемость любого утверждения бесконечности в  $L$ . Это приводит к более широкой «сфере действия» сформулированной логической меры, так как условия применимости выполняются всеми логическими системами, являющимися системами конечного порядка и не содержащими аксиомы бесконечности.

Понятие логической «силы» высказывания Кемени связывает с исключением этим высказыванием моделей («возможных миров»), где оно не выполнимо, а число исключаемых моделей рассматривает в качестве «меры содержания». Отсюда сходство ряда определений и теорем Кемени о семантическом содержании высказываний с положениями теории Карнапа и Бар-Хиллела. Оно обнаруживается в вы-

<sup>1</sup> J. G. Kemeny. Extension of the Methods of Inductive Logics. — «Philosophical Studies», 1952, v. 3, p. 38—42; *его же*. A Logical Measure Function. — «Journal of Symbolic Logics», 1953, v. 18, N 4, p. 289—308.

боре функции  $S(W) = -\log_2 m(W)$  в качестве «меры содержания» (сравним  $\inf$  у Карнапа и Бар-Хиллела).

Первым отличием семантической теории информации Кемени от теории Карнапа и Бар-Хиллела является распространение ее мер на языки с *зависимостями*<sup>1</sup>. Это определяет их более широкую значимость для количественного анализа научных теорий и языков, которые, как известно, представляют собой системы взаимосвязанных понятий. Их применение упрощает анализ этих языков в силу уменьшения числа возможных моделей. Оно приводит также к экспликации понятия логической «силы» высказывания в дедуктивных системах: в языках с зависимостями (или «постулатами значения») сила той или иной пропозициональной формулы является мерой той части ее содержания, которая не следует заранее из значения констант, т. е.

$$S'(W) = S(A \& W) - S(A) \text{ }^2.$$

Второй особенностью теории Кемени, тесно связанной с первой, является учет более широкого класса аналитических предложений, которые являются истинными на основе принятых постулатов значения. Так, если некоторую логическую систему  $N$  дополнить постулатами значения  $M$ , то в новой системе  $N'$  аналитическими будут те теоремы  $A$ , которые выводимы из  $M$  логическими средствами системы  $N$ . Это позволяет применить меры семантической информации к анализу содержательных отношений в рамках как логико-математических теорий, так и тех научных систем, в которых постулаты значения могут задавать некоторые связи между исходными предикатами данной системы.

Третьей отличительной чертой мер семантической информации, по Кемени, является их применимость к классу логических языков, включающих не только исчисление одноместных (Карнап, Бар-Хиллел), но и  $n$ -местных предикатов первой ступени (узкое исчисление предикатов), а также исчисления предикатов более высоких ступеней.

Таким образом, теория семантической информации, выдвинутая Кемени на основе его «нового подхода к семантике»,

<sup>1</sup> Если мы добавим к  $L$ , пишет Кемени, аксиомы зависимости, которые могут быть выражены как отдельная пропозициональная формула  $A$ , тогда новая мера  $m'$  определяется с помощью  $m$  следующим образом:

$m'(W) = m \frac{A \& W}{m(A)}$  (J. G. Kemeny. A Logical Measure Function, p. 301).

<sup>2</sup> Там же, стр. 301.

представляет собой развитие идей семантической теории Карнапа и Бар-Хиллела. Основные идеи логико-семантической теории информации (идеи «возможных миров», логической вероятности, ее инверсивной связи с информацией и т. д.), модифицируясь и обогащаясь в подходе Кемени, остаются фундаментом и данной экспликации понятия семантической информации, и ее количественных мер.

Общей основой рассматриваемых семанτικο-информационных теорий является идея различия и единства теоретического и эмпирического, аналитического и синтетического уровней познания. Экспликация понятия «семантическая информация» основывается именно на этом: «содержание» информации определяется «синтетичностью», «фактуальностью» того или иного предложения языковой системы, а ее «количество» — мерой «синтетичности» данного предложения<sup>1</sup>.

Семантические теории информации ведут, далее, к количественному анализу понятий аналитичности и синтетичности, их связи в пределах данной семантической системы. «Предложение  $H$ , — определяет Тернебом, — является аналитическим по отношению к множеству постулатов значения  $M$ , если, и только если,  $C(H/M) = 0$ , где  $C(H/M)$  — количество семантической информации, сообщаемой  $H$  относительно  $M$ »<sup>2</sup>. Эти теории способствуют выдвижению информационных оценок теоретического и эмпирического уровней научного познания в той мере, в какой последние совпадают с аналитическим и синтетическим относительно фиксированной языковой системы. Такова, например, выдвинутая Кемени мера «степени теоретичности» научного текста<sup>3</sup>.

### 3. КРИТЕРИЙ «АДЕКВАТНОГО СИНОНИМИЧНОГО ОПИСАНИЯ». СЕМАНТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ И ЛОГИКА ВОПРОСОВ

Специфика описанных в предыдущих параграфах логико-семантических уточнений понятия информации приводит к некоторым существенным ограничениям. Во-первых,

<sup>1</sup> Подробнее см.: И. И. Гришкин. Понятие информации. Логико-методологический аспект. М., 1973, стр. 68—70.

<sup>2</sup> H. Törnebohm. Information and Confirmation, 1964, p. 54.

<sup>3</sup> J. G. Kemeny. A Logical Measure Function, p. 229—300.



в рамках этих экспликаций различные аналитические высказывания, будь то какая-либо тавтология или нетривиальная теорема языка, сообщают одинаковое количество семантической информации (минимальное или даже нулевое), что явно не согласуется с интуицией. Во-вторых, в рассмотренных теориях наибольшей информационной значимостью обладают  $L$ -ложные (Карнап) или аналитически ложные (Кемени) суждения. Это также вступает в противоречие с содержательными представлениями о логически нетривиальном выводе, хотя и вполне объяснимо с позиций материальной импликации («из лжи следует все что угодно»).

В последнее время предпринимаются активные попытки преодоления этих ограничений. Для них характерно стремление обосновать более адекватный экспликат семантической информации, т. е. пойти по пути интенсивного (а не экстенсивного, как у Кемени) развития теории. В этой связи заслуживают внимания работы Р. Уэллса и Е. К. Войшвилло.

Уэллс выдвигает новый критерий экспликации семантической информации — критерий «адекватного синонимичного описания», согласно которому не все логически (аналитически) истинные предложения несут одинаковое количество семантической информации. На основе этого критерия он строит логико-семантическую модель информации, состоящую из ряда допущений и устанавливающую отношения между «количеством информативности»  $IA(S)$  и «информативным содержанием»  $IC(S)$  аналитически истинных высказываний  $S$ . Эти допущения эксплицируют различные значения семантической ценности для аналитически истинных предложений<sup>1</sup>.

Во-первых, они в явной форме ставят чрезвычайно важную для анализа языка науки проблему количественной характеристики иерархии уровней внутри теоретического знания, информативности номологических высказываний (высказываний о законах природы) и логических истин,

<sup>1</sup> R. Wells. A Measure of Subjective Information. — «Proceedings of Symposium on Applied Mathematics», 1961, v. 12, p. 242. Подробный анализ данной модели семантической информации, значения ее допущений для экспликации семантической информации см.: И. И. Гришкин. Понятие информации. Логико-методологический аспект, стр. 72—77. Здесь мы ограничимся замечаниями, подчеркивающими логико-методологическое и гносеологическое значение данной экспликации и ее место в развитии логико-семантических концепций информации.

от которой отвлекались предшествующие экспликации семантической информации. Во-вторых, они обосновывают необходимость перехода в анализе семантической информации от экстенционального характера применяемого логического аппарата, и прежде всего материальной импликации (Карнап, Бар-Хиллел, Кемени и др.), к интенциональному языку и системам релевантной импликации. Здесь имеется в виду создание различных вариантов логической экспликации связи «по смыслу» между посылками и заключением, от которой отвлекается материальная импликация<sup>1</sup>. Это вызывается как потребностями разработки логических проблем познания, так и потребностями кибернетики. В обоих случаях оценка смысла языковых выражений, разработка критериев нетривиальности теорем приобретают особую актуальность. Наконец, в силу ряда аспектов семантической модели Уэллса она выступает в качестве экспликаций некоторых теоретико-познавательных процедур (научного обобщения, оценки эвристической ценности постановки вопроса, процедуры отождествления и т. д.).

Е. К. Войшвилло предпринял оригинальную попытку семантической интерпретации статистических понятий энтропии и информации<sup>2</sup> с целью обосновать правомерность своеобразного *синтеза статистического и логико-семантического подходов* к информации на пути обобщения как первой, так и второй концепции. Взятые в отдельности, эти подходы к информации не эксплицируют, по его мнению, некоторых важных ее сторон. Так, статистическая оценка ожидаемой информации как меры неопределенности в шенноновской теории не учитывает количество «затраченной» на получение того или иного исхода опыта информации. Теория Карнапа и Бар-Хиллела в свою очередь не отражает того, что «информация, которую содержит суждение или

<sup>1</sup> A. R. Anderson, N. D. Belnap. The Pure Calculus of Entailment. — «Journal of Symbolic Logic», 1962, v. 27, N 1; В. А. Смирнов. Формальный вывод и логические исчисления, гл. 6. М., 1972; Е. К. Войшвилло. Натуральные варианты некоторых релевантных систем. — «Теория логического вывода». Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума, ч. 1. М., 1974.

<sup>2</sup> Ряд его идей нашел освещение в философской литературе: А. Д. Урсул. Информация и мышление. М., 1970, стр. 36—41; его же. Информация. Методологические аспекты, гл. 3; И. И. Гришкин. Понятие информации. Логико-методологический аспект, стр. 78—83. Нас интересуют логико-семантические допущения подхода Войшвилло и его роль в решении фундаментальных проблем семантической теории информации.

информация результата опыта, должна была бы зависеть прежде всего от количества и существенности обусловленных им следствий, а не от степени его вероятности»<sup>1</sup>.

Экспликация этих сторон информации и осуществляется в анализируемой концепции. Она предпринимается на основе применения специфических логико-семантических и математических средств и понятий. Важнейшим среди них, определяющим в конечном итоге ее специфику, является понятие энтропии вопроса (проблемы). Его введение диктуется принятыми исходными принципами, прежде всего принципом синтеза статистического и логико-семантического подходов к проблеме информации. Действительно, если информацию рассматривать как суждение (семантический подход), то «энтропию тогда естественно трактовать как характеристику некоторого вопроса или проблемы»<sup>2</sup>, а каждый опыт, результаты которого также выражаются суждениями, — как поиск ответа на некоторые вопросы. Энтропия при этом выступает как мера недостаточности информации для решения вопроса (проблемы), степень трудности ответа на него.

Понятие *вопроса*, которое в данном случае выполняет функцию задания базисных альтернатив, также уточняется<sup>3</sup>. Под термином «вопрос», пишет Е. К. Войшвилло, мы будем подразумевать вопросы-проблемы (типа: «определить, имеет ли место событие А» или, что то же, «верно ли высказывание о наличии этого события»; «определить, какое из возможных событий  $A_1, A_2, \dots, A$  имеет место», т. е. «верно ли высказывание о наличии  $A_1$  или высказывание о наличии  $A_2$ » и т. д.)<sup>4</sup>. Постановка вопроса-проблемы в общем случае всегда предполагает определенное основание в виде множества доказанных или принятых в качестве допустимых высказываний. «Вообще говоря, — пишет в этой связи другой советский исследователь логики вопросов Ю. А. Петров, — беспредпосылочных вопросов нет, так как каждый вопрос

<sup>1</sup> Е. К. Войшвилло. Попытка семантической интерпретации статистических понятий информации и энтропии. — «Кибернетику — на службу коммунизму», т. 3. М. — Л., 1966, стр. 278.

<sup>2</sup> Там же.

<sup>3</sup> О проблематике логики вопросов, называемой эротетической логикой, см. Т. Kubinsky. Przegląd niektórych zagadnień logiki pytań. — «Studia Logica», 1966, t. 18, p. 105 — 131.

<sup>4</sup> См. Е. К. Войшвилло. Попытка семантической интерпретации статистических понятий информации и энтропии. — «Кибернетику — на службу коммунизму», т. 3, стр. 279.

предполагает описание некоторой ситуации, относительно которой затребуется информация»<sup>1</sup>.

Предпринимая логическую экспликацию вопроса, Е. К. Войшвилло исходит из различения основных типов вопросов в зависимости от характера логических связей, фигурирующих в составляющих вопрос суждениях: 1) так называемые вопросы общего типа, допускающие ответ «да» или «нет» (истинно ли высказывание  $A$ ?); 2) вопросы дизъюнктивного типа, т. е. «какое из высказываний  $A_1, A_2, \dots, A_m$  истинно?»; 3) вопросы имплицативного типа  $\Gamma \rightarrow A$ ? (истинно ли  $A$  при наличии высказываний  $\Gamma$ ?). Вопросы формулируются в рамках языка узкого исчисления предикатов, а также его расширений за счет введения необходимых дескриптивных постоянных (слов естественного языка или специальных знаков, например оператора вопроса «?»).

Данная экспликация вопроса отвечает сформулированным целям семантического истолкования статистических понятий энтропии и информации. Понятие энтропии при этом приобретает характер логической меры, определенной на множестве составляющих вопросы высказываний. Оно выполняет по существу функцию количественной оценки допустимых альтернатив. Эта специфика применения понятия энтропии становится еще более ясной, если учесть, что количественная оценка энтропии вопросов основана на употреблении логической, или индуктивной, вероятности. Это сближает анализируемую концепцию с логико-семантической теорией информации Карнапа и Бар-Хиллела. Однако характер применяемых логико-семантических средств и допущений, и прежде всего понятия энтропии вопроса и формулируемой в связи с ним логики вопросов<sup>2</sup>, определяет новизну данной семантической концепции информации.

Действительно, в этой концепции информация связывается с суждениями, а количество информации рассматривается в отношении к некоторому вопросу (проблеме). Отсюда величину информации суждения, количество и степень существенности обусловленных ею следствий естественно поставить

<sup>1</sup> Ю. А. Петров. Вариант логики эротетической. — «Проблемы теории познания и логики». Материалы к XIV Международному философскому конгрессу (2—9 сентября 1968 г., Вена), представленные философами Советского Союза. Секция логики, теории познания и философского языка, вып. 1. М., 1968, стр. 19.

<sup>2</sup> В ней на основе понятия энтропии вопроса определяются условия эквивалентности, логической эквивалентности, замены и т. д. для вопросов. Например,  $A$ ? и  $B$ ? считаются эквивалентными при наличии данных  $\Gamma$ , если их энтропия одинакова.

в зависимость от того, «насколько доказательство или допущение истинности этого суждения уменьшает энтропию проблемы»<sup>1</sup>, и определить ее меру равенством

$$I(A/U?/\Gamma) = \mathcal{E}(U?/\Gamma) - \mathcal{E}(U?/\Gamma, A),$$

где  $\mathcal{E}(U?/\Gamma)$  — энтропия  $U?$  при наличии данных  $\Gamma$ ,  $\mathcal{E}(U?/\Gamma, A)$  — энтропия  $U?$  при допущении истинности  $A$ . Тем самым уточняется тот аспект информации, от которого отвлекалась семантическая теория Карнапа и Бар-Хиллела.

Такой подход к определению меры семантической информации приводит также к трактовке информации решения некоторой проблемы  $B?$  как совокупной информации всех суждений  $(\Gamma, A)$ , лежащих в основе решения этой проблемы. Тогда процесс решения проблемы можно представить как накопление информации, количество которой возрастает и в том случае, когда вероятность (апостериорная) решения проблемы увеличивается, хотя при этом и не устраняется полностью зависимость величины информации от фактора неожиданности (априорной) вообще. Этим мера семантической информации Е. К. Войшвилло тоже отличается от меры информации Карнапа и Бар-Хиллела, которая эксплицирует, как мы видели, прежде всего степень «неожиданности» высказывания в определенной языковой системе и основывается на представлении об инверсивности вероятности и информации, не уточняя, о какой вероятности (априорной или апостериорной) идет речь.

Итак, данная попытка семантической интерпретации статистических понятий энтропии и информации, обнаруживая связь<sup>2</sup> со статистическим (Шеннон) и логико-семантическим (Карнап, Бар-Хиллел) подходами к информации, ведет к обобщению, экспликации новых сторон семантической информации. Естественно, и в этом уточнении имеются свои нерешенные проблемы. Как отмечает Войшвилло, «возникают трудности при попытке распространения данного понятия информации за пределы теории случайных событий»; и «весьма сложным является вопрос о критериях

<sup>1</sup> См. Е. К. Войшвилло. Попытка семантической интерпретации статистических понятий информации и энтропии. — «Кибернетику — на службу коммунизму», т. 3, стр. 289.

<sup>2</sup> Эта связь обнаруживается в вероятностном в целом характере данной концепции, в применении понятий энтропии и логической вероятности, в одинаковой оценке информации логически истинных и ложных суждений и т. д.

оценки вероятностей гипотез, а следовательно, и энтропии проблем»<sup>1</sup>. По-видимому, нуждается в дальнейшем развитии и логико-семантический базис этой концепции, и прежде всего логика вопросов, из которой исходит автор. Однако уже в нынешнем ее состоянии она обладает эвристической ценностью как для понимания природы информации, дальнейшего совершенствования теории информации в широком смысле, так и для анализа ряда актуальных проблем научного знания.

В самом деле, исходя из этой концепции удастся полнее раскрыть специфику и единство синтаксического и семантического аспектов информации как на уровне содержания, так и на уровне количественных мер, полнее вскрыть их метатеоретическую сущность: на основе данной интерпретации информацию в ее синтаксическом и семантическом значениях можно трактовать как знание, уменьшающее энтропию вопросов (момент единства), относящихся (момент различия) к вероятностной структуре сигналов (синтаксический аспект) и к их содержанию (семантический аспект). Становится возможной также постановка вопроса об оценке информационной значимости различных логических процедур и *L*-истинных суждений. Войшвилло, как и Уэллс, выдвигает идею совершенствования критериев экспликации понятия семантической информации, главную роль в ее реализации отводит понятию логической энтропии вопроса, с точки зрения которого естественно приписывать информацию также законам, правилам, операциям и теоремам логики по отношению к вопросам логического характера (эксплицируя, по крайней мере на уровне «сравнения», сообщаемую ими информацию на основе отношения логического следования одних законов, правил и т. д. из других). Это открывает возможность применения данного подхода и для анализа различных форм научного знания, их отношений и процессов развития. Такая возможность осуществляется применительно к понятию, а через связь понятий с суждениями и теориями — к отношениям и развитию последних<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Е. К. Войшвилло. Попытка семантической интерпретации статистических понятий информации и энтропии. — «Кибернетику — на службу коммунизму», т. 3, стр. 291.

<sup>2</sup> Е. К. Войшвилло. Понятие. М., 1967; его же. К анализу развития знания. — «Вопросы философии», 1971, № 8. Об этом см. А. Д. Урсул. Информация и мышление, стр. 41—45.

#### 4. МЕТОД КОНСТИТУЕНТОВ В ЛОГИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ СЕМАНТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Сущность третьего направления в современном развитии логико-семантических концепций информации, объединяющего некоторые важные черты направлений, описанных в двух предыдущих параграфах, мы рассмотрим, анализируя подход, который развивается в работах финского логика и методолога науки Я. Хинтикки и его последователей.

Наш выбор диктуется следующими обстоятельствами: во-первых, эта концепция еще не стала предметом анализа в нашей литературе, посвященной *семантическим* аспектам информации<sup>1</sup>; во-вторых, она представляет собой оригинальный подход к этим вопросам, который приобретает все большую популярность в современных логико-методологических исследованиях научного познания и его процедур<sup>2</sup>.

Основу экспликации понятия семантической информации у Хинтикки составляет так называемый *метод (схема) конституентов*<sup>3</sup>, который позволяет распространить основные идеи и меры семантической теории информации Карнапа и Бар-Хиллела на логику высказываний. В самом деле, если мы имеем конечное число неанализируемых атомарных предложений  $A_1, A_2, \dots, A_k$ , пропозициональные связи  $\neg, \&, \vee$  (и любые другие, определяемые через них), то базисные альтернативы такого языка естественно выразить в форме:  $(\pm) A_1 \& (\pm) A_2 \& \dots \& (\pm) A_k$ .

Очевидно, что число таких альтернатив (их и называют конституентами) будет равно  $2^k$ . Любое высказывание  $h$  этого языка может быть представлено в виде некоторой

<sup>1</sup> Ее некоторые идеи отмечаются в книге Б. В. Бирюкова «Кибернетика и методология науки».

<sup>2</sup> Выражением этой популярности является книга «Information and Inference» (Dordrecht, 1970). Отметим и работы Л. Тондла, особенно книгу: L. Tondl. Scientific Procedures (Dordrecht, 1973). См. также В. В. Целищев. Логическая истина и эмпиризм. Новосибирск, 1972; Г. Г. Шляхин. Проблема аналитических и синтетических суждений в работах Я. Хинтикки. — «Вопросы философии», 1974, № 11.

<sup>3</sup> Название и идея метода восходят к Булю. В алгебре логики XIX в. под «конституентами разложения единицы» понимались члены совершенной дизъюнктивной нормальной формы (СДНФ) тождественно истинного высказывания от некоторого числа переменных, а под «конституентами разложения нуля» — члены аналогичной конъюнктивной формы (СКНФ) тождественно-ложного высказывания от данного числа переменных.

дизъюнкции конstituентов, т. е.  $h = C_1 \vee C_2 \vee \dots \vee C_{w(h)}$ , где  $C_1, C_2, \dots, C_{w(h)}$  — конstituенты, а  $w(h)$  — «пространство» высказывания  $h$ . Теперь нетрудно результаты, полученные Карнапом и Бар-Хиллелом, распространить и на данный язык. Так, в качестве меры логической (индуктивной) вероятности высказывания  $h$  естественно рассматривать величину  $p(h) = \frac{w(h)}{2^k}$ , а карнаповские *inf* и *cont* получить путем замены функции  $m_p$  на  $p(h)$ .

Хинтикка, однако, не ограничивается «пропозициональным случаем». Он применяет схему конstituентов для анализа более сложных языков, которые он называет «монадическими» языками первого порядка. Эти языки включают в себя по крайней мере (1) некоторое число одноместных предикатов (свойств)  $P_1(x), P_2(x), \dots, P_k(x)$ ; (2) бесконечное число связанных переменных  $x, y, z, \dots$ ; (3) кванторы ( $\exists$  и  $\forall$ ); (4) пропозициональные связи  $\neg, \&, \vee$  и все другие, определяемые через них. Нередко к этому алфавиту добавляется список индивидных констант (имен); таков, например, язык, используемый Карнапом и Бар-Хиллелом. Однако если нашей целью является получение достаточно реалистической логической реконструкции процедур, посредством которых накапливается информация о мире, то, как подчеркивает Хинтикка, последнее допущение будет слишком сильным<sup>1</sup>. Поэтому использование «монадического» языка первого порядка без индивидных констант представляется более адекватным подходом к проблеме.

Как в этом языке задаются базисные альтернативы? При решении этой проблемы Хинтикка исходит из идеи классов возможных миров (альтернатив), подчеркивая, что в данном случае нас интересуют скорее различные классы альтернатив, чем различные альтернативы универсума.

Сначала Хинтикка вводит понятие различных классов индивидов в данном языке. Они могут быть заданы выражениями типа  $(\pm) P_1(x) \& (\pm) P_2(x) \& \dots \& (\pm) P_k(x)$  и представляют собой так называемые  $Q$ -предикаты карнаповской индуктивной логики; их общее число равно  $K = 2^K$ , и они могут быть некоторым образом упорядочены в виде последовательности  $Ct_1(x), Ct_2(x), \dots, Ct_K(x)$ . На их основе (и в этом состоит новизна предпринятой

<sup>1</sup> В реальном процессе познания «мы не можем исходить из допущений, что нам известен универсум настолько, что мы имеем имя для каждого индивида в нем» (J. Hintikka. Surface Information and Depth Information. — «Information and Inference», p. 266).



экспликации) могут быть «заданы» «возможные классы миров» (альтернатив), точнее, их описания в виде:

$$(\pm) \exists x Ct_1(x) \& (\pm) \exists x Ct_2(x) \& \dots \& (\pm) \exists x Ct_K(x).$$

Эти выражения и называются конституентами «монадического» языка первого порядка. Они образуются путем просмотра списка всех  $Q$ -предикатов, чтобы выявить выполнимость или невыполнимость последних, и общее число равно  $2^K$ ; они могут быть упорядочены в виде последовательности  $C_1, C_2, \dots, C_{2^K}$  и выполняют роль базисных альтернатив данного языка: любое высказывание  $S$  может быть представлено в виде дизъюнкции некоторых (может быть, всех) конституентов. Эта дизъюнкция называется Хинтиккой дистрибутивной нормальной формой высказывания  $S: S = C_{i_1} \vee C_{i_2} \vee \dots \vee C_{i_{w(S)}}$ , где  $\{C_{i_1}, C_{i_2}, \dots, C_{i_{w(S)}}\}$  есть подмножество множества всех конституентов,  $w(S)$  — «пространство» высказывания  $S$ .

Таким образом, понятие конституента и в этом случае остается центральным. С его помощью обобщается метод «описаний состояний» и «описаний структуры» и происходит анализ более глубокой логической структуры «монадических» языков первого порядка<sup>1</sup>.

Если описание состояния указывает место каждого из индивидов нашего универсума в классах индивидов, определяемых  $Q$ -предикатами, а описание структуры несет сообщение о количестве индивидов, принадлежащих каждому из различных  $Q$ -предикатов, то конституент сообщает нам, является некоторый  $Q$ -предикат пустым или нет. Этот обобщающий характер конституента «монадического» языка первого порядка обнаруживает определенные преимущества при образовании на его базе мер вероятности и информации, что приводит к более адекватному анализу проблем индукции, научного объяснения и т. д. Остановимся на этом более подробно.

Если исходить из чисто логических соображений (принцип симметрии, равноправия всех конституентов), то вторая важная проблема любой семантической теории информа-

<sup>1</sup> Так, например, имея в своем распоряжении индивидуальные константы (имена)  $a_1, a_2, \dots, a_j$ , мы можем любое «описание состояния» выразить в форме некоторой конъюнкции  $Q$ -предикатов:

$$Ct_{i_1}(a_1) \& Ct_{i_2}(a_2) \& \dots \& Ct_{i_j}(a_j),$$

а через них и любые «описания структуры» в этом языке.

ции — проблема задания весов базисным альтернативам — должна решаться в данном случае аналогично позициональному варианту (и карнаповскому варианту также): каждому конституенту должны быть приписаны одинаковые априорные вероятности и затем образованы соответствующие меры информации. Что касается проблемы задания вероятностей «описаниям состояния», то, как показывает Хинтикка, метод конституентов допускает различные ее решения. Одно из них — распределить вес каждого конституента поровну среди тех «описаний состояния», которые делают его истинным. Второе — распределить вес каждого конституента одинаково среди «описаний структуры», совместимых с ним, и затем уже распределить логическую вероятность каждого такого «описания структуры» поровну среди всех описаний состояния, дизъюнкцией которых он является. (Последний вариант Хинтикка называет «комбинированным», поскольку в нем совмещаются (объединяются) некоторые свойства первого варианта с карнаповской  $m$ -функцией.) Оба этих варианта приводят к образованию мер вероятности и информации, которые обладают определенными преимуществами по сравнению с мерами, предлагаемыми Карнапом и Бар-Хиллелом. Особенно это очевидно в отношении мер перенесенной информации и применения их к анализу содержания общих утверждений и предложений наблюдения монадического языка.

Как отмечает Хинтикка, в реальном процессе познания вообще и научного познания в особенности нас интересует часто не столько информация, сообщаемая некоторым высказыванием  $h$  по отношению к своему предмету обсуждения, т. е.  $\inf(h)$  или  $\text{cont}(h)$ , сколько информация, которую несет данное предложение по отношению к предмету обсуждения некоторого другого предложения  $g$ <sup>1</sup>. Таковы, например, ситуации наблюдения, измерения, подтверждения гипотезы, научного предсказания, объяснения и т. д. В этих ситуациях возникает задача определить уменьшение неопределенности, которое, например, претерпевает гипотеза  $g$  после получения того или иного эмпирического факта  $h$ , или вообще изменение информационного статуса высказывания  $g$  при получении высказывания  $h$ . Этот «сдвиг»

<sup>1</sup> J. Hintikka. The Varieties of Information and Scientific Explanation. — «Methodology and Philosophy of Science». Amsterdam, 1968, p. 316. Наличие двух  $\text{transcont}$  обусловлено введением Хинтиккой еще одной меры «условной» информации  $\text{cont}_{\text{cond}}(g/h) = 1 - p(g/h)$  [в дополнение к карнаповской  $\text{cont}_{\text{cond}}(g/h) = \text{cont}(g \& h) - \text{cont}(h)$ ].

в неопределенности естественно выражать с помощью следующих мер «перенесенной информации»:

- 1)  $\text{transinf}(h/g) = \text{inf}(g) - \text{inf}(g/h) = \log p \frac{(g/h)}{p(g)}$ ;
- 2)  $\text{transcont}_{\text{add}}(h/g) = \text{cont}(g) - \text{cont}_{\text{add}}(g/h) = 1 - p(g \vee h)$ ;
- 3)  $\text{transcont}_{\text{cond}}(h/g) = \text{cont}(g) - \text{cont}_{\text{cond}}(g/h) = p(g/h) - p(g)$ .

Понятие «перенесенной» информации и ее различные меры играют важную роль в количественном анализе научной индукции и объяснения (процедур научной систематизации вообще, по Гемпелю). Работы Хинтикки и его учеников<sup>1</sup> показали плодотворность применения функции  $\text{transinf}(h/e)$  и ее разновидностей прежде всего для анализа проблемы объяснения эмпирических данных с помощью тех или иных гипотез. «В случае объяснения, — пишет Хинтикка<sup>2</sup>, — мы должны выбирать (гипотезу)  $h$  такой, чтобы максимизировать

$$\text{transinf}(h/e) = \log \frac{p(e/h)}{p(e)},$$

где  $e$  — объясняемые эмпирические факты. Это означает такой выбор гипотезы  $h$ , который максимизирует условную вероятность  $p(e/h)$  (при постоянном  $e$ ).

Можно считать, что дальнейшим развитием в этом направлении является введение различных семантико-информационных мер, «систематизационной мощности» номологических высказываний (законов, гипотез, теорий и т. д.). Эти меры представляют собой различные экспликации уменьшения или элиминации неопределенности, связаны с использованием номологических высказываний<sup>3</sup>. В то же время мера  $\text{cont}$  и ее модификации  $\text{transcont}_{\text{add}}(h/e)$  и  $\text{transcont}_{\text{cond}}(h/e)$  могут быть использованы для количественной оценки степени подтверждения той или иной теории, обоснованности индуктивного обобщения и т. д. В этом случае мы выбираем гипотезу  $h$  такой, чтобы максимизировать количество «перенесенной информации» свидетельства  $e$  относительно  $h$ , т. е. максимизировать, например,

<sup>1</sup> Определенные результаты на этом пути получены также Л. Тондлом в указанной выше его книге и в статье «К проблемам семантической информации» («Kybernetika», 1972, т. 8, вып. 3, стр. 197).

<sup>2</sup> J. Hintikka. The Varieties of Information and Scientific Explanation, p. 322.

<sup>3</sup> Подробнее об этом см.: Л. Тондл. К проблемам семантической информации. — «Kybernetika», 1972, т. 8, вып. 3, стр. 202—211.

$transcont_{cond}(h/e) = p(h/e) - p(h)$  или (что равнозначно) ожидаемое значение выбора  $h$ :

$$p(h/e) cont(h) - p(\neg h/e) cont(\neg h/e).$$

В связи с анализом роли мер Хинтикки в исследовании научного познания можно сделать выводы более общего характера.

Во-первых, применение этих мер приводит к взгляду на информацию как на «эпистемическую» ценность, максимизация которой рассматривается в качестве одной из важнейших целей познавательной деятельности. При этом фундаментальная идея связи информации и неопределенности сохраняется: «информацией некоторого предложения  $S$ , — пишет Хинтикка, — является количество неопределенности, которое мы элиминируем, когда узнаем, что  $S$  является истинным»<sup>1</sup>.

Во-вторых, данная информационная модель познания является более реалистической и обобщенной. Анализ с ее помощью процедуры подтверждения гипотезы, проведенный Хинтиккой и Пиетарином<sup>2</sup>, показывает, что используемые здесь меры вероятности и информации приводят к более приемлемым результатам. В случае когда роль гипотезы выполняет тот или иной конституент (или сильная генерализация, по Хинтикке), апостериорная вероятность точно одного конституента асимптотически приближается к единице, а апостериорные вероятности всех других конституентов — к нулю. (Аналогичный результат наблюдается и в случае «слабых генерализаций», т. е. некоторых дизъюнкций конституентов, с помощью которых может быть выражено любое замкнутое утверждение нашего языка.) В то же время информационное содержание такого конституента (гипотезы) возрастает по мере исключения других возможных классов индивидов (конституентов).

Следовательно, известный тезис об инверсивном характере связи информации и вероятности нуждается в уточнении. Исследования Хинтикки свидетельствуют о не-универсальном его характере. Он сохраняет силу для отношения априорной вероятности и информативности гипотезы (теории), но становится неприменимым (по крайней

<sup>1</sup> J. Hintikka, *The Varieties of Information and Scientific Explanation*, p. 312. Отсюда у Хинтикки эпистемически ценно (информативно) то знание, которое является истинным.

<sup>2</sup> J. Hintikka, J. Pietarinen, *Semantic Information and Inductive Logics*. — *Aspects of Inductive Logics*. Amsterdam, 1966.

мере в ряде важных ситуаций научного познания) для отношения «научная гипотеза (теория) и апостериорная вероятность». Это уточнение отвечает единству двух сторон научного познания: стремления к высокой априорной информативности (поиску, выдвижению «сумасшедших» идей, по Н. Бору) и стремления к высокой апостериорной вероятности, большой степени подтверждения выдвигаемых гипотез и теорий — единству, которое должна учитывать теория семантической информации.

Хинтикка использовал при этом принцип решения (базирующийся на известной теореме Бейеса), суть которого состоит в стремлении к максимизации ожидаемой полезности (ценности). Бейесовское правило «максимизируй ожидаемую полезность» интерпретируется в качестве призыва к максимизации ожидаемой информации, рассматриваемой, как мы уже указывали, в качестве эпистемической ценности. Разумеется, исчисление этой «ценности» подчиняется обычным аксиомам полезности Неймана — Моргенштерна.

Увеличение апостериорной вероятности точно одного конституента «не зависит от нашего решения задавать равные априорные вероятности конституентов, он имеет силу и в том случае, если всем им приписать любые ненулевые априорные вероятности»<sup>1</sup>. Это объясняется применением бейесовской процедуры вывода: субъекты, которые исходят первоначально из различных вероятностных предложений, могут на основе бейесовского принципа решения прийти к одним и тем же или близким результатам. Этим достигается «внесубъектный» характер научного знания, являющийся составным элементом его объективности.

Рассматриваемый подход делает статус семантической теории более проблематичным, чем это ранее представлялось. Ее отличие, например, от статистической теории информации связано скорее не с той или иной концепцией вероятности (частотной или логической), а с «необходимостью развития методов анализа вероятностей и информационного содержания индуктивных обобщений (замкнутых утверждений)»<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> J. Hintikka. On Semantic Information. — «Information and Inference». Dordrecht, 1970, p. 16.

<sup>2</sup> J. Hintikka. On Semantic Information. — «Information and Inference», p. 24. В частности, уже на уровне «монадического» языка первого порядка Хинтикка считает целесообразным при решении проблемы «взвешивания» конституентов применение вероятностных мер, зависящих от внелогических параметров: один из них —  $\gamma$  выражает меру

## 5. «ПОВЕРХНОСТНАЯ» И «ГЛУБИННАЯ» ИНФОРМАЦИЯ

Важнейшие проблемы любой семантической концепции информации, такие, как проблема задания весов базисным альтернативам или классам альтернатив, проблема определения вероятностных мер и мер информации, не могут решаться на чисто логических основаниях; это обнаруживается уже на уровне достаточно простых языков — монадических языков первого порядка. Рассмотрение более сложных языков усиливает это требование.

Отступление от чисто логической концепции вероятности в единстве с развитием логической семантики и легло в основу распространения Хинтиккой метода конститuentов на более сложные языки первого порядка и связанной с этим дальнейшей экспликации понятия информации и ее некоторых интересных применений в логике<sup>1</sup>. Здесь вновь возникает фундаментальная для всякой теории семантической информации проблема определения базисных альтернатив.

Для полных языков первого порядка (Хинтикка называет их полиадическими — они содержат многоместные предикаты, т. е. отношения) данная проблема носит достаточно нетривиальный характер и не может быть решена абсолютно, без наложения некоторых ограничений на тот запас языковых средств, которым мы располагаем. Хинтикка предполагает ее решение на основе развиваемого им нового логико-семантического подхода, называемого им *поверхностной семантикой*. Суть этого подхода (с содержательной точки зрения) состоит в наложении конечного предела на число индивидов и их отношений, которое мы можем рассматривать одновременно. С точки зрения формальной это ограничение равнозначно наложению *конечной верхней границы на число «слоев» кванторов*, входящих в то или иное высказывание *S*. Области действия этих кванторов содержатся в области действия каждого из предшествующих, т. е. имеют

иррегулярности универсума, воздействующей на вероятность экземпляфикации некоторого *Q*-предиката в ходе наблюдения; другой параметр —  $\alpha$  выступает в качестве меры иррегулярности, воздействующей на вероятность принятия общих законов в нашем универсуме. Это диктуется необходимостью учета зависимости семантической информации, которую несут предложения, наблюдение и индуктивные обобщения, от степени регулярности (иррегулярности) универсума (см. там же, стр. 18—22).

<sup>1</sup> J. Hintikka. Are Mathematical Truths Synthetic a priori? — «The Journal of Philosophy», 1968, v. 65, N 20; *его же*. Surface Information and Depth Information.



не совпадают понятия тривиальной и нетривиальной противоречивости, т. е. многие конституенты, будучи нетривиально противоречивыми, не являются в то же время тривиально противоречивыми<sup>1</sup>.

Подчеркивая тесную связь проблемы определения противоречивости конституентов с проблемами разрешения и полноты в логике первого порядка, Хинтиikka, опираясь на метод конституентов, предлагает некоторую регулярную процедуру определения все большего и большего количества противоречивых конституентов. Последняя состоит в расширении конституента  $C_i^{(d)}$  на все большую и большую «глубину» и в проверке получаемых «субординированных» конституентов на тривиальную противоречивость (процедура которой была уже описана выше). Это приводит к следующему результату: « $C_i^{(d)}$  является противоречивым, если, и только если, имеется «глубина» (например,  $d + e$ ), на которой все его субординированные конституенты являются тривиально противоречивыми»<sup>2</sup>.

Рассмотрение традиционных проблем разрешения и полноты в терминах конституентов показывает, что в реальных логических процедурах (опровержения, доказательства, обоснования условий связи либо эквивалентности суждений и т. п.) должно учитываться наличие *потенциальных* противоречий, которые обнаруживаются лишь в ходе дальнейшего логического анализа. Эта особенность применения метода конституентов к анализу полиадических языков принимается во внимание, наряду с отнесенностью конституента к определенной глубине, при решении второй основной проблемы любой семантической теории информации — проблемы взвешивания различных конституентов.

<sup>1</sup> Конституент  $C_i^{(d)}$  является тривиально противоречивым, если он нарушает по крайней мере одно из следующих требований: а) исключение какого-нибудь «слоя» кванторов в  $C_i^{(d)}$  должно приводить к конституенту глубины  $d - 1$ ; б) конституенты, получаемые исключением различных слоев кванторов, должны быть все тождественны (порядок конъюнктивных или дизъюнктивных членов при этом несуществен); в) во встречающихся в нем атрибутивных конституентах не должно быть дизъюнктивных членов, содержащих конъюнкцию контрадикторных (*J. Hintikka. Surface Information and Depth Information, p. 271—272*).

<sup>2</sup> *J. Hintikka. Surface Information and Depth Information, p. 273*. Как отмечает Хинтиikka, этот результат «представляет собой вариант теоремы о полноте логики первого порядка — вариант, который модифицирован для специального случая конституентов» (там же).



Ясно, что эти веса должны быть нормализованы (сумма их на любой глубине равняется 1). Так же естественно задавать нулевой вес тривиально противоречивым конституентам. Но как поступать в случае нетривиально противоречивого конституента, т. е. такого, который на данной глубине еще является тривиально непротиворечивым?

Ответ на этот вопрос, согласно Хинтикке, зависит от типа информации в каждом конкретном случае. Если то, что мы имеем в виду, является информацией о некоторой форме реальности, не зависимой от наших понятий и концептуальных систем, тогда мы должны задавать противоречивым конституентам нулевой вес<sup>1</sup>. Эту информацию Хинтикка называет глубинной информацией, а связанную с ней вероятность — индуктивной вероятностью.

Однако точное определение индуктивной вероятности и на этой основе глубинной информации является весьма сложным в конкретных научных процедурах. Имеются принципиальные трудности вычисления индуктивных вероятностей (и связанных с ними мер глубинной информации) тех или иных альтернатив, описываемых с помощью полиадического языка. Они совпадают по существу с трудностями проблемы разрешения в этом языке.

Чтобы информационная модель этих процедур была более адекватной, Хинтикка предлагает ввести понятие «поверхностной» (surface) вероятности и «поверхностной» информации и их мер, которые учитывают трудности эффективной вычислимости глубинной информации и индуктивных вероятностей. Основным свойством поверхностной вероятности является ее неинвариантность по отношению к логической эквивалентности. Она может быть охарактеризована как «степень убеждения в рациональности высказывания  $S$ , имеющаяся до того, как мы подвергаем его детальному логическому анализу с целью выявления его значения все более и более полно»<sup>2</sup>. В отличие от индуктивной (логической) вероятности поверхностная вероятность  $p'(S)$  может быть больше нуля, даже если  $S$  является нетривиально противоречивым (пока оно сохраняет свойство тривиальной непротиворечивости). Эта мера задает ненулевые веса всем конституентам, которые не являются тривиально противоречивыми. Но она ведет себя по отношению к тривиальной противоречивости, тривиальной (поверхностной) тавтоло-

<sup>1</sup> J. Hintikka. Surface Information and Depth Information, p. 274.

<sup>2</sup> Ibid., p. 276.

гии<sup>1</sup> и т. д. подобно тому, как мера индуктивной вероятности оценивает нетривиальную противоречивость, тавтологию и т. д.

Легко заключить, что и «поверхностная» информация, и ее меры  $\inf^{surf}(S) = -\log p'(S)$ ,  $\text{cont}^{surf}(S) = 1 - p'(S)$  также будут неинвариантными по отношению к логической эквивалентности, противоречивости, истинности и т. д.<sup>2</sup> Но они, как и в случае «поверхностной» вероятности, обнаруживают аналогию с мерами «глубинной» информации  $\inf^{depth}$  и  $\text{Cont}^{depth}$ , если речь идет об информационной оценке тривиальных эквивалентности, противоречивости, поверхностной тавтологии и т. д. Наиболее фундаментальное свойство «поверхностной» информации проявляется при добавлении новых слоев кванторов: «поверхностная» информация «расширения» высказывания  $S$  (обозначаемого  $E^{d+l}(S)$ ) увеличивается при прибавлении нового квантора, если, и только если, один из его конstituентов становится тривиально противоречивым впервые на глубине  $d + l + 1$ . Содержание понятия «поверхностная информация» тем самым согласуется с общим подходом к информации как к уменьшению или элиминации неопределенности.

Дальнейший анализ «поверхностной» информации приводит к формулированию новых мер вероятности и информации, на основе которых выявляется отношение между «поверхностной» и «глубинной» информацией. Среди них важную роль играет вероятностно-подобная мера  $p^{(d)}$ . Она может трактоваться как степень убеждения в рациональности  $S$  в тот момент, когда логический анализ некоторых высказываний глубины, меньшей чем  $d$ , доведен до конца. С помощью  $p^{(d)}$  могут быть определены меры поверхностной информации, когда происходит увеличение глубины  $d$ . Эти меры удовлетворяют требованию:

$$\inf^{(d)}(S) < \inf^{(d+1)}(S),$$

где высказывание  $S$  имеет глубину  $l < d$ , если хотя бы один из конstituентов нормальной формы (глубины  $l$ ) высказы-

<sup>1</sup> По Хинтикке,  $S$  является поверхностной тавтологией, если, и только если,  $\neg S$  является тривиально противоречивым.

<sup>2</sup> Так, в случае импликации  $S \rightarrow R$   $\inf^{surf}(R)$  может превосходить  $\inf^{surf}(S)$ , поскольку предложение  $R$  может исключать конstituентов больше, чем предложение  $S$  (ср. с  $\inf^{depth}(R)$ , которых не может быть больше  $\inf^{depth}(S)$ ).

вания  $S$  становится тривиально противоречивым впервые на глубине  $d + 1$ .

Опираясь на эти меры, можно эксплицировать отношение между «поверхностной» вероятностью (информацией), с одной стороны, и «глубинной» вероятностью (информацией) — с другой. Первое отношение может быть представлено

$$\lim_{l \rightarrow \infty} p^{(d+l)}(S) = p^{\text{depth}}(S),$$

а второе

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \inf^{(d+l)}(S) = \inf^{\text{depth}}(S),$$

где  $S$  есть высказывание глубины  $d$ . Эти отношения раскрывают связь поверхностной и глубинной информаций.

Значит, трактовка глубинной информации как информации о реальности и поверхностной — как информации относительно наших концептуальных систем обнаруживает относительный характер. В реальных процессах познания обладание большей поверхностной информацией дает возможность «лучше уловить то, что высказывание  $S$  сообщает о внешнем мире, и, следовательно, получить информацию (освобождая от неопределенности) относительно реальности, не зависимой от разума»<sup>1</sup>. Полученная информация в свою очередь увеличивает наше знание концептуальной системы, способствуя превращению нетривиально противоречивых конститuentов в тривиально противоречивые, и, следовательно, увеличивает поверхностную информацию.

#### 6. ОТ СЕМАНТИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ ИНФОРМАЦИИ К ГНОСЕОЛОГИЧЕСКИМ И ПРАГМАТИКО-КОММУНИКАТИВНЫМ ПРОБЛЕМАМ

Понятие поверхностной информации и ее меры находит применение при анализе многих логических процедур. Возникает возможность их информационной оценки, причем с помощью мер поверхностной информации можно измерять не только прирост информации в случае доведенных до конца опровержения, доказательства, вывода и т. п., но и прирост информации в случае частичного их выполнения. Значит, меры поверхностной информации могут применяться в систематизации эвристик, используемых при поиске логических

<sup>1</sup> J. Hintikka. Surface Information and Depth Information, p. 291.

доказательств, определении степени их нетривиальности и т. п.

Рассмотрим, например, с этих позиций логическую процедуру опровержения высказывания  $S$  глубины  $d$ . Его поверхностная информация равна  $\text{cont}^{(d)}(S) = 1 - p^{(d)}(S)$ . Если оно является ложным, то на некоторой глубине  $d + l$  все конstituенты его «расширения»  $E^{(d+l)}(S)$  станут тривиально противоречивыми. Это означает, что поверхностная вероятность  $p^{(d+l)}(S) = 0$ , а поверхностная информация  $\text{cont}^{(d+l)}(S) = 1$ . Прирост информации в ходе введенного до конца опровержения  $\text{cont}^{(d+l)}(S) - \text{cont}^{(d)}(S) = p^{(d)}(S)$ . Если процедура опровержения лишь частично выполнена, тогда ее информативность можно измерить величиной

$$\text{cont}^{(d+l)}(S) - \text{cont}^{(d)}(S) = p^{(d)}(S) - p^{(d+l)}(S).$$

Понятие поверхностной информации проливает новый свет на то, «как дедуктивные процедуры увеличивают наши знания». Данный логико-семантический подход («поверхностная семантика») решительно расходится с взглядом (составляющим часть установок логического позитивизма), согласно которому истины логики (и математики) суть пустые тавтологии. Подход этот дает аргументы для критики и чисто психологической трактовки информативности логического доказательства. «Наше понятие поверхностной информации, — пишет Хинтиikka, — дает меру информации, которая может увеличиваться посредством логического и математического доказательства»<sup>1</sup>.

В главе IV первой части кратко охарактеризована логико-прагматическая схема интеллектуальной коммуникации, основанная на тезаурусной концепции семантической информации. Здесь обратим внимание на определенное родство теории «поверхностной семантики» с этой схемой.

Важной чертой логико-тезаурусной схемы семантической информации и коммуникации является устранение субъективно-психологических аспектов из представлений относительно коммуникации с помощью языка и логики: вводятся формальные методы описания «индивидуальных» параметров участников актов коммуникации (и познания). В понятии поверхностной информации также нет ничего субъективного или психологического и, следовательно, нет

<sup>1</sup> J. Hintikka. Surface Information and Depth Information, p. 289.

его и в той дополнительной информации, которую несет логическое доказательство.

В чем же заключается новизна, несомая доказательством? В том, что в рассмотрение вводятся новые объекты. С позиций «поверхностной семантики» осуществлять процесс логического вывода (доказательства) означает вводить в рассмотрение все новые и новые индивиды, их классы, отношения друг к другу, без чего невозможно получить заключение. Это является «атрибутивной» характеристикой логического вывода, которую вряд ли можно считать вытекающей из чисто психологической неспособности человека увидеть заключение в посылках, где оно уже имеется в готовом виде. Вот почему Хинтикка утверждает, что «новая информация, производимая логическим доказательством, является полностью объективной»<sup>1</sup>.

Концепция знания и интеллектуальной коммуникации как введения в рассмотрение новых объектов и понятий имеет глубокий диалектико-материалистический смысл. Это было показано С. А. Яновской<sup>2</sup>, в четкой форме сформулировавшей концепцию «введения в рассмотрение» и «выведения из рассмотрения» абстрактных объектов. Эта концепция получает в последнее время все большее применение и в логико-методологических исследованиях, и в логико-семантических, и логико-прагматических (Ю. А. Шрейдер) теориях информации. К ней фактически примыкает и теория Хинтикки.

Развитие семантических теорий информации во многом было обусловлено прогрессом теорий «значения» языковых выражений, и прежде всего логико-семантических их вариантов. Но диалектика развития соответствующих идей такова, что в ходе разработки теории информации в широком смысле категория «значения» в свою очередь подвергается обобщению и уточнению.

Это выразилось и в создании количественных мер информации (Карнап и Бар-Хиллел, Кемени), и в известных уточнениях понятий синонимичности (Карнап, Кемени, Уэллс), аналитичности и синтетичности (Тернебом), и в эк-

<sup>1</sup> J. Hintikka. *Surface Information and Depth Information*, p. 291.

<sup>2</sup> См. С. А. Яновская. Проблемы введения и исключения абстракций более высоких (чем первый) порядков. — «The Foundation of Statements and Decision». Warszawa, 1965. Идеи С. А. Яновской в этом вопросе активно разрабатывает Д. П. Горский (см. его статьи в книгах: «Логическая семантика и модальная логика». М., 1967, и «Практика и познание». М., 1973).

спликации ряда сторон научного знания — его форм, методов и уровней (Кемени, Яновская, Войшвилло), и в концепции расширения знания как «введения в рассмотрение» новых объектов (Яновская, Горский, Шрейдер, Хинтикка). В частности, для экспликации понятия (лингвистического) значения и связанных с ним понятий может использоваться поверхностная информация.

Согласно Хинтикке, невозможность эффективной вычислимости глубинной информации, с одной стороны, и возможность эффективной интеллектуальной коммуникации в процессе языкового общения между людьми — с другой, наталкивают на предположение, что «значение» общего высказывания не следует связывать с глубинной информацией, отношение «включения» значений — с логической импликацией, синонимичность «значений» — с логической эквивалентностью и т. д. Более естественным представляется связать (лингвистическое) значение с поверхностной информацией, отношение «включения» значений — с тривиальной импликацией<sup>1</sup> и т. д. Например, «значение» скорее может быть отождествлено со множеством конститuentов, которые не являются тривиально противоречивыми, чем со множеством всех непротиворечивых конститuentов. Именно на этом пути, полагает Хинтикка, «возможно частичное слияние теории семантической информации с теорией семантики»<sup>2</sup> (здесь имеется в виду лингвистическая семантика. — *Ред.*), которое в свою очередь является выражением тенденции к синтезу логических и внелогических средств при построении теории «естественнонаучного» (экспериментального и описательного) исследования значения языковых выражений, так называемой экспериментальной семантики<sup>3</sup>. Если при этом учесть тесную связь категории «значения» с понятиями «знание», «убеждение» (*belief*), «мнение» и т. д., то открываются возможности применения

<sup>1</sup> Выражение  $R \rightarrow S$  является тривиальной импликацией, если, и только если, отношение импликации обнаруживается на глубине  $d_R = d_S$  (*J. Hintikka. Surface Information and Depth Information*, p. 286).

<sup>2</sup> *J. Hintikka. Surface Information and Depth Information*, p. 292.

<sup>3</sup> Об экспериментальной семантике см.: Ю. А. Шрейдер. О семантических теориях информации. — «Информация и кибернетика»; Н. И. Жинкин. О некоторых вопросах работы мозга человека как семантического устройства. — «Информационные материалы» Научного совета по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР, 1968, вып. 7 (20); Б. В. Бирюков. Кибернетика и методология науки, стр. 186—192.

понятия поверхностной информации в сфере информационно-логического анализа релевантных импликаций, интенциональных контекстов, интеллектуальной коммуникации т. п.

Итак, мы видим, что современные логико-информационные разработки, выявляя новые аспекты понятия семантической информации и эксплицируя их с помощью новых логико-семантических и математических средств, ведут к усилению конкретно-научного значения теории семантической информации. Отличительные черты этих разработок — обобщенный характер, «финитность», уточнение отношения информации и вероятности, подход к информации как эпистемической ценности, учет внелогических факторов (параметров) в аппарате семантических теорий информации и др. — приводят в целом к более адекватной информационной «модели» научного познания и свидетельствуют тем самым о плодотворности указанной выше тенденции к синтезу логико-семантических теорий информации и экспериментального статистического и прагматического исследования проблемы смысла и значения. Последнее связано с необходимостью анализа становления и развития прагматических концепций информации<sup>1</sup>.

Суть *прагматических* концепций информации состоит в том, чтобы, опираясь на результаты синтаксической и семантической теорий информации, эксплицировать понятие «прагматическая информация», т. е. уточнить его содержательные, качественные стороны и определить их количественные меры. В то же время становление и развитие теорий прагматической информации<sup>2</sup> связано с выдвижением и разработкой ряда новых понятий, необходимых для выражения их специфики. Информация, ее ценность, полезность и т. д. определяются в них с точки зрения влияния

<sup>1</sup> Исследование этих концепций см.: И. И. Гришкин. Понятие информации. Логико-методологический аспект. Здесь они будут затронуты лишь в той мере, в какой в них обнаруживаются единство и специфика их основных понятий по сравнению с логико-семантическими и синтаксическими теориями информации.

<sup>2</sup> Помимо указанных в предыдущей главе работ А. А. Харкевича и Ю. А. Шрейдера см.: R. L. Ackoff. Towards a Behavioral Theory of Communication. — «Management Science», 1958, v. 4, N 3; W. Miles. The Measurement of Value of Scientific Information. — «Operation Research in Research and Development». N. Y. — London, 1963; М. М. Бонард. Проблема узнавания. М., 1967; D. Harrah. Communication: A Logical Model. Cambr. (Mass.), 1967; И. А. Полежаев. К определению понятия «информация». Прагматический аспект. О ценности информации. — «Исследования по кибернетике». М., 1970.

сообщения на поведение той или иной информационной системы, на знания «получателя», на решение им определенных задач. Для всех них характерно стремление связать понятие прагматической информации с целью (Харкевич) и выдвинуть те или иные количественные меры ценности информации.

Наиболее полно специфика прагматического подхода обнаруживается в использовании в его рамках понятия субъективной вероятности для уточнения прагматического аспекта информации. Под субъективной вероятностью в отличие от частотной (эмпирической) и логической, индуктивной концепции вероятности понимается обычно степень разумной уверенности (убеждения) субъекта (группы лиц, общества в целом) в том, что наступит тот или иной исход (действия, опыта и т. д.) или что та или иная информация (высказывание, гипотеза и т. д.) истинна. Существенно при этом, что данное определение легко поддается кибернетическому обобщению, если в качестве «субъекта» понимается некоторая самоуправляющаяся или самоорганизующаяся система.

Понятие субъективной вероятности в последнее время начинает все более применяться в психологии, социологии, теории принятия и логике решений и т. д. Предпринят ряд попыток создания аксиоматических теорий субъективной вероятности, суть которых состоит в стремлении более адекватно отразить поведение «целестремленных существ», и прежде всего индивидов<sup>1</sup>.

Необходимость применения понятия субъективной вероятности в теории информации выявилась первоначально в процессе прагматического исследования человеческой коммуникации. Уже рассмотрение синтаксического аспекта коммуникации между людьми (отправителем и получателем сообщения) приводит к введению понятия «субъективная информация»<sup>2</sup>, так как конечные вероятностные схемы передаваемых знаковых последовательностей (в силу, например, различия запасов слов и частот их употребления) в общем случае неодинаковы у отправителя и получателя.

<sup>1</sup> Анализ этих попыток и основных понятий теории субъективной вероятности см.: С. П. Будбаева. К вопросу о понятии субъективной вероятности. — «Философские науки», 1972, № 2.

<sup>2</sup> «Lexikon der Kybernetik». Hamburg, 1964, S. 67. Термин «информация» здесь употребляется в шенноновском смысле (см. также Н. Frank. Kybernetische Analysen subjektiver Sachverhalte. Quickborn, 1964, S. 24).



На этом пути понятие субъективной информации — информации для субъекта — приобретает точный смысл.

Переход к прагматическому изучению семантических аспектов коммуникации показывает плодотворность употребления понятия субъективной вероятности и для количественного анализа ценности коммуникации. Предлагаемые на его основе меры и оценка коммуникации, как указывает Майлс, не ограничиваются только случаем увеличения информации<sup>1</sup>. Они могут оказаться и отрицательными. Сообщение, например, может не только увеличить информацию, но и уменьшить ее. Последнее (передача «отрицательной информации») объясняется возрастанием неопределенности выбора последовательностей действия. В логико-прагматической модели коммуникации Д. Харра<sup>2</sup> понятие субъективной вероятности выступает важным средством создания специальной программы обработки сообщений, которой снабжается получатель с целью извлечения из всей совокупности сообщений полезной их части. Это приводит к более широкому и рациональному применению количественных мер информации для оценки сообщений в реальных коммуникационных ситуациях.

Важно при этом подчеркнуть, что понятие субъективной вероятности, позволяя отразить такую особенность процесса коммуникации и выбора решения, как изменчивость критериев, точек зрения, опыта и знаний коммуникантов, в то же время, чтобы быть объективно обоснованным, должно учитывать вероятности различных состояний среды и истинность или ложность сообщений о потенциально возможных ситуациях. Поэтому субъективная вероятность не представляет собой произвольную конструкцию, а «обусловлена всей сложностью исследуемого объекта и конкретными способами его описания, измерения»<sup>3</sup>.

Это находит выражение в формулируемых мерах *ценности* информации. Так, мера полезной информации, предложенная М. М. Бонгардом, имеет тем большую величину, чем меньше предполагаемое распределение вероятностей (гипотеза наблюдателя, по Бонгарду) отличается от действительного распределения вероятностей. Тем самым она учитывает единство семантических и прагматических характеристик сообщения. Это свойственно и развиваемому И. А. Полетаевым негэнт-

<sup>1</sup> W. Miles. The Measurement of Value of Scientific Information, p. 108.

<sup>2</sup> D. Harrah. Communication: A Logical Model.

<sup>3</sup> А. С. Кравец. Вероятность и системы. Воронеж, 1970, стр. 190.

ропийному подходу к проблеме ценности информации на уровне кибернетических систем. Согласно этому подходу, ценность сообщения, по отношению к которому система «некомпетентна» (т. е. не способна установить его «смысл»), равна нулю. Увеличение степени компетентности, а также усложнение аппарата отражения системы, некоторым рациональным способом и в определенных пределах, приводят к возрастанию ценности сообщения, измеряемому увеличением негэнтропии в системе.

Прагматические концепции информации вносят вклад в анализ роли субъектного фактора, его возможностей в таких познавательных ситуациях, в которых неопределенность «создается... не одним только поведением объекта, но в которых существенную роль начинает играть неконтролируемая или неполностью контролируемая и поэтому принципиально не могущая быть исключенной деятельность самого познающего и принимающего решения субъекта»<sup>1</sup>. В ходе дальнейшего развития прагматических теорий вырисовывается подход к информации как к любому «изменению в убеждении» (знании, мнении) познающего субъекта. Оно, в частности, может включать и увеличение неопределенности в той или иной гносеологической ситуации, и получение совершенно нового знания, относительно которого у нас не было никаких вероятностных гипотез, и всевозможные перестройки тезауруса (Ю. А. Шрейдер) познающего субъекта, характер которых может быть положен в основу измерения информации.

<sup>1</sup> С. П. Будбаева. К вопросу о понятии субъективной вероятности. — «Философские науки», 1972, № 2, стр. 108.

## Глава III

# ИНФОРМАЦИЯ И СОЗНАНИЕ

Материал предшествующей главы показывает, таким образом, что еще не выработано семантико-информационной теории или теорий, достаточно всесторонне раскрывающих содержательные стороны «человеческой» информации. Это очевидно в применении не только к концепции Р. Карнапа и И. Бар-Хиллела, в терминах которой весьма затруднительно анализировать более или менее сложные формы научного познания, несущие для человека смысл, значение (теории, научные понятия, «резюмирующие» целые системы научных взглядов и т. п.), но и к более богатым семантико-прагматическим теориям Кемени, Хинтикки или Шрейдера. Однако прогресс в данной области налицо. Ныне намечаются новые возможности в измерении образного (в гносеологическом смысле понятия образа) значения языково-мыслительных образований. Ставится задача более органического синтеза статистических, логико-семантических, формализованных прагматических теорий информации с «психологическими» теориями информации.

Как же человек понимает сигналы, языковые выражения, знаковые конструкции, имеющие для него определенный смысл, содержание, значение, несущие информацию? Решение этой проблемы возможно и путем информационной трактовки связи между идеальными явлениями (субъективными состояниями внутреннего переживания, осознаваемыми человеком как восприятия, образы фантазии, мысли, эмоции, волевые усилия и т. п.) и теми еще недостаточно выясненными нейродинамическими процессами, которые, по убеждению нейрофизиологов, должны быть за них ответственны.

### 1. ИДЕАЛЬНОЕ КАК ИНФОРМАЦИЯ, НЕПОСРЕДСТВЕННО «ДАННАЯ» ЛИЧНОСТИ

Сознание, как известно, есть свойство наиболее высокоорганизованной формы материи — головного мозга чело-

века. Правда, недавние исследования поведения животных раскрыли такое богатство их внутреннего мира, о котором наука ранее и не подозревала: психика «младших братьев» человека, высоко стоящих на эволюционной лестнице, не столь примитивна<sup>1</sup>. Тем не менее сознание выражает качественно более высокий тип управления, саморегуляции в самоорганизующихся системах живых организмов. Специфические свойства этого типа саморегуляции еще далеко не выяснены не только в естественнонаучном, но и в психологическом плане. По мнению нейрофизиологов, психологов и философов, кибернетический подход способен внести немаловажный вклад в естественнонаучный анализ природы сознания.

Сознание есть явление идеальное, противопоставляемое явлениям материальным. «Что и мысль и материя «действительны», т. е. существуют, — читаем мы у В. И. Ленина, — это верно. Но назвать мысль материальной — значит сделать ошибочный шаг к смешению материализма с идеализмом»<sup>2</sup>. Идеальное, мысль, сознание есть для носителя психики реальность не объективная, а *субъективная*. Если не принять этот тезис, то мы (хотим мы того или нет) придем к *субстанционализации* идеального, которая в научно-философском плане несостоятельна, какую бы форму она ни принимала: идеалистического «отождествления» материальной реальности с «духом», дуалистического «разделения» мира на две «сущности» или вульгарно-материалистического «овеществления» идеального<sup>3</sup>.

Термином «идеальное» пользуются тогда, когда речь идет об определенной разновидности психических явлений — о явлениях, *осознаваемых* личностью в том временном интервале, в котором они протекают (т. е. о явлениях, обладаю-

<sup>1</sup> См. Л. В. Крушинский. Элементарная рассудочная деятельность животных и ее роль в эволюции. — «Философия и теория эволюции». М., 1974.

<sup>2</sup> В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 18, стр. 257.

<sup>3</sup> Примером может служить концепция Экклза, который отделяет мышление, «дух» от материального субстрата, видя в идеальном лишь активное начало, воздействующее на материю, но не зависящее от вещественно-энергетических характеристик. «Приняв сознание за самостоятельное (и первичное) начало, за особую нематериальную сущность, Экклз отрезает путь к пониманию как его зависимости от нервных процессов, так и его активной регуляторной роли в жизнедеятельности» (А. Р. Лурия, Г. С. Гургенидзе. Философские приключения известного нейрофизиолога. — «Вопросы философии», 1972, № 6, стр. 151).

щих свойством рефлексии: отображения самих себя, отображения отображения<sup>1</sup>).

Феномены сознания суть субъективные переживания личности — субъективные реальности; ощущение или мысль существуют лишь как такого рода реальности. Как же изучать субъективную реальность, исследуя мозг, относящийся к реальности объективной?

Начиная со второй половины прошлого века этот вопрос вставал перед исследователями в виде так называемой проблемы психической причинности и с тех пор составлял хроническую «болезнь» естественнонаучного мышления, нацеленного на изучение человеческой психики, сознательно обусловленной деятельности. В последние десятилетия наблюдались безуспешные попытки преодоления этих трудностей путем изъятия категории идеального при естественнонаучном подходе к явлениям сознания.

Трудности, о которых идет речь, коренятся в том, что между категорией идеального и классическими понятиями естествознания не существует явных логических связей. Так, категория материального достаточно широко интерпретируется посредством категорий естественных наук (вещество, поле, масса, энергия и т. д.). Категория же идеального, как ни одна другая философская категория, «обособлена» от естественнонаучных понятий. Отсюда, однако, не следует, что эта категория вообще не имеет значения для естествознания. Фактически она всегда «работала» в том смысле, что стимулировала поиски естественнонаучного объяснения психики и явно или неявно задавала «систему отсчета» для соответствующих теоретических построений (это нетрудно увидеть даже у радикальных бихевиористов<sup>2</sup>).

Кибернетика дает реальную возможность для конкретной научной интерпретации идеального. Здесь фундаментальную роль могут сыграть представления об информации и информационных процессах. Исходным пунктом будет соотношение между понятиями информации и сигнала. Эти понятия отнюдь не тождественны. Сигнал есть мате-

<sup>1</sup> Подробнее о категории идеального см.: Д. И. Дубровский. Психические явления и мозг. М., 1971.

<sup>2</sup> По этому поводу Дж. Миллер, Е. Галантер и К. Прибрам, указывая на то, что нейрофизиологи и психологи, изучающие поведение, не могут обходиться без представления о «сознании», замечают: «Так делает каждый по той простой причине, что без этого нельзя понять смысл поведения» (Дж. Миллер, Е. Галантер, К. Прибрам. Планы и структура поведения. М., 1964, стр. 235).

риальный носитель информации в информационных процессах. Следуя Н. Винеру, информацию можно определить как содержание сигнала (сообщения). Винер ясно различает понятия информации и сигнала, подчеркивая, что «информация — это обозначение содержания, полученного из внешнего мира в процессе нашего приспособления к нему и приспособливания к нему наших чувств»<sup>1</sup>.

Необходимость различения понятий «информация» и «сигнал» обусловлена тем, что сигнал включает вещественно-энергетические характеристики, информация же свободна от них. Информация не существует отдельно от сигнала, необходимо воплощена в его материальной структуре. Но она в известных рамках не зависит от конкретных физических свойств носителя: одно и то же содержание может быть заключено в разных физических процессах и структурах, передано разными сигналами. Информация в некоторых пределах инвариантна по отношению к форме сигнала. Это имеет первостепенное значение для понимания природы идеального.

Рассмотрим какой-либо сравнительно простой случай психического отображения. Пусть индивид зрительно воспринимает в достаточно малый отрезок времени некоторый объект  $A$ ; это значит, что индивид переживает образ объекта  $A$  (обозначим указанный субъективный образ через  $\alpha$ ). В тот же отрезок времени в головном мозгу индивида возникает определенный нейродинамический процесс (определенная нейродинамическая структура), порождаемый действием объекта  $A$  и ответственный за переживаемый индивидом образ  $A$  (обозначим этот нейродинамический эквивалент образа через  $x$ ). Естественно считать, что субъективный образ и его нейродинамический носитель ( $\alpha$  и  $x$ ) суть явления *одновременные* и *однопричинные*. Тем не менее эти явления следует различать:  $\alpha$  есть явление идеальное, т. е. субъективная реальность (оно не может быть названо материальным, поскольку не существует в виде объективной реальности, доступной внешнему наблюдателю),  $x$  есть материальный процесс, происходящий в головном мозгу;  $x$  не является психическим, идеальным образом объекта  $A$ , а есть *кодированное* отображение объекта  $A$ . И этот нейродинамический код, существующий в головном мозгу данной личности, *переживается* ею именно как образ: подвергается, так сказать, психическому декодированию.

<sup>1</sup> Н. Винер. Кибернетика и общество, стр. 31.

Отношение между  $\alpha$  и  $x$  можно считать частным случаем отношения между информацией как содержанием и сигналом как его формой;  $\alpha$  — информация, полученная личностью об объекте  $A$ ;  $x$  — материальный, нейродинамический носитель этой информации, сигнал. Однако личность как целостной самоорганизующейся системе непосредственно в ее внутреннем мире «дана» только информация, в то время как ее нейродинамический носитель (сигнал) глубоко скрыт от нее (я не знаю, что происходит в моем мозгу, когда я вижу объект  $A$ , переживаю образ объекта  $A$ ).

Все те психические явления, которые можно назвать идеальными в используемом нами смысле этого термина, представляют собой не что иное, как информацию, данную личности в непосредственном, «чистом» виде. Сигнал как определенная организация элементов и процессов нервной системы всегда «элиминирован» для индивида. В случае, например, зрительного восприятия какого-либо объекта для личности совершенно безразличны и идущие от объекта восприятия электромагнитные колебания, и их действие на сетчатку глаза, и генерируемый на выходе сетчатки поток нервных импульсов, и, наконец, тот мозговой нейродинамический комплекс, который переживается личностью в виде зрительного образа.

То, что мы называем идеальным, есть способность личности иметь информацию в «чистом» виде и оперировать ею во времени. Указанная способность, возникающая на уровне общественного индивида, свидетельствует о том, что личность способна оперировать некоторым классом мозговых сигналов (т. е. теми мозговыми нейродинамическими комплексами, которые обладают свойством представлять для личности информацию в «чистом» виде). В самом деле, мы можем в большинстве случаев совершенно свободно, независимо от наличных внешних воздействий переключать наше внимание с одного объекта на другой, стимулировать движение своей мысли в том или ином направлении (это и есть способность относительно свободного оперирования информацией в «чистом» виде).

Значит, личность способна активировать и деактивировать соответствующую последовательность мозговых нейродинамических систем типа  $x$ , т. е. фактически способна управлять нейродинамическими системами данного типа. Это может быть понято только в том смысле, что нейродинамические мозговые системы типа  $x$  являются самоуправляемыми, самоорганизующимися системами, что они состав-

ляют в системе человеческого индивида *личностный уровень самоорганизации*.

Сказанное позволяет наметить пути разработки проблемы в кибернетическом плане, акцентировать внимание на специфических структурно-динамических свойствах структур типа *x*, обеспечивающих уникальные свойства сознательного, идеального отображения (такие, как отображение отображения, единство модальностей «я» и «не-я», ибо в каждом сознательном акте содержится отображение одновременно объекта и субъекта, «себя» и «иного»).

Можно, по-видимому, утверждать, что если на допсихическом уровне для самоорганизующейся системы информация неотличима от сигнала (и на этом основании в кибернетике нередко не дифференцируют понятия информации и сигнала), то на уровне психического управления происходит как бы раздвоение единого, выделение информации из сигнала, совершающееся в субъективной форме (что равнозначно возникновению субъективной формы отображения).

Как же в ходе эволюции и антропогенеза возникает и развивается сознательно-психическое отображение — этот качественно новый уровень информационных процессов?

Способность иметь информацию в «чистом» виде и оперировать ею возникает на основе использования принципа инвариантности информации по отношению к форме сигнала, ибо для управления нужна информация именно как содержание сообщения, а форма сигнала, т. е. физические свойства носителя информации, здесь несущественна. Реализация указанной способности обеспечивает самоорганизующейся системе (личности, коллективу, обществу) в принципе безграничное расширение диапазона возможностей отображения действительности и управления ею, так как идеальное моделирование означает в определенном смысле «выход» за пределы тех пространственно-временных «ограничений», которым подвластны все физические процессы.

## 2. ПРОБЛЕМА НЕЙРОДИНАМИЧЕСКОГО КОДА СУБЪЕКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Подход к идеальному с использованием понятия информации обещает, по-видимому, пролить свет на некоторые существенные черты субъективных феноменов и вместе с тем конкретизировать две *взаимосвязанные проблемы*.

Первая из них представляет собой проблему нейродинамической интерпретации субъективных явлений с их содер-



жательной и структурной сторон, т. е. изучения того класса мозговых сигналов (нейродинамических структур типа  $x$ ), содержание которых способно выявляться для личности непосредственно, в «чистом» виде. Как возможна для самоорганизующейся системы «представленность» информации в «чистом» виде? Как происходит извлечение содержания из «нейродинамического сигнала» в виде субъективного переживания? Каковы организация, специфические структурнодинамические свойства соответствующих сигналов, на основе которых осуществляется процесс «внутриличностного декодирования»?

Сопоставление сознательных и бессознательных психических явлений<sup>1</sup> с точки зрения особенностей организации их мозговых нейродинамических эквивалентов (сигналов) помогает понять механизм «извлечения» информации из сигнала и оперирования ею в «чистом» виде. Дальнейший шаг в разработке проблемы состоит в выяснении принципов кодирования информации в головном мозгу. С одной стороны, нейродинамический процесс есть отображение внешней для организма реальности, есть *кодирование* процессов внешней действительности, познаваемой личностью. С другой стороны, сам процесс есть реальность, и идеальное есть субъективное раскрытие этой реальности для личности, т. е. своего рода декодирование. Понятия кода, кодирования и декодирования в этом случае толкуются в расширительном и более «неопределенном» смысле, чем это обычно принято в кибернетике.

Если *идеальное* есть «кодовый образ» нейродинамического процесса, переживаемого человеком, и закодированной в этом процессе реальности, то возникает возможность «обернуть» проблему: взглянуть на идеальное в свою очередь как на «кодовый прообраз» нейродинамического процесса и поставить задачу выяснить тот код, которым это идеальное кодируется. Именно на последнем пути оказывается возможным подход к психолого-философской проблеме идеального с позиций естествознания и кибернетики — подход, преследующий цель раскрытия *нейродинамического кода субъективных явлений*. Здесь возникает ряд интересных задач (и трудностей).

<sup>1</sup> В общем «балансе» мозговых информационных процессов бессознательное играет чрезвычайно существенную роль: на бессознательном уровне перерабатывается в секунду  $10^9$  бит информации, в то время как на сознательном только  $10^2$  бит.

Однозначный ли характер имеют кодовые преобразования в цепи «реальность — мозговой сигнал — идеальное явление»? Как следует преодолевать трудность, связанную с тем, что субъективные состояния крайне «неконструктивны»? Варьируют ли кодовые преобразования от личности к личности? Здесь нет возможности подробно касаться всех этих вопросов. Отметим лишь те из них, по которым реально наметились линии исследований.

Задача расшифровки нейродинамического кода субъективных явлений имеет два главных уровня, условно называемые формальным и содержательным. В первом случае имеется в виду выяснение нейродинамических эквивалентов тех или иных видов, форм субъективных явлений, например зрительного восприятия как такового, чувства боли или состояния страха вообще. В этом направлении уже достигнуты значительные успехи, связанные с использованием методов непосредственного экспериментального воздействия на мозг<sup>1</sup>.

Несравненно более сложной является задача расшифровки нейродинамического кода субъективных явлений на содержательном уровне, т. е. установление соответствия между переживаемыми человеком *конкретными* образами реальности (внешней и «внутренней», относящейся к его собственному организму) и нейродинамическими процессами. Эта задача предполагает выяснение как инвариантных для разных личностей принципов кодирования и переработки информации в головном мозгу при отображении однородных (одинаковых) объектов, так и специфических черт такого рода кодирования и переработки информации на уровне отдельной личности. Несмотря на большие трудности, возникающие при анализе путей решения указанной задачи, существуют, на наш взгляд, достаточные основания считать ее принципиально разрешимой.

Дело в том, что при отображении однородных объектов одним и тем же человеком вариативность свойств сигнала (т. е. мозговой нейродинамической системы, ответственной за переживаемое данным человеком субъективное отображение данного объекта в разное время и в разных условиях) *должна* как-то коррелироваться с вариативностью его содержания (т. е. воплощенной в сигнале информации). Принцип инвариантности информации по отношению к физическим характеристикам ее носителя здесь не нарушается,

<sup>1</sup> См. Х. Дельгадо. Мозг и сознание. М., 1971.

поскольку особенности способа кодирования в любой будущей момент не являются predeterminedными во всех отношениях. Ведь в мире нет абсолютно оригинальных, абсолютно неповторимых явлений; любое различие между ними с необходимостью содержит некоторую общность. Поэтому особенности нейродинамического кода субъективных явлений в каждом отдельном случае не исключают возможности его объяснения и расшифровки. Здесь, как и везде, наука будет иметь своим объектом определенные инварианты. Можно привести аналогию: речь каждого человека имеет неповторимые особенности, но это не является препятствием для взаимопонимания<sup>1</sup>.

Проблема расшифровки нейродинамического кода субъективных явлений с их содержательной стороны уже вышла из сферы чисто теоретического обсуждения и вступила на путь экспериментальной разработки. Значительный интерес в этом плане представляют исследования, проводимые под руководством Н. П. Бехтерева. Возглавляемый ею научный коллектив на протяжении ряда лет ведет в условиях клиники перспективные нейропсихологические исследования головного мозга человека. Исходя из строго лечебных целей в мозг вживляются электроды, с помощью которых регистрируется биоэлектрическая активность соответствующих нейронных популяций при различных видах психической деятельности (число электродов, вводимых в подкорковые структуры и отдельные зоны коры мозга человека, может при этом исчисляться десятками). Стратегическая задача указанных исследований состоит в том, чтобы выявить нейрофизиологические корреляты конкретных психических явлений.

Отдавая себе отчет о тех значительных проблемах и трудностях, которые стоят на пути решения этой задачи, Н. П. Бехтерева и ее сотрудники высказывают вполне обоснованное убеждение в том, что она принципиально разрешима<sup>2</sup>. Уже сейчас исследуются неспецифические характеристики мозговых процессов, связанных с теми

<sup>1</sup> О попытке систематического анализа возможности расшифровки нейродинамического кода субъективных явлений, личностных и межличностных инвариантов и их нейродинамических эквивалентов, а также о рассмотрении отношений между ними см.: Д. И. Дубровский. Психические явления и мозг. О социальных аспектах проблемы см. Д. И. Дубровский. Проблема нейродинамического кода психических явлений. — «Вопросы философии», 1975, № 6.

<sup>2</sup> См. Н. П. Бехтерева. Нейрофизиологические аспекты психической деятельности человека. Л., 1971, стр. 92, 102 и др.

или иными психическими явлениями. Результаты, полученные при этом, вплотную подводят к нейрофизиологическим и биоэлектрическим коррелятам конкретных психических явлений. В одной из работ, посвященной изучению функциональной активности нейронных популяций мозга человека при кратковременной вербальной памяти, эти авторы пишут, что «следовые процессы, формирующиеся на уровне нейронных популяций в момент предъявления вербальных раздражителей, имеют характер пространственно-временных паттернов, отражающих рельеф динамических спектров используемых акустических сигналов. В процессе удержания в памяти психологических тестов обнаружена существенная реорганизация следовых процессов, подчиняющаяся общим закономерностям перестройки самоорганизующихся биосистем и протекающая на фоне относительной устойчивости формирующейся функциональной организации нейронных популяций»<sup>1</sup>. Характерно, что авторы широко используют в исследованиях понятия и методы кибернетики, что существенно повышает уровень точности, расширяет эвристический диапазон исследований и является важной предпосылкой решения задачи расшифровки нейродинамического кода психических явлений<sup>2</sup>.

Задача выявления нейрокоррелятов конкретных психических явлений связана с потребностью овладения скрытыми ресурсами человеческого мозга. Можно сказать, что до недавнего времени отдельная личность и общество не испытывали явной потребности в знании того, как «устроены» те мозговые сигналы (нейродинамические структуры), которые ответственны за субъективные переживания и представляют нам информацию в «чистом» виде (ибо исконная обращенность практических действий во внешний мир и исторически определенный круг практических целей вполне удовлетворялись информацией о внешних объектах и ситуациях и информацией о «глобальном» состоянии организма и его подсистем). Ныне такая потребность начинает проявляться все более явно. Попытки реализации этой

<sup>1</sup> Н. П. Бехтерева и др. Функциональная реорганизация активности нейронных популяций мозга человека при кратковременной вербальной памяти. — «Физиологический журнал СССР», 1971, № 12, стр. 1745.

<sup>2</sup> См. Н. П. Бехтерева и др. Принципы организации структуры пространственно-временного кода краткосрочной вербальной памяти. — «Физиологический журнал СССР», 1973, № 12.

потребности ставят человека перед сложными проблемами социально-этического плана.

Среди советских нейрофизиологов эти вопросы впервые были поставлены Н. П. Бехтеревой. «Безусловно, — пишет она, — головокружительно интересно проникнуть в нервный код, действительно разгадать воплощенную в осязаемые знаки тайну психического. Исключительно важно решение этой задачи и для физиологии, и для психологии, и для неврологии, психиатрии, и для философии»<sup>1</sup>. «Ведь по существу именно расшифровка нервного кода психических процессов может сделать эти процессы до конца управляемыми, — гораздо более управляемыми, чем это принципиально возможно уже сейчас приемами нейрофармакологии...»<sup>2</sup> И далее: «Решение загадки нервного кода, дав в руки Человека истинную власть над ним самим, делает управляемыми болезни нервного кода...»<sup>3</sup>

Но как отзовется решение этой задачи на человечестве? — спрашивает Бехтерева. Надо ли обязательно стремиться к этому успеху? «Безусловно, надо, — считает она, — как нужно развитие всех без исключения других областей науки, в том числе и тех, прогресс в которых невольно явился угрозой человечеству, так как хорошо известно, что опасность никогда не содержится в самом знании»<sup>4</sup>.

Мы разделяем позицию Н. П. Бехтеревой. Человеческая мысль, обратившаяся к исследованию самого органа мысли, не может остановиться на полпути. Расшифровка нейродинамического кода психических, субъективных явлений неизмеримо раздвинет границы практического освоения человеком объективной действительности (в том числе практического освоения им самого себя). В частности, она будет означать раскрытие специфичных для головного мозга принципов переработки информации, а это откроет перспективы создания кибернетических устройств, качественно отличных от нынешних, приближающихся по своим функциональным параметрам к некоторым формам деятельности человеческого мозга. Все это, несомненно, повлечет за собой последствия, во многих отношениях пока еще трудно предвидимые.

<sup>1</sup> Н. П. Бехтерева. Нейрофизиологические аспекты психической деятельности человека, стр. 102.

<sup>2</sup> Там же.

<sup>3</sup> Там же, стр. 104.

<sup>4</sup> Там же.

Вторая проблема — объяснение управляющей функции информации на уровне личности: каким способом содержание особого рода сигналов планирует, запускает и организует упорядоченное множество изменений в подсистемах организма индивида, обеспечивающее поведенческий акт? Энергетический подход здесь совершенно неуместен, так как энергетическая сторона сигнала безразлична к его содержанию, а именно содержание сигнала, информация как таковая определяют характер и направление сдвигов в подсистемах организма индивида и их совокупный результат.

Для разработки этой проблемы важное значение имеет концепция информационной причинности, развиваемая Б. С. Украинцевым. Анализируя особенности информационного причинения, он указывает, что «во всех случаях процесса самоуправления, главным производящим началом информационной причины явилось не непосредственное физическое воздействие сигнала, а несомая сигналом структура, которая внедрилась в структуру процесса функционирования самоуправляемой системы и изменила ее характер»<sup>1</sup>. Украинцев справедливо считает, что «информационную причину можно было бы охарактеризовать как причину *управляющую*. Ее основное производящее начало проявляется в изменении физической структуры процесса функционирования самоуправляемой системы, а не в переносе вещества и энергии, хотя без такого переноса не может быть и самого информационного причинения»<sup>2</sup>. При этом подчеркивается специфичность информационных причин для определенного класса самоуправляемых систем, поскольку последние информационно относительно замкнуты, избирательны к информации по коду и содержанию. То, что традиционно именовалось психической причинностью, является видом информационной причинности (скорее всего, одной из наиболее развитых и совершенных ее разновидностей), для изучения которой кибернетический подход открывает сейчас новые перспективы.

Очерченные проблемы представляют собой по существу две стороны единой психофизиологической проблемы в современной постановке. Отсюда возрастающая роль тех научных дисциплин, которые исследуют головной мозг, его отражательную и управляющую деятельность, особенно

<sup>1</sup> Б. С. Украинцев. Самоуправляемые системы и причинность. М., 1972, стр. 85.

<sup>2</sup> Там же, стр. 85—86.

связанную с феноменом сознания. Становясь при информационной трактовке доступными для естественнонаучной интерпретации, понятия сознания, идеального будут в возрастающей степени выполнять эвристическую функцию в многосторонних исследованиях деятельности головного мозга.

\* \* \*

Идеальное представляет собой понимаемую, осознаваемую личностью информацию, являющуюся достоянием отдельного человека. Совокупность этих идеальных феноменов в их динамике в массах людей, связанных процессами коммуникации, можно назвать «идеальной» информацией. В этом смысле можно говорить об обыденной (житейской) информации, о научной, эстетической, этической, религиозной, правовой, политической информации и т. п. Возникает вопрос, как передается идеальная информация; если информационные процессы носят материальный — объективно-реальный — характер. Дело в том, что передача идеальной информации в социальной коммуникации происходит с помощью материальных процессов: звуковых волн, электрических импульсов, генерации текстов и т. д. В этих процессах передаются сигналы — носители значений, в которых в общем случае можно выделить предметную (означающую) и смысловую составляющие. Сам носитель информации относится к конкретно-материальным компонентам мира, значение же (в частности, смысловое) есть то, что иначе называют *абстрактом*, или *конструктом*, или *концептом*. Именно содержание носителя информации (концепт) может осознаваться, пониматься личностью, становиться для нее «непосредственно данной» информацией. И когда это происходит — когда значение *понимается* личностью, — естественно говорить об *идеальной информации*; в противном случае можно употребить термин «*материализованная информация*», памятуя о всей его условности. Необходимой предпосылкой информационно-управляющих и информационно-коммуникативных процессов является «согласование» материальных носителей и заключенного в них содержания, что обеспечивается процедурами кодирования-декодирования и вообще алгоритмами переработки информации.

## Глава IV

### АЛГОРИТМ — ПРЕДПИСАНИЕ К ПЕРЕРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ

Процессы переработки информации — ее кодирование и декодирование, хранение и поиск в информационных системах, ее обработка в современных вычислительных машинах (например, при решении задач прикладной математики) и «больших системах» — совершаются на основе предписаний, четко эти процессы регламентирующих. Эти предписания называются *алгоритмами* (или *программами* — в случае предписаний, непосредственно вводимых в вычислительную или информационную систему).

Теория алгоритмов<sup>1</sup>, возникшая в 30-х годах как ветвь математической логики и важная составная часть оснований математики, в связи с кибернетикой и задачами вычислительной математики приобрела важный технический (относящийся к вычислительным системам, разработке и программированию современных автоматов, ИПС, АСУ и т. п.) аспект. Аспект этот связан прежде всего с языками обобщенного программирования вычислительных, информационных и управляющих систем — *алгоритмическими языками*. В последнее десятилетие, когда с использованием идеи алгоритма и алгоритмического процесса оказался связанным ряд направлений исследований в широком классе наук и научных направлений (нейрофизиология, психология, теория и практика обучения, наука о языке и семиотика и т. п.), теория алгоритмов (и алгоритмических языков) приобрела новое звучание как база возникновения нового общенаучного (междисциплинарного) метода исследования, получившего название *алгоритмического подхода*, или *алгоритмизации* в науке.

Различаются три уровня исследования и применения понятия алгоритма: *интуитивно-содержательный* уровень, на котором это понятие используется в содержательной

<sup>1</sup> Наряду с написанием «алгоритм» в литературе фигурирует и «алгорифм». Мы будем прибегать ко второму написанию только в контексте «нормальный алгорифм» в соответствии с написанием, которого придерживается автор теории нормальных алгорифмов А. А. Марков.



(неформализованной) математике; уровень *формальных уточнений* этого понятия; и «прикладной» уровень *ослаблений* этого понятия при применении метода алгоритмизации в нематематических областях, особенно связанных с исследованием человеческого поведения, обучения и психики. Ослабления понятия алгоритма оказываются, как мы увидим, весьма плодотворными для описания чисто человеческих способов переработки информации, в том числе информации осознаваемой, «идеальной».

## 1. СОДЕРЖАТЕЛЬНОЕ ПОНЯТИЕ АЛГОРИТМА И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ОСНОВНЫЕ АБСТРАКЦИИ

Под алгоритмом в математике и кибернетике понимают *точное предписание*, задающее вычислительный процесс, ведущий от начальных данных, которые могут варьироваться, к искомому результату<sup>1</sup>; *вычислительный процесс*, совершаемый согласно точному предписанию и ведущий от могущих варьироваться исходных данных к искомому результату<sup>2</sup>; *всякую систему вычислений*, выполняемых по строго определенным правилам, которая после какого-либо числа шагов приводит к решению поставленной задачи<sup>3</sup>. В этих и им подобных определениях понятия «алгоритм» наблюдаются две различные трактовки: алгоритм как *процесс* последовательного вычисления, направленного на решение задач определенного рода<sup>4</sup>, и алгоритм как *предписание*, полностью детерминирующее такой процесс<sup>5</sup>.

Мы будем придерживаться *второго* понимания термина «алгоритм», применяя к алгоритму как вычислительному процессу термин *алгоритмический процесс*<sup>6</sup>. Понятие «вы-

<sup>1</sup> См. А. А. Марков. Теория алгорифмов. — «Труды Математического ин-та им. В. А. Стеклова», 1954, т. 42.

<sup>2</sup> См. В. А. Успенский. Алгоритм. — «Философская энциклопедия», т. 1. М., 1960.

<sup>3</sup> См. А. Н. Колмогоров. Алгоритм. — БСЭ, изд. 2, т. 2. М., 1950.

<sup>4</sup> Так характеризует термин «алгоритм», например, А. И. Мальцев («Алгоритмы и рекурсивные функции». М., 1965, стр. 10) и Х. Роджерс («Теория рекурсивных функций и эффективная вычислимость». М., 1972, стр. 17).

<sup>5</sup> В четкой форме это понимание было утверждено в нашей литературе А. А. Марковым.

<sup>6</sup> Говоря точнее, следует различать «индивидуальный» алгоритмический процесс и *класс* алгоритмических процессов, состоящий из «индивидуальных» алгоритмических процессов, каждый из которых зависит от характера исходных данных.

числение», «вычислительный процесс» при этом понимается в смысле переработки какой-либо (материально зафиксированной) информации. Оно означает некоторые действия со знаками какого-то вида, картинками и т. д., их совокупностями, комбинациями, а не только с цифрами, т. е. трактуется очень широко. *Вычисление* — это любой процесс поведения, однозначно детерминированный четкими правилами: алгоритмический процесс.

Алгоритм как предписание (повеление) обычно состоит из операций и указаний «процедурного характера», в каком порядке эти операции следует совершать. Такое предписание *управляет* алгоритмическим процессом благодаря тому, что содержит достаточно элементарные правила действий, выполнение которых в заданной последовательности приводит для соответствующих начальных данных к решению задач определенного типа. Алгоритм предписывает: «Сделать то-то и то-то в такой-то последовательности!» Среди «процедурных» указаний можно в общем случае выделить: правила проверки «логических условий», которые определяют направление алгоритмического процесса в «точках ветвления» (последние суть «узлы», где происходит фиксация различных возможных путей протекания процесса для тех или иных исходных данных); правила засылки исходных данных; правила извлечения результата (заметим, что они не обязательно должны стоять в конце предписаний); правила «безусловного перехода», содержащие категорический приказ переходить к такому-то действию независимо от результата непосредственно выполненного перед этим действия.

Обычно, вводя логические условия, ограничиваются двучленными (т. е. предполагающими лишь два возможных ответа) альтернативными вопросами (т. е. вопросами, предполагающими, что эти ответы суть «да» и «нет»). Тем самым среди всего множества алгоритмов выделяется тип, который можно назвать «бинарно-альтернативным». В широком использовании «альтернативных» алгоритмов проявляется теснейшая связь теории алгоритмов (и практики построения конкретных алгоритмов) с теорией программирования на ЭЦВМ, где фактически весь вычислительный процесс реализуется на устройствах, состоящих из элементов, имеющих (каждый) два устойчивых состояния. Однако логические условия можно проверять, вводя «тернарные» и вообще «*n*-арные», т. е. многочленные, вопросы.

Правило засылки исходных данных фиксирует некоторое множество объектов, которые подлежат преобразова-

нию в процессе работы алгоритма; исходными данными могут быть любые символы (знаки, буквы, цифры, топологические комплексы и т. д.), построенные из объектов какого-то конечного алфавита; при этом конечность пространства исходных данных не обязательна. Правило извлечения результатов определяет условия результативной остановки алгоритма, т. е. получение результата процесса преобразования исходных данных. Когда же ни одно из правил алгоритма не применимо к исходным данным или к промежуточным результатам, а также когда алгоритм «зацикливается» («бесконечная работа» алгоритма), до применения правила извлечения результата дело не доходит.

С каждым алгоритмом как точным предписанием связано некоторое *множество алгоритмических процессов*, каждый из которых однозначно задается этим предписанием для соответствующих начальных данных. Алгоритмический процесс состоит из шагов переработки исходных и промежуточных данных, совершаемых по правилам алгоритма, которые без затруднений может выполнить система-исполнитель, соблюдая требования однозначности результатов применения этих правил. Чтобы удовлетворить этому ограничению, правила алгоритма должны определять относительно простые элементарные шаги алгоритмического процесса. Представление о *простоте*, элементарности правил и операций не очень ясно и для каждого конкретного алгоритма определяется конвенционально или контекстуально исходя из практических, научно-теоретических или, наконец, гносеологических соображений.

Под *системой-исполнителем* обычно понимают любую естественную или искусственную систему, способную выполнить алгоритм как некоторое предписание. Ею может быть человек или некоторая реальная (скажем, данная ЭЦВМ) или гипотетическая машина (например, машина Тьюринга, конечный автомат и т. д.).

Анализ понятия алгоритма уже на его интуитивно-содержательном уровне позволяет выявить некоторые наиболее общие свойства алгоритмов<sup>1</sup>. Одним из них является свойство *детерминированности*, которое заключается в жесткой однозначности, определенности, точности, общепонятности предписания, исключающей двусмысленность, непонимание, произвольное толкование. Точнее, это свойство

<sup>1</sup> А. А. Марков. Теория алгоритмов. — «Труды Математического ин-та им. В. А. Стеклова», 1954, т. 42.

состоит в том, что входящие в алгоритм правила и «процедурные» указания ясно и точно определяют элементарные (простейшие) операции и условия выполнения каждого действия. Набор элементарных операций, всегда ориентированный на систему-исполнитель некоторого типа, воплощает все возможные для исполнителя (реализатора) формы «активного» поведения.

Элементарной операцией для некоторого алгоритма является такая, которую «автоматически» может выполнить (что, конечно, не исключает возможности сознательного выполнения) *любой* исполнитель из некоторого (четко очерченного) множества систем-исполнителей. В алгоритме, далее, с полной определенностью должны быть заключены условия выполнения каждого действия, четко сформулированы правила перехода от одной операции к другой, т. е. заданы процедуры «выхода» из одного «блока элементарной операции» и «входа» в другой такой же блок (т. е. процедура движения «от ... к ...»).

Детерминированность алгоритма и проявляется прежде всего в том, что каждый акт применения какой-либо операции в алгоритмическом процессе однозначно определен предыдущим актом, а их последовательность жестко зависит от результатов проверок логических условий. Естественно, что последовательности применения операций и проверок логических условий варьируются, т. е. являются в общем случае разными для различных исходных данных. Если же, наблюдая работу некоторой системы-исполнителя, мы видим, что для одних и тех же исходных данных осуществляются *разные* такого рода последовательности (т. е. имеют место различные алгоритмические процессы), то это значит, что они определяются *разными* алгоритмами (при этом, конечно, не исключено, что эти алгоритмы приводят к одинаковым результатам).

Другим важным свойством алгоритмов является их *массовость*. Само определение понятия алгоритма указывает на это свойство: предписание задает процесс вычисления для начальных, исходных данных, которые *могут варьироваться*. Это означает, что если в качестве всех возможных исходных данных для алгоритма  $\mathcal{K}$  выбран какой-то класс слов, рисунков и т. п., то любой (объект)  $a$  из этого класса «запускает» алгоритмический процесс, определяемый алгоритмом  $\mathcal{K}$  (что, как мы отмечали, еще не означает, что  $\mathcal{K}$  окажется применимым к  $a$ , т. е. что упомянутый алгоритмический процесс приведет к результативной остановке).

Алгоритм, таким образом, выступает как *эффективный общий метод* решения задач некоторого класса, который характеризуется всевозможными исходными данными. Этот класс задач составляет то, что называют *массовой проблемой, решением* которой считается соответствующий алгоритм.

Всякий алгоритм выступает как общий метод решения массовой задачи, и в этом его познавательное значение. Например, массовыми являются задачи: «Определить наибольший общий делитель двух целых чисел  $a$  и  $b$ » (здесь параметрами являются  $a$  и  $b$ ); «Разделить отрезок  $\alpha$  пополам» ( $\alpha$  — параметр) и т. д. Получение решения единичной задачи ценно именно тогда, когда из него можно извлечь общий метод — алгоритм решения целого множества задач некоторого вида. Таким образом, единичное «порождает» общее (общее как метод), а это общее через понятие массовой проблемы «низводится» до ранга единичного (применение алгоритма к конкретным, индивидуальным задачам).

Здесь обнаруживается своеобразное проявление диалектики общего и единичного<sup>1</sup>. Алгоритм — это воплощение *общего*; через *проблему*, решением которой он является, он связан с «индивидуальными» алгоритмическими процессами, завершающимися результативными остановками, соответствующими различным начальным данным (*«единичному»*). Эта диалектика общего и единичного органически входит в понятия алгоритма и алгоритмического процесса: процедуры решения *одной, индивидуальной* задачи не считаются алгоритмическими, если они задаются «рецептами», предназначенными для решения *именно данной* задачи. Здесь мы имеем случай «единичного, не связанного с общим»; для алгоритма же как раз существенна эта связь: он есть решение *массовой* проблемы — проблемы с параметром (параметрами), из которой индивидуальные проблемы, решаемые по данному алгоритму, получаются, когда этот параметр (параметры) принимает те или иные значения из пространства исходных данных, связанных с этим алгоритмом.

У каждого алгоритма существует определенная «избирательность» для исходных данных, «полоса пропускания», выход за границы которой не допускает даже попытки применить данный алгоритм; эта «избирательность» указывает на наличие в алгоритмах моментов отражения: во-первых, отражения определенных общих свойств всех тех

<sup>1</sup> См. В. А. Успенский. Алгоритм. — «Философская энциклопедия», т. 1. М., 1960, стр. 38.

объектов, которые входят в пространство исходных данных, и, во-вторых, дополнительных свойств тех из них, к которым алгоритм применим (т. е. для которых соответствующий алгоритмический процесс завершается результативной остановкой). Аналогичная «избирательность» существует не только у алгоритмов, но и у систем-исполнителей; каждая из них фактически может выполнять алгоритмы только определенных видов.

Следующее фундаментальное свойство алгоритма — его *результативность*. Это свойство состоит в том, что применение алгоритма имеет своей конечной целью получение результата, т. е. решение задач заданного типа. Это следует понимать следующим образом. Примененный к определенной совокупности исходных данных алгоритм через конечное число шагов может выдать результат (алгоритмический процесс заканчивается результативной остановкой). Наряду с этим возможен безрезультатный обрыв процесса, наступающий после некоторого числа шагов применения алгоритма в случае, если окажется, что ни одно из правил данного алгоритма неприменимо. Наконец, алгоритмический процесс может продолжаться «бесконечно». Один и тот же алгоритм в применении к различным исходным данным может давать эти три варианта.

С алгоритмами и процессами их применения связаны определенные абстракции и идеализации. Последние суть своего рода условия «работоспособности», действенности алгоритмов. Это относится в первую очередь к абстракции отождествления, абстракции потенциальной осуществимости, абстракции безошибочности и к идеализации конструктивного объекта. Эти абстракции и идеализации, делающие алгоритмический подход определенным *методом познания*, в свою очередь тесно связаны с такими фундаментальными свойствами алгоритмов, как детерминированность, массовость и результативность.

Возьмем интуитивно-содержательное определение понятия «алгоритм». Алгоритм — это *ясное, общепонятное предписание, определяющее осуществимый процесс* выполнения (в зависимости от результатов проверок логических условий) конечной последовательности элементарных операций над объектом из некоторого *фиксированного множества исходных объектов*, который ведет к результату, опознаваемому однозначным образом. Подчеркнутые нами слова выражают понятия, требующие выяснения. В самом деле, для одной системы-исполнителя некоторое предписание может быть

ясным и недвусмысленным, а для другой — не ясным, не однозначным, допускающим произвольное толкование; ведь именно в этом проявляется «избирательность» алгоритма к системе-исполнителю. Имея в виду этот пункт определения интуитивного понятия алгоритма, А. А. Марков заметил, что в действительности мыслимы градации от «понятного» путем постепенного, едва заметного перехода к совсем «непонятному»<sup>1</sup>.

Далее. Что означает «осуществимый»? Осуществим ли процесс фиксирования всех членораздельных звуков, производимых человечеством в каждый момент его существования, или процесс проигрывания всех возможных стратегий в шахматной игре? Это не ясно. Наконец, что означает «некоторое фиксированное множество исходных объектов?»

Последний вопрос требует уточнения в свете того, что всякий алгоритм предполагает некоторую систему-исполнителя — он ничего не значит без машины, человека или какого-то другого искусственного или естественного устройства, его реализующего. Что же такое «исходный объект для данной системы-исполнителя», которая, реализуя алгоритм, преобразовывает этот объект в результат?

Проясняя этот вопрос, приходится привлекать *абстракцию отождествления*<sup>2</sup>. В зависимости от системы-исполнителя отношение одинаковости объектов в каждом конкретном случае меняется. Понятие «одинаковость» имеет в теории и практике огромное значение; без этого понятия, «на основе которого считаются, например, одинаковыми цифры, написанные мелом на доске, и цифры, написанные чернилами в тетради, невозможно обучение»<sup>3</sup>.

Можно рассматривать «одинаковые» буквы, скажем *a, а, а, А, А*, как одну букву; тогда любая такая конкретная буква выступает как *представитель* абстрактной буквы *a*, т. е. в связи с данной конкретной буквой *a* мы мыслим все те (и только те!) свойства, которые присущи не только ей, но и вообще всем «таким» буквам. Здесь *конкретное стано-*

<sup>1</sup> См. А. А. Марков. Теория алгорифмов. — «Труды Математического ин-та им. В. А. Стеклова», 1954, т. 42.

<sup>2</sup> См. прежде всего указанную выше монографию А. А. Маркова, а также: Д. П. Горский. Вопросы абстракции и образование понятий. М., 1961; Ю. А. Шрейдер. Равенство, сходство, порядок. М., 1971; М. Новоселов. Принцип абстракции. — «Философская энциклопедия», т. 4. М., 1967.

<sup>3</sup> В. А. Успенский. Алгоритм. — «Философская энциклопедия», т. 1, стр. 40.

вится абстрактным (играет роль абстрактного), а абстрактное выступает в форме конкретного. Отношение одинаковости (равенства, типа равенства, типа эквивалентности и т. п.), обладающее свойствами рефлексивности, симметричности и транзитивности, разбивает множество объектов, на котором оно определено, на непересекающиеся классы таких объектов, что объекты в пределах каждого класса отождествляются (эти классы называются классами эквивалентности). Всякий раз, когда отношение между исследуемыми объектами обладает этими свойствами, в множестве объектов, на котором оно определено, мы можем абстрагировать некоторые общие свойства объектов — их *одинаковость* в пределах классов эквивалентности<sup>1</sup>.

Абстракция отождествления и позволяет устанавливать в множестве исходных данных алгоритма отношение равенства, рассматривая произвольный элемент в возникающих таким путем классах эквивалентности в качестве *представителя* соответствующего класса одинаковых объектов.

Но какими же должны быть объекты, к которым можно пытаться применять алгоритм, чтобы их различать и отождествлять, чтобы предписание было ясным и общепонятным (для данных систем-исполнителей)? Объекты должны быть «жесткими», *конструктивными* объектами. Конструктивными называются объекты, которые задаются в таком виде, что они либо доступны непосредственному наблюдению и могут быть четко различаемы и отождествляемы исполнительным устройством, либо задаются эффективным построением (т. е. в свою очередь с помощью некоторого алгоритма). В частности, сам алгоритм есть конструктивный объект, который «работает» над конструктивными объектами; результаты работы алгоритма (в том числе промежуточные) тоже суть конструктивные объекты. «Неконструктивность», присущая большинству вещей и процессов во всех сферах жизни и деятельности, обуславливает ограниченность применения жестко детерминированных алгоритмов, и поэтому приходится пользоваться разного рода «ослаблениями» точного понятия алгоритма.

Понятие конструктивного объекта является результатом идеализации, состоящей в допущении однозначной опознаваемости тех объектов, над которыми работает алгоритм. Это именно *идеализация*, так как никакие *реальные* объекты никакой реальной системой-исполнителем не могут опозна-

<sup>1</sup> См. подробнее Ю. А. Шрейдер. Равенство, сходство, порядок.



ваться с абсолютной надежностью. Тем не менее понятие алгоритма предполагает, что с операцией опознавания не связаны какие-либо трудности, что она происходит на наглядном уровне, на уровне интуитивного представления и очевидности (применительно к человеку) или на уровне элементарных машинных операций. Таким образом, опознаваемость (жесткость, конструктивность) считается безусловной, заранее предполагаемой алгоритмом. Кроме объектов (исходных, промежуточных и результатов) конструктивностью должны обладать также операции и «процедурные» правила. Это значит, что на каждом шаге применения правил, в том числе и на заключительном шаге, должны получаться опознаваемые (т. е. конструктивные) объекты. Что касается операций над этими объектами, то элементарность их считается безусловной и предполагается ориентированной на некоторого исполнителя.

Идеализация конструктивного объекта связана с дискретным — шагообразным — характером алгоритмических процессов. Понимая идею дискретности как определенную абстракцию (тип абстрагирования, отвлечения)<sup>1</sup>, мы можем говорить об *абстракции дискретности*, которую предполагает алгоритм и которая «навязывается» неотделимой от алгоритма системой представлений о конструктивности.

Теперь о «ясности», «общедоступности» предписания. Неясность с переработкой объектов может определяться тем, что преобразование их носит *интегральный* характер, т. е. объект *в целом* заменяется другим объектом<sup>2</sup>. Простейшие факты, однако, убеждают в том, что в таких случаях человек интуитивно, иногда в неявной форме расчленяет свою деятельность на шаги, не предусмотренные предписанием. Чтобы сделать предписание «ясным», необходимо в первую очередь исходя из способностей и возможностей системы-исполнителя сделать эти шаги *явными*, построить предписание из операций, обуславливающих местные, локальные, а не глобальные изменения объектов, с указанием, в каком порядке выполнять операции, четко сформулировать «правило останова».

«Общепонятность» предписания не означает, что его может выполнить любая машина или человек; его должна уметь выполнять лишь такая система-исполнитель (из некоторого класса исполнителей, «реализаторов»), на которую ориен-

<sup>1</sup> См. Б. В. Бирюков. Кибернетика и методология науки, гл. I, § 14.

<sup>2</sup> См. А. А. Марков. Теория алгорифмов.

тировано предписание. Так, например, программу-алгоритм, составленную на каком-либо алгоритмическом языке (языке обобщенного программирования машин), например АЛГОЛе, нельзя непосредственно осуществить на конкретной ЭЦВМ; предварительно необходимо перевести эту программу на собственно машинный язык, т. е. представить алгоритм, записанный на языке обобщенного программирования, в «индивидуальном» языке машины — языке ее команд. В принципе дело не меняется от того, что современные машины снабжаются трансляторами, автоматически переводящими программы, записанные на некотором алгоритмическом языке (языках), на язык машинных команд. Непрерывно создаются новые языки обобщенного программирования, для которых (по крайней мере на первых порах) нет автоматической трансляции. Задача создания единого математического обеспечения для широких классов вычислительных машин, ныне активно решаемая, «смягчает» эту ситуацию, но не устраняет «привязанность» типа алгоритма (алгоритмов) к типу (типам) систем-исполнителей.

Идеализация конструктивного объекта и понятие *осуществимого процесса* тесно связаны с абстракцией *потенциальной осуществимости*, представление о которой в четкой форме было сформулировано А. А. Марковым. Смысл последней абстракции можно выяснить, рассматривая процессы порождения, конструирования объектов, при которых осуществимым считается то, что возникает на некотором этапе процесса<sup>1</sup>. Осуществимость при этом понимается не как реальная, а как потенциальная осуществимость сколь угодно большого (но все-таки конечного) числа шагов процесса, при отвлечении от ограниченных возможностей системы-исполнителя в пространстве, времени, материалах для конструирования.

Это жесткое ограничение означает сильную идеализацию реальных процессов. Допускается, что процессы построения объектов (предполагаемые, как было сказано выше, дискретными, разложимыми на четко отличные друг от друга элементарные шаги, хотя сами-то «реальные процессы» зачастую далеко не дискретны) могут быть как угодно длинными и «громоздкими» (но, разумеется, конечными). Допускается также, что система правил построения объектов, с которыми в состоянии работать исполнитель, и

<sup>1</sup> См. Ю. А. Петров. Логические проблемы абстракций бесконечности и осуществимости. М., 1967.

указаний о переходах от одной операции к другой тоже может быть как угодно длинной (но конечной). Здесь отвлекаются от материальных условий выполнения элементарных операций алгоритмического предписания (эти условия считаются не имеющими никакого значения и во внимание не принимаются) и допускается любая сложность (длина) исходных конструктивных объектов и результатов алгоритмического процесса.

Абстракция потенциальной осуществимости предопределяет ответ на многие вопросы. Осуществим ли, например, алгоритмический процесс нахождения лучшей стратегии, скажем, в шахматной игре? Ответ ясен из следующего высказывания: «на вопрос, обладаем ли мы точным предписанием, позволяющим единым методом в результате конечного числа шагов находить лучшие стратегии в любой игре рассматриваемого типа (речь идет об игре типа шахмат, в которой количество стратегий очень велико. — Авт.), мы должны дать утвердительный ответ. При этом мы имеем в виду, что процесс, определяемый этим предписанием, является *потенциально осуществимым*, т. е. что он осуществим в результате *конечного* (хотя, быть может, и очень большого) числа элементарных операций»<sup>1</sup>.

Упомянем, наконец, еще об одной абстракции, всегда фактически присутствующей в классических (т. е. никак не «ослабленных») идеях алгоритма и алгоритмического процесса (как, впрочем, в математике и математической логике в целом), — *абстракции безошибочности*. Суть последней состоит в отвлечении от возможных ошибок (нарушений работы, сбоев и т. п.) в работе системы-исполнителя при реализации алгоритмов: во внимание принимается лишь идеал всегда и во всем исправной машины или «идеализированного» человека, обладающего неограниченной и безукоризненной памятью, идеальной внимательностью и «прилежанием».

Абстракции и идеализации, связанные с идеей алгоритма, имеют значение, выходящее далеко за рамки этого понятия. Так, абстракция потенциальной осуществимости является не только неотъемлемой частью философского и логического обоснования математики и лежит в основе ее конструктивного направления (и логики этого направления)<sup>2</sup>, но и

<sup>1</sup> Б. А. Трахтенброт. Алгоритмы и машинное решение задач. М., 1960, стр. 22—23.

<sup>2</sup> См. А. А. Марков. О логике конструктивной математики. — «Вестник МГУ», серия «Математика и механика», 1970, № 2; *его же*.

представляет собой важную категорию теоретической кибернетики. Абстракция эта придает математико-кибернетическим рассматриваниям, в основаниях которых она лежит, максимально возможную всеобщность, существенную при решении многих теоретических проблем кибернетики. Однако, пожалуй, более важно для кибернетики исследование форм и путей *отказа* от этой абстракции или ее *ослабления*. На этой основе, в частности, развиваются такие направления, как изучение алгоритмов и вычислений, длины которых каким-либо образом ограничены сверху, а также изучение способов оценки «качества» алгоритмов (в том числе программ ЭВМ) для решения задач данного типа — «качества», оцениваемого уменьшением материальных и (или) пространственно-временных затрат. Аналогичная ситуация имеет место и в применении к абстракции безошибочности, с отказом от которой либо ее ослаблением связаны многочисленные аспекты приложений кибернетики (например, известная проблематика построения из ненадежных элементов надежно функционирующих автоматов или объяснения феномена «сверхнадежности» биологических систем управления и регулирования)<sup>1</sup>. С философской точки зрения кардинальный интерес представляет также проблематика «конструктивного — неконструктивного» (или «менее конструктивного»), с которой также связаны линии ослабления понятия алгоритма. Некоторые из этих ослаблений будут рассмотрены ниже; предварительно, однако, мы остановимся на формальных уточнениях интересующего нас понятия.

## 2. О СТРОГИХ ЭКСПЛИКАЦИЯХ ИДЕИ АЛГОРИТМА

Необходимость уточнения содержательного понятия алгоритма возникла не на пути построения конкретных алгоритмов, который был известен еще в древности. Теории алгоритмов, как таковой, не существовало до 30-х годов нашего столетия. Она возникла и начала развиваться как раз в связи с первыми попытками уточнить интуитивное понятие алгоритма. Сами же попытки появляются в результате стремления математиков создавать все более мощные

О логике конструктивной математики. М., 1972; Б. А. Кушнер. Лекции по конструктивному математическому анализу. М., 1973.

<sup>1</sup> Ср. Б. В. Бирюков. Проблема абстракции безошибочности в логике. — «Вопросы философии», 1973, № 11.

алгоритмы, решающие по возможности более широкие классы задач («задач весьма общего типа») <sup>1</sup>.

В самом деле, интуитивно-содержательная идея алгоритма, как показывает многовековой опыт математики, вполне достаточна для решения вопроса о том, является ли некоторое предписание алгоритмом. Но она не годится для строгих рассуждений о самих алгоритмах, для доказательства общих суждений о них или для опровержения существования алгоритма, решающего массовую проблему. «Руководствуясь интуицией, нельзя, например, доказать невозможность алгоритма, вычисляющего ту или иную арифметическую функцию, хотя в ряде случаев такая невозможность ощущается совершенно ясно» <sup>2</sup>.

Теория алгоритмов явилась ответом на вопрос, существуют ли принципиальные трудности, не позволяющие для данного класса задач (массовой проблемы) построение решающего их алгоритма. Открытие существования *неразрешимых массовых проблем* явилось важнейшим результатом этой теории. Следует подчеркнуть, что проблема алгоритмической неразрешимости не связана однозначным образом с проблемой познаваемости или непознаваемости окружающего нас мира. Феномен неразрешимости той или иной массовой задачи в той же мере несет в себе определенный запрет, что и любой закон (математического) естествознания.

Причины, вызвавшие появление теории алгоритмов, хорошо известны: к уточнению понятия алгоритма привела в конце концов именно проблематика *алгоритмической неразрешимости*. Чтобы доказать алгоритмическую неразрешимость какой-либо проблемы, надо дать точное определение интуитивно-содержательному понятию «алгоритм», произвести его экспликацию; только тогда становятся возможными математико-логические теоремы о неразрешимости. Экспликация эта была проведена путем разработки соответствующего строгого понятия, эквивалентного содержательному понятию алгоритма. Фактически было предложено даже несколько таких экспликаций, оказавшихся равносильными. Таковыми явились теория рекурсивных функций, — непосредственно уточнившая понятие не алгоритма, а функции (отображения в математическом смысле), вычислимой по алгоритму, — и теории машин Тью-

<sup>1</sup> См. Б. Л. Трахтенброт. Алгоритмы и машинное решение задач, стр. 64.

<sup>2</sup> Б. А. Кушнер. Лекции по конструктивному математическому анализу. М., 1973, стр. 31.

ринга, «финитных комбинаторных процессов» (Э. Поста) и несколько позже — нормальных алгоритмов (А. А. Марков) и др.

В наши цели не входит ни рассмотрение этих уточнений, ни обзор результатов, к ним относящихся либо с их помощью полученных. Отметим лишь следующее. Общим для всех уточнений содержательного понятия алгоритма можно считать: фиксацию некоторого класса исходных данных как множества конструктивных объектов; формулировку правил переработки конструктивных объектов, являющихся исходными данными либо получающихся в ходе алгоритмического процесса (элементарные операции); задание правил извлечения результата в конце процесса переработки; указание условий перехода от одной (элементарной) операции к другой в зависимости от результатов первой операции.

Таким образом, экспликации «алгоритма» оказываются некоторыми *стандартизациями* — описаниями предписаний, удовлетворяющих определенной *схеме*. При этом теоретические цели, которые преследуются (например, доказательства неразрешимости), заставляют вступать на путь такой «сверхдетализации» правил, составляющих предписание, что они оказываются по существу психологически неестественными для человека, но зато естественными для машины (отсюда «машинная» терминология, введенная Тьюрингом в теории алгоритмов до появления современных автоматических систем дискретного действия).

Это хорошо видно на примере алгоритмических схем Э. Поста (1936), естественно представимых в виде некоторой идеализированной машины<sup>1</sup>. Последняя состоит из неограниченно простирающейся в обе стороны ленты<sup>2</sup>, разделенной на секции, вдоль которой движется каретка машины; в каждый момент времени каретка «видит» только одну секцию, а за один временной такт может сдвигаться вдоль ленты (вправо или влево) лишь на одну секцию; в каждый момент каретка может сделать только одно из трех: напечатать в обозреваемой секции пометку («галочку»), стереть пометку, определить состояние секции (помечена она или нет). Такова *система-исполнитель* машины Поста.

<sup>1</sup> См. изложение В. А. Успенского, который в серии статей (журнал «Математика в школе», 1967, № 1—4) представил алгоритмическую схему Поста в виде «машины Поста».

<sup>2</sup> В случае практической реализации этой идеализированной машины «неограниченное простиранье» означает возможность в случае необходимости подклейки все новых и новых кусков ленты.

На ленте с помощью пометок записываются *исходные данные*; в ходе работы, определяемой заданной машине *алгоритмом* (программой), состояние ленты и положение каретки относительно ленты меняются; работа машины заканчивается после того, как срабатывает команда «стоп». *Результат* оказывается записанным на ленте с помощью пометок.

Работа машины Поста демонстрирует искусственность с точки зрения человеческой психики подобного чрезмерного «дробления» процесса переработки информации. Зачем же нужны такого рода экспликации понятия алгоритма? Неужели они служат только *согласованию* взглядов математиков на понимание термина «алгоритм»? Отнюдь нет. Такие экспликации выявляют *характерные черты алгоритмической деятельности вообще*. Хотя в результате этих экспликаций логическая структура процесса переработки информации сильно упрощается, возникающее в результате понятие приобретает вместе с тем удобный для теоретических исследований «стандартный» вид. Однако в *гносеологическом плане* в таких исследованиях с каждым уточнением должен быть явным образом связан некоторый *методологический принцип* («тезис»).

А именно, каждая экспликация сопровождается *принципом стандартизации*, который утверждает возможность нахождения для каждого алгоритма в интуитивно-содержательном смысле этого понятия соответствующего ему «стандартного» алгоритма. Для рекурсивных функций, машин Поста и Тьюринга такими принципами являются соответственно «тезис Черча», «тезис Поста» и «тезис Тьюринга», теория же нормальных алгорифмов сопровождается «принципом нормализации».

Принципы эти не могут быть строго доказаны, поскольку они утверждают равнозначность точного понятия неточному<sup>1</sup>. Они не могут быть доказаны в виде математической теоремы (термин «тезис» и подчеркивает этот их характер). Однако они подтверждаются как математической практикой, так и эквивалентностью друг другу всех существующих ныне уточнений — не только таких, как «нормальные алгорифмы А. А. Маркова», «машины Тьюринга», «машины Поста»

<sup>1</sup> При этом каждое *точное* понятие алгоритма (каждая экспликация содержательного понятия алгоритма) оказывается частным случаем *неточного* понятия (т. е. является алгоритмом в интуитивном смысле), но, конечно, не наоборот.

и т. д., но и таких, которые появились в изобилии после возникновения ЭЦВМ; ибо, как подчеркнул А. А. Марков, «с появлением какого-либо типа машинного осуществления алгоритмов естественно возникает уточнение понятия алгоритма»<sup>1</sup>. Эквивалентность экспликаций означает взаимную перекодируемость алгоритмов с языка одной экспликации на язык другой при сохранении одинаковости их работы с точки зрения результатов (но, конечно, не «длины» алгоритмов, продолжительности и характера их работы и «кодовых образов» исходных данных и результатов). Упомянутая эквивалентность доказывается математически уже совершенно строго. Все это «убедительно свидетельствует о достижении фактически единого точного понятия алгоритма, раскрывающего логическую сущность того, что может быть выполнено вычислительной машиной дискретного действия»<sup>2</sup>.

Быть может, эквивалентность различных уточнений понятия алгоритма имеет смысл рассматривать по аналогии с принципом относительности классической механики, утверждающим эквивалентность инерциальных систем отсчета, как своего рода «принцип относительности теорий алгоритмов» (В. С. Будников). Ведь доказательства попарной эквивалентности всех известных на сегодняшний день уточнений понятия алгоритма заключается в возможности «перехода» от одного уточнения (скажем, в виде машины Тьюринга) к другому (например, нормальным алгоритмам) путем некоторых преобразований. Почему тогда «принцип относительности теорий алгоритмов» нельзя понимать как своего рода «принцип ковариантности» этих уточнений относительно такого рода преобразований?! В самом деле, из класса нормальных алгоритмов, например, можно выделить подкласс так называемых челночных алгоритмов, которые для всякого нормального алгоритма содержат эквивалентный ему «челночный», и с помощью этого класса доказать эквивалентность нормальных алгоритмов Маркова и машин Тьюринга. «Ковариантность» при этом понимается как неизменность «общего вида», «формы связей» между исходными данными и результатом, рассматриваемых «с точностью до перекодирования». По-

<sup>1</sup> А. А. Марков. Математическая логика и вычислительная математика. — «Математизация научного знания». Материалы в помощь философским семинарам, вып. 5. М., 1972, стр. 46.

<sup>2</sup> Там же, стр. 47.



видимому, можно считать, что именно соединение «ковариантности» уточнений (или, иначе, «принципа относительности теорий алгоритмов») с различными ослаблениями понятия алгоритма позволяет использовать это понятие в разных науках, а метод алгоритмизации перевести в ранг междисциплинарного метода.

Следует подчеркнуть еще одну важную сторону, раскрывающую методолого-гносеологическую ценность работы математических логиков в теории алгоритмов как предписаний к детерминированной и дискретной переработке информации. Эта работа привела к формированию идеи *эффективной вычислимости* как процесса *регулярного поведения*, дающего решение задач некоторого класса. Говоря словами одного из зарубежных специалистов по теоретической кибернетике — М. Минского, идея эта «представляет собой столь простое и столь фундаментальное понятие, что оно должно быть атрибутом мышления всякого образованного человека. И все же это действительно новое понятие, о котором до XX в. не существовало отчетливого представления»<sup>1</sup>. Распространение этой идеи привело к утверждению в науке *алгоритмического подхода*, или метода *алгоритмизации*.

### 3. АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Алгоритмический подход возник в результате синтеза, к которому вели тенденции, порожденные, с одной стороны, кибернетикой, а с другой — теми процессами, которые происходили в науках о переработке информации человеком (о поведении, психике и обучении). Кибернетика с ее обобщениями, охватывающими науки о жизни и человеке, выдвинула в качестве одного из основных своих тезисов *принцип алгоритмического описания* процессов функционирования подлежащих ее «ведению» систем (систем управления, сложных динамических систем, информационных систем, «больших» систем и т. п.)<sup>2</sup>. Примечательно, например, что уже в одной из первых публикаций, посвященных языкам алго-

<sup>1</sup> М. Минский. Вычисления и автоматы. М., 1971, стр. 7.

<sup>2</sup> Этот принцип был подчеркнут в отечественной литературе по кибернетике уже в период становления последней; см. А. А. Ляпунов. «О некоторых общих вопросах кибернетики». — «Проблемы кибернетики», 1958, вып. 1; С. Л. Соболев, А. А. Ляпунов. Кибернетика и естествознание. — «Философские проблемы современного естествознания». М., 1959.

ритмического описания (в статье А. А. Ляпунова и Г. А. Шестопал<sup>1</sup>, содержащей изложение разработанной ее авторами операторной записи алгоритмов — «языка операторных схем алгоритмов»), ставшей впоследствии весьма популярной в психолого-педагогической литературе, алгоритмическое описание применено к элементарному «поведенческому феномену» — условному рефлексу. Вместе с тем в психологии и педагогике развивались направления исследований, родственные алгоритмическому описанию в смысле кибернетики, например, теория поэтапного формирования умственных действий (П. Я. Гальперин, Н. Ф. Талызина и др.)<sup>2</sup>.

Алгоритмический подход органически возник из потребностей наук о поведении, психике и обучении. Это ясно видно на примере обучения. Так на основе идеи алгоритмизации в педагогической психологии ныне сложился такой подход, который позволяет удачно синтезировать идеи и аппарат современной логики в ее педагогическом аспекте, теоретико-информационные средства, методы программированного обучения, средства математической теории планирования эксперимента и др. Создается реальная возможность сочетать в разумной мере чисто теоретические и практически-прикладные аспекты этих новых методов и языков.

Не секрет, что в современном обучении (в школе, в вузе и т. д.) проблема, *чему* учить, превалирует над проблемой, *как* учить (т. е. с помощью каких приемов, методов и т. п. педагогу обучать, а учащемуся усваивать изучаемое). Преподаватель часто заботится лишь о том, чтобы дать ученику знания о содержании изучаемого, и значительно меньше о том, чтобы дать ему знания о способах оперирования этими знаниями, о том, как надо рассуждать, мыслить, усваивая определенное содержание и применяя знания о нем. Причина указанного положения заключается в том, что проблема выявления методов мышления, рассуждения (а также проблема способов обучения этим методам) еще недоста-

<sup>1</sup> А. А. Ляпунов, Г. А. Шестопал. Об алгоритмическом описании процессов управления. — «Математическое просвещение», 1957, вып. 2.

<sup>2</sup> См. П. Я. Гальперин. Развитие исследований по формированию умственных действий. — «Психологическая наука в СССР», т. 1. М., 1959; его же. Психология мышления и учение о поэтапном формировании умственных действий. — «Исследования мышления в советской психологии». М., 1966.

точно разработана. Одним из основных достижений психолого-педагогической мысли (не в последнюю очередь) (связанным с влиянием кибернетики) явилось осознание важности *пооперационного* расчленения мыслительной деятельности и поведения. Чтобы обучение (в том числе обучение *методам* мышления) было сознательным и целенаправленным, необходимо, где это возможно, стараться создавать эффективные способы разделения мыслительной деятельности и поведения на составляющие их компоненты (достаточно элементарные, в определенном отношении, мыслительные операции), способы определения их наилучшей, для тех или иных условий, регулярной структуры, а также разрабатывать методику пооперационного формирования интеллектуальных навыков. Таков «стержень» обоснования алгоритмического подхода в педагогической психологии<sup>1</sup>.

Алгоритмический подход в науках, имеющих дело с интеллектом, является прежде всего *источником языков описания психолого-педагогического материала*; его успешное применение требует выявления той части мышления, которая доступна алгоритмическому описанию. Для стандартизации записи алгоритмов при алгоритмическом подходе употребительным языком является язык блок-схем (граф-схем) алгоритмов; другая форма стандартной записи, получившая распространение в психологии и педагогике, — операторная форма записи алгоритмов, иначе называемая логическими схемами алгоритмов.

Возникает вопрос о роли алгоритмического подхода в науках о психике, поведении и обучении. С одной стороны, алгоритмический подход — это некоторая система представлений, с которой исследователь подходит к изучению процессов переработки информации человеком. С другой же стороны (и здесь вклад алгоритмического подхода, несомненно, весомее), — это средство, язык, применяемый в рамках различных приемов психологического исследования, таких, как наблюдение, эксперимент, моделирование и др. В силу этого алгоритмическое описание (например, деятельности диспетчера на железнодорожной станции, скажем, в форме «логических схем алгоритмов» по А. А. Ля-

<sup>1</sup> Этот подход впервые обстоятельно был обоснован Л. Н. Ландой («Алгоритмизация в обучении». М., 1966), а в последние годы в новом направлении развит С. И. Шапиро («От алгоритмов — к суждениям. Эксперименты по обучению элементам математического мышления». М., 1973).

пунову<sup>1</sup> или применение того же алгоритмического языка в работах по моделированию психики на уровне «второсигнальных» реакций<sup>2</sup>) нередко бывает достаточно безразличным к фактическому материалу и методологическим концепциям, лежащим в основе его интерпретации.

Можно указать ряд областей науки о психике и поведении, где нашел применение язык алгоритмического описания, преимущественно в форме «логических схем алгоритмов». Это — описание структуры поведения, скажем, работы оператора и вообще трудовой деятельности (включая ее психофизиологический аспект)<sup>3</sup>; описание простейших процессов, относящихся к физиологической основе психики (работы центральной нервной системы, работы нервной клетки)<sup>4</sup>; применение языка алгоритмического описания в работах по моделированию психики (в частности, при кибернетическом и логико-математическом моделировании), например, в различных «формальных моделях» поведения, в рамках тех или иных теорий формальных нервных сетей и т. п. Во всех этих случаях алгоритмический подход можно явственно отделить от теоретических установок и понятийного аппарата, которыми пользуется исследователь; можно выделить «синтаксическую», или, лучше сказать, «кодирующую», функцию этого подхода — взглянуть на него как на средство сокращенного, обозримого и более точного выражения тех процессов управления и переработки информации в сфере психики и поведения, которые в принципе могут быть описаны и без обращения к «алгоритмическому языку».

Однако в иных случаях алгоритмический подход оказывается связанным с существом дела, выявляемым исследователем, более глубоко. Это, в частности, имеет место в психологии обучения. Здесь это не только (и даже, пожалуй, не столько) язык описания «педагогических феноменов», сколько особый *самостоятельный метод исследования обучения и его организации*. Объясняется это тем, что алгоритмические описания в этой области служат не только изучению

<sup>1</sup> См. В. Н. Пушкин. Оперативное мышление в больших системах М., 1965.

<sup>2</sup> См. Е. И. Бойко. Моделирование функций мозга и высшая нейродинамика. — «Кибернетика, мышление, жизнь». М., 1964.

<sup>3</sup> См. Г. М. Зараковский. Психо-физиологический анализ трудовой деятельности. Логико-вероятностный подход при изучении труда управляющего типа. М., 1966.

<sup>4</sup> Ср. В. И. Черныш, А. В. Напалков. Математический аппарат биологической кибернетики. М., 1964, стр. 275—276.

процессов обучения, но и непосредственно решению дидактических и методических задач, реализуемых в ходе самого обучения.

Как же следует понимать «алгоритм», «алгоритмическое описание», когда процессы, подлежащие описанию (и управлению, как в «кибернетической педагогике») с помощью «алгоритмического языка», относятся к психике и поведению человека, к функционированию его нервной системы? И возможно ли такое описание? Ведь известные алгоритмические описания «человеческих» феноменов (например, нейродинамических явлений или поведенческих актов) обычно сильно упрощают дело <sup>1</sup>.

В математике и математическом естествознании ответ на первый вопрос ясен. Имеется в виду алгоритм в математическом смысле — в том смысле, какой был изложен в начале этой главы. Однако такой алгоритм, предполагающий в качестве исполнителя машину или машинообразно действующего человека, малопригоден для выражения «психологически богатых» форм поведения. Поэтому при описаниях процессов переработки информации человеком, более или менее учитывающих психологическую реальность, приходится говорить об алгоритме лишь в некоем ослабленном виде, прежде всего в том виде, за которым после работ Л. Н. Ланды закрепилось название *предписания алгоритмического типа*, или *алгоритмического предписания*.

Переход от алгоритмов в классическом смысле понятия «алгоритм» к предписаниям алгоритмического типа связан с неизбежным для психологии и педагогики «понижением» требований, предъявляемых к математическому описанию наблюдаемых явлений. Здесь требуются алгоритмические языки, в которых понятие алгоритма удовлетворяет более слабым требованиям по сравнению с требованиями, которым должен удовлетворять алгоритм в математике как «абсолютный» алгоритм. Это ослабление касается фундаментальных абстракций, лежащих в основе понятия (математического) алгоритма: абстракций отождествления, потен-

<sup>1</sup> В этом нетрудно убедиться, сравнив, скажем, реальные функции дежурного (или диспетчера) на станции железной дороги с теми алгоритмами его деятельности, которые описаны в упоминавшихся выше книге В. Н. Пушкина или статье А. А. Ляпунова и Г. А. Шестопал, либо алгоритмическое описание условного рефлекса (в той же статье) с богатством сторон и форм рефлекторной деятельности, выявляемой физиологами (алгоритмическое описание игнорирует, например, случай, когда животное сыто и условный раздражитель не «запускает» соответствующий поведенческий акт).

циальной осуществимости, безошибочности и особенно идеализации конструктивного объекта.

Для алгоритмов, применяемых в математике, логике, математическом естествознании и теоретической кибернетике, характерно *отвлечение от человеческого фактора*; напротив, алгоритмический подход в педагогике касается *именно человека*. Поэтому «предписания алгоритмического типа» трактуются здесь как своеобразные алгоритмы «сводимости» (С. А. Яновская), т. е. алгоритмы, которые *сводят* решение задач данного типа к решению задач, *принятых за решенные*, задач типа «выполнить операцию, принятую за элементарную»; поскольку задачи, принятые за решенные, действительно решаются, постольку решаются и задачи рассматриваемого типа. Примером (под) задачи, принимаемой за решенную, может служить узнавание конечной площадки в лабиринтных задачах (задачах поиска пути в лабиринте до искомой площадки), решаемых по алгоритму. При этом «алгоритм сводимости» может содержать правила (операции, подзадачи), которые не всегда могут быть фактически применены (выполнены, решены). Именно это свойство алгоритмов сводимости и используется в предписаниях алгоритмического типа, «исполнительным устройством» для которых является человек. Ибо здесь подчас приходится «принимать за решенные» такие далеко не всегда решаемые (под)задачи, как, скажем, «привлечь внимание учащихся» или «установить тишину в аудитории».

«Неконструктивность» вещей и процессов, с которыми человек имеет дело в своей научной и практической деятельности и повседневной жизни, будучи просто иным выражением для феномена их *изменчивости, развития* и т. п., является важнейшей причиной ограничений в применимости алгоритмического подхода. Естественным путем преодоления этих ограничений для тех или иных конкретных условий как раз и является ослабление требований, предъявляемых к алгоритму-предписанию. Важнейшим из них является ослабление условия конструктивности объектов; это ослабление заключается в отказе от постулата о «жесткой» фиксированности множества элементарных операций и множества тех объектов, над которыми выполняются операции. В соответствии с характером задач, возникающих в широких сферах познания и деятельности человека, конструктивность («жесткость», различаемость, отождествляемость) объектов является здесь относительной, зависящей от уровня детализации рассмотрения данного

поведенческого процесса (скажем, деятельности оператора), от интеллектуального развития людей (например, учащихся), от задач, которые ставит перед собой исследователь.

В этой связи уместно сделать одно принципиально важное замечание. Нетрудно заметить, что неограниченность в каком-либо смысле выразительных средств науки может иметь место лишь в достаточно узких областях. Одним из примеров такой неограниченности являются известные факты функциональной полноты некоторых систем операций алгебры логики (систем, состоящих из импликации и отрицания; из дизъюнкции, конъюнкции и отрицания; дизъюнкции и отрицания; штрихов Шеффера или Нико и т. д.)<sup>1</sup>. Скажем, выразительных средств «языка» знаков & и достаточно для определения всех функций классической логики высказываний. Это — пример «надежной» неограниченности выразительных средств. Но возможной она становится в силу *ограниченности* той пропозициональной логики, которая (полно!) выражается упомянутыми «языковыми средствами»: эта логика, как известно, не может служить базой для построения сколько-нибудь сложных теорий. В других случаях «неограниченность» выразительных средств покупается дорогой ценой слишком уж сильных упрощений и натяжек. Скажем, один из тезисов ассоционистской психологии можно передать так: возникновение любой «логически состоятельной» мысли связано с действием механизма по сходству и по противоположности. Ясно, однако, что эта «полнота» выражения феноменов мышления на языке ассоциаций двух типов — мнимая и далеко не описывает подлинной картины функционирования мыслительных процессов<sup>2</sup>.

Почему, однако, в одном случае получается «хорошая», а в другом «нехорошая» (мнимая, неубедительная) полнота соответствующих «выразительных средств»? Объясняется это природой объектов исследуемой в каждом случае области. Хотя в обоих случаях это далеко не «вещественные» объекты (функции логики высказываний в одном случае и мысли людей — в другом), «ведут себя» они совершенно по-разному. Для объектов первого рода разработаны добротные способы кодирования их знаками определенного

<sup>1</sup> О понятии функциональной полноты см.: А. В. Кузнецов. Алгебра логики. — «Философская энциклопедия», т. 1.

<sup>2</sup> Ср. С. И. Шапиро. От алгоритмов — к суждениям.

рода, превращающие эти объекты — функции алгебры логики — в слова в определенном алфавите, т. е. в объекты *вполне конструктивные*. Для объектов второго рода (мыслей) такие способы кодирования до сих пор не указаны (и сомнительно, возможно ли такое кодирование вообще). Человеческие мысли (и вообще психические состояния) неконструктивны.

Как же обстоит дело с полнотой алгоритмического описания? Решающее значение имеет конструктивность или неконструктивность (или, точнее, степень конструктивности или неконструктивности) соответствующих объектов. Там, где конструктивность налицо (и в той мере, в какой она налицо), — в математике, логике, теоретической кибернетике и других подобных (т. е. дедуктивных) науках, — алгоритмическое описание процессов (процедур решения массовых задач) в принципе не имеет никаких ограничений, кроме, разумеется, вытекающих из факта существования алгоритмической неразрешимости. Но там, где «мера конструктивности» существенно меньше, скажем в задачах, источником которых является естествознание и техника, обнаруживаются естественные пределы (на данном уровне познания и практики во всяком случае) такого описания. Такого рода фактор (только, пожалуй, еще сильнее) и действует в отношении алгоритмических описаний в науках о психике, поведении и обучении, определяя необходимость перехода от алгоритмов в собственном смысле к алгоритмическим предписаниям.

В свете сказанного становится очевидным, что при исследованиях человека как «системы переработки информации» центральной проблемой применения алгоритмического подхода является разумный выбор «шагов» алгоритмических предписаний — элементарных операций. А это означает, что алгоритмический подход в изучении психики, поведения и обучения человека (и управления соответствующей поведенческой и психической деятельностью) предваряется задачей исследовать *ход умственной деятельности* людей, установить, например, в состоянии ли они осуществлять операции, входящие в данное алгоритмическое предписание. Такое исследование может носить лишь экспериментальный характер<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Вообще выбор той или иной семантики операций и логических условий алгоритмических описаний в естественных и гуманитарных областях — психологии, нейрофизиологии, педагогики и т. п. — определяется «предалгоритмическими» исследованиями: изучением струк-



В случае если устройством, которое выполняет алгоритмическое предписание, является человек, мы сталкиваемся с ситуацией, когда для выполнения той или иной операции оказываются существенными действия, основанные на *понимании*, явном учете смысла некоторых объектов (что, как известно, исключается в случае «абсолютных» алгоритмов). Специфически «человеческими» являются также задача изучения (а в педагогике прежде всего выработки) интеллектуальных навыков «усложнения» и «упрощения» тех операций, которые используются в алгоритмических предписаниях, проблема критериев сформированности операций и др. От того или иного состояния сформированности операций у человека (т. е. степени их «обобщенности», «автоматизированности» и т. п.) зависит решение вопросов профессионального отбора, выбор «стратегии» обучения и т. п. Каким образом к данному алгоритму можно подключить другой алгоритм? В какой мере данную систему операций можно рассматривать в качестве элементарной операции и включать как компонент в некоторую систему операций? Эти вопросы суть вопросы *эмпирически-экспериментальной семантики алгоритмических описаний*<sup>1</sup>.

#### 4. АЛГОРИТМЫ: ЛОГИЧЕСКИЕ И ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Алгоритмический аспект идеи информации естественно приводит к необходимости рассмотрения ряда вопросов логического характера. Мы выделим четыре таких вопроса. Первый состоит в осмыслении логической природы алгоритмов в отличие от *суждений*, которыми оперирует логика. Второй относится к использованию *средств логики* для предварительной логической обработки материала, подлежащего алгоритмическому описанию. Третий касается самого *характера той логики*, которая — явно или неявно —

туры деятельности человека-оператора; нейрофизиологическими работами по изучению, скажем, механизма «срабатывания» нейронов и нейронных сетей; экспериментально-психологическими исследованиями процессов выработки алгоритмизированных форм поведения у обучаемых, и т. п.

<sup>1</sup> Об этих вопросах в применении к обучению см.: Л. Н. Ланда, Алгоритмизация в обучении; Б. В. Бирюков, Л. Н. Ланда, Методологический анализ понятия алгоритма в психологии и педагогике в связи с задачами обучения. — «Вопросы алгоритмизации и программирования обучения», вып. 1. М., 1969; Л. Н. Ланда, Диагностика и программированное обучение. М., 1966.

используется в алгоритмах. Наконец, в четвертом речь идет о роли «алгоритмической составляющей» в образовании понятий, о раскрытии связи ослаблений понятия алгоритма с известной проблемой *абстракции*. Эти вопросы тесно связаны с психологической проблематикой переработки информации человеком и эвристикой.

С точки зрения психологической «человеческие» алгоритмы составляют определенный язык правил (указаний) переработки исходной информации, применение которых обеспечивает получение требуемого результата, определяемого исходной информацией; эти операции совершаются человеком и контролируются (или могут контролироваться) его сознанием, которым управляет центральная нервная система. С точки зрения логической алгоритмические процессы суть некоторые «реализации» выражений *предписывающих языков*, каждое из которых состоит из конечного числа правил, определяющих переход системы-исполнителя из одного состояния в другое. «Предписывающий» характер этих языков очевиден: правила, фигурирующие в алгоритмах (предписаниях алгоритмического типа), полностью детерминируют процесс деятельности. Можно сказать, что «общая логика» алгоритма воплощается в схеме: «Если имеет место то-то и то-то, то *надлежит* совершить такое-то действие».

Алгоритм («абсолютный», сводимости, предписание алгоритмического типа) можно рассматривать как определенным образом организованную систему предложений (форм предложений) двух типов: *повелительных* и *вопросительных*<sup>1</sup>. Первые определяют реальные действия системы-исполнителя, вторые — последовательность этих действий, составляющую алгоритмический процесс. Поэтому алгоритм можно считать воплощением логической модальности «должно» в отличие от «разрешающих языков» — логических исчислений, правила которых задают не детерминированный процесс (идущий каждый раз в единственном определенном направлении), а ветвящийся процесс или точнее множество процессов, ибо правила исчислений воплощают

<sup>1</sup> Понятие формы повелительного (вопросительного) предложения понимается при этом по аналогии с формой высказывания или суждения (см. А. Черч. Введение в математическую логику. М., 1960, введение). Заметим, что высказанная выше точка зрения не означает, что в алгоритмах нет суждений (и понятий); она только содержит мысль, что понятия (предикаты) и суждения должны быть частями повелительных или вопросительных предложений.

нную логическую модальность — «можно» (если имеет место то-то и то-то, то *можно* совершить такое-то действие) и применяются к суждениям (формам суждений), могущим быть верными или неверными.

Понятие алгоритма связано с понятием вопросительного предложения и через понятие массовой проблемы. Последняя представляет собой «вопросительное предложение с параметром (параметрами)» или «форму вопросительного предложения». Очень четко этот «интеррогативный» (вопросный) смысл алгоритмов сформулировал С. К. Клини<sup>1</sup>, проводя различие между двумя видами алгоритмических процессов: *разрешающими* и *вычислительными* процедурами. Первые задаются алгоритмами, решающими массовые проблемы типа «истинно ли  $P(x_1, \dots, x_m)$ » (разрешающие алгоритмы), вторые — алгоритмами, решающими массовую проблему «чему равно  $f(x_1, \dots, x_n)$ » (вычислительные алгоритмы)<sup>2</sup>.

В каждом из этих случаев соответствующая массовая проблема представляет собой (конечный или счетно-бесконечный) класс вопросов: первый — вопросов типа «да» или «нет» (т. е. «имеется ли между предметами  $a_1, \dots, a_m$  отношение  $P$ ?»), второй — вопросов типа «чему равно?» (т. е. «что собой представляет предмет, который функция  $f$  строит из объектов  $a_1, a_2, \dots, a_n$ ?»), где  $a_1, \dots, a_n$  — какие-то предметы, берущиеся из областей определения соответствующих переменных.

Разрешающие алгоритмы можно рассматривать как частный случай вычислительных, если отождествить «истину», например, с 1, а «ложь» — с 0. Однако сохранение различия между двумя типами алгоритмов (и соответственно двумя типами массовых проблем и алгоритмических процессов) имеет существенный гносеологический и психологический смысл. Более того, если идти от задач алгоритми-

<sup>1</sup> См. С. К. Клини. Математическая логика. М., 1973, гл. V, § 40.

<sup>2</sup>  $P$  есть некоторый предикат, или отношение (которое можно понимать как выражение, могущее принимать значения «истина» или «ложь» при подстановке вместо переменных  $x_1, x_2, \dots, x_m$  значений из областей определения соответствующих переменных), а  $f$  — некоторая функция (ее можно рассматривать как выражение, принимающее значение из области значений функции, когда все аргументы функции принимают какие-то допустимые значения). Заметим, что Клини говорит о *теоретико-числовых* предикатах и функциях, что объясняется задачами излагаемой им строгой теории алгоритмов; это не суживает понятие алгоритма, так как конструктивные объекты всегда могут быть закодированы числами. Однако в данном случае мы не будем предполагать такое кодирование, считая, что массовые проблемы обоих типов могут включать как числовые, так и нечисловые предикаты и функции.

ческого описания, (либо задания) поведенческих актов и психических процессов у человека, то естественно выделять типы массовых проблем (алгоритмов) несколько иначе.

Разрешающие алгоритмы — это алгоритмы *опознавания* или *узнавания*: предметы  $a_1, \dots, a_n$  опознаются как находящиеся в отношении  $P$ . Это можно выразить также на теоретико-множественном языке. Возьмем для простоты случай одноместного предиката (или свойства)  $P(x)$ ; соответствующую массовую проблему «истинно ли  $P(x)$ ?» (т. е. «обладает ли  $x$  свойством  $P$ ?») можно сформулировать и так: «истинно ли, что  $x \in P$ ?» («является ли  $x$  элементом множества  $P$ ?»). Решением проблемы — результатом работы алгоритма узнавания — являются ответы «да» (что означает  $x \in A$ , или  $A(x)$ ) и «нет» (т. е.  $x \notin A$ , или  $\neg A(x)$ , где  $\neg$  есть знак отрицания).

От алгоритмов узнавания следует отличать алгоритмы отнесения предмета к одному из  $k$  классов, или *алгоритмы классификации*. Они имеют иную логическую природу. Пусть есть конечное множество из  $k$  множеств (классов):  $P_1, P_2, \dots, P_k$  (вместо классов можно взять свойства, которые соответствуют этим классам — задают их) и известно, что их элементы входят в пространство исходных данных; в «классическом» случае классификации множества  $P_i$  не пересекаются, а их элементы в совокупности исчерпывают пространство исходных данных. Алгоритм классификации — это алгоритм, определяющий, для какого  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) — а в более общем случае для каких  $i$  — верно утверждение  $x \in P_i$  для некоторого предмета  $a$ , подставляемого вместо  $x$ ; иначе говоря, это алгоритм, решающий, к которому (какому) из классов  $P_1, P_2, \dots, P_k$  принадлежит  $a$ , т. е. какое (какие) из суждений  $a \in P_1, \dots, a \in P_k$  верно. Понятие алгоритма классификации естественным образом обобщается на случай многоместных предикатов  $P(x_1, \dots, x_n)$ .

Нетрудно заметить, что алгоритмы классификации представляют собой частный случай вычислительных алгоритмов. Однако исходя из задач описания процессов переработки информации человеком алгоритмы узнавания и классификации удобно объединить в один класс *алгоритмов распознавания*. Тогда прочие вычислительные алгоритмы можно назвать *алгоритмами преобразования* — в соответствии с терминологией, используемой в литературе, посвященной алгоритмизации в науках о человеке.

Особое внимание при этом обращают на алгоритмы распознавания; во всяком случае так поступают в педагогической психологии и кибернетической педагогике (Л. Н. Ланда, С. И. Шапиро, К. М. Шоломий). Чтобы научить учащихся оперировать алгоритмами узнавания и классификации, исследователю-методисту приходится предварительно производить логический анализ свойства, наличие которого определяет принадлежность предмета к определенному классу, выявляя логические связи, которые существуют между признаками в соответствующем свойстве. Упоминутыми выше (и другими) авторами была проведена большая работа по изучению логических структур признаков, т. е. предикатов, образующих соответствующее сложное свойство; были показаны связь структуры алгоритмов классификации и узнавания с логической структурой свойств, задающих рассматриваемые классы, и вытекающие из этого пути повышения дидактической эффективности упомянутых алгоритмов.

В качестве логического базиса при этом обычно используют систему операций логики высказываний, состоящую из конъюнкции, дизъюнкции и отрицания, — систему функционально полную, а потому и достаточную для представления логической связи признаков в любом свойстве. Следует, однако, заметить, что если при описании процессов переработки информации человеком стремиться полнее учесть психологические аспекты, то целесообразно, по-видимому, использовать более широкий логический базис, включающий также импликацию — «если (у предмета  $x$ ) имеется признак  $\alpha$ , то (у него) имеется признак  $\beta$ »; эквиваленцию — «наличие признака  $\alpha$  равносильно наличию признака  $\beta$ »; несовместимость («штрих Шеффера») — «наличие признака  $\alpha$  несовместимо с наличием признака  $\beta$ » и, может быть, некоторые другие.

Далее. Ослабления понятия алгоритма, о которых мы уже говорили в предшествующем параграфе, также требуют привлечения логики и соображений, связанных с принятием решения системой — исполнителем алгоритмов.

Предварительно заметим, что тривиальные ситуации принятия решения допустимы в алгоритмах в математике. Как отмечает Клини, алгоритмические процедуры здесь «часто описываются неполно, так что нам могут представиться некоторые несущественные альтернативы. Например, если нужно перемножать несколько чисел, нам может быть предоставлено решить, в каком порядке их перемно-

жать»<sup>1</sup>. В этом примере «несущественная альтернативность» касается выполнения того, что в терминах «логических схем алгоритмов» называют *операторами*. Но она может фигурировать и в *логических условиях*. Это происходит, когда последние содержат не бинарный альтернативный вопрос, а вопрос  $n$ -арный (пример такого логического условия: « $x > 0$ ,  $x = 0$ ,  $x < 0$ ?»), причем ответ сводится к выбору одной какой-то альтернативы. Будем вслед за К. М. Шоломием называть алгоритмы, содержащие (хотя бы одно) такое логическое условие, *политомическими*, в отличие от обычных *дихотомических* алгоритмов, таких условий не содержащих.

Политомические алгоритмы по сути сохраняют полную детерминированность процесса переработки информации (так, в приведенном примере политомического логического условия можно допустить вариации в *порядке проверки* «составляющих» вопросов  $x > 0$ ?,  $x = 0$ ?,  $x < 0$ ?, но не в ответах на них) и легко переделываются в дихотомические. Однако во многих случаях (например, при не очень большом числе альтернатив) они, по-видимому, психологически естественнее для человека<sup>2</sup>.

Дальнейшее «узаконение» ситуации выбора в алгоритмах приводит к понятиям *вероятностного* и *недетерминистского алгоритмов*; в этих алгоритмах принятие решения уже не тривиально — примером может служить предписание «выбрать  $y$  из интервала  $[9,9; 10,1]$ , если  $x$  лежит в интервале  $[4,9; 5,1]$ » (Л. Заде). Понятия об алгоритмах такого рода необходимо возникают потому, что *нетривиальный выбор, принятие решений типичны для поведения человека* — «внешнего» и «внутреннего» (в плане сознания), причем поведения, которое «в целом» достаточно детерминировано некоторым предписанием и в этом смысле алгоритмично.

Выбор, однако, по-разному производят машины и человек. В первом случае в исполнительное устройство приходится закладывать механизм «генерации случайности»; алгоритмы, отличающиеся тем, что решение о выборе направления алгоритмического процесса на каком-то его шаге (шагах) зависит от вероятностей, порождаемых в некотором его блоке (блоках), естественно назвать *вероятностными*.

<sup>1</sup> С. К. Клини. Математическая логика, стр. 270.

<sup>2</sup> Обоснование этого тезиса см. в: К. М. Шоломий. Одихотомических и политомических алгоритмах распознавания. — «О путях повышения эффективности обучения русскому языку в средней школе», вып. 3. М., 1972.

Вероятностные алгоритмы, однако, не могут реализовываться человеком, если под «реализацией» алгоритма понимать следование тем распределениям вероятностей выбора, которые предписывает алгоритм; психологами установлено, что человек не может генерировать случайные последовательности с заданным законом распределения. Отсюда понятие о *недетерминистских* алгоритмах — алгоритмах, в числе правил которых есть правила, выполняемые без использования случайностей или вероятностей (частот), т. е. путем «произвольного выбора» из фиксированного (тем или иным способом) набора альтернатив.

Возможность выполнения недетерминистских алгоритмов — специфически человеческое свойство. Человек может пользоваться такими алгоритмами потому, что обладает *психикой* (и, в частности, волей). Именно наличие «внутреннего мира» — сознания, самосознания и подсознания — позволяет человеку делать то, что не может машина: принимать решение в ситуации «свободного» (в рамках, определенных данным алгоритмом) выбора.

Однако недетерминистские алгоритмы явно недостаточны для моделирования многих форм поведения, которые можно назвать *ослабленно алгоритмическими* (или полуалгоритмическими, как предпочитает говорить Л. Н. Ланда <sup>1</sup>). Возьмем для определенности алгоритмы классификации. «Логический идеал» непересекающихся классов оказывается замутненным уже в случае допущения их пересечения, а что уж говорить о более сложном случае, когда классы «плохо определены». А между тем эта ситуация типична для изучаемых в психологии феноменов восприятия и кибернетических задач автоматического опознавания образов. Отсюда потребность перехода к еще более слабому понятию алгоритма — *расплывчатому (нечеткому)* алгоритму в смысле Л. Заде <sup>2</sup>.

Значение этого понятия в психолого-гносеологическом плане и в плане исследований по «искусственному интеллекту» состоит в том, что оно позволяет развить метод исключения (или ослабления), в определенном смысле, *неконструктивности*, свойственной неоднозначным предписаниям, ска-

<sup>1</sup> См. Л. Н. Ланда. Прием, метод, алгоритм. — «Вопросы психологии», 1973, № 4.

<sup>2</sup> См. Л. А. Заде. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решения. — «Математика сегодня». М., 1974 (здесь имеются ссылки на основную литературу по теории расплывчатых алгоритмов).

жем, типа: «осуществить мероприятие  $X$ , если *значительная часть* комиссии  $Y$  выскажется в его пользу». Это производится на основе формализации расплывчатых понятий в теории нечетких множеств, о которой шла речь в главе IV первой части книги. А именно, можно считать, что расплывчатые алгоритмы — это алгоритмы, содержащие *расплывчатые логические условия*, т. е. условия, в которых проверяется принадлежность к нечеткому классу.

Строгость теории нечетких алгоритмов находится на уровне строгости «классических» теорий (детерминистских) алгоритмов. Как показал Заде<sup>1</sup>, концепция расплывчатых алгоритмов может быть естественным образом сформулирована в терминах «расплывчатой машины Тьюринга» (Заде описывает принципиальный путь перехода от обычной «машины Тьюринга» к «недетерминистской машине Тьюринга» и далее к «расплывчатой машине Тьюринга»). Развивая идеи Л. Заде, С. Сантос детально рассмотрел как нечеткие машины Тьюринга, так и нечеткие нормальные алгоритмы и показал, что эти два определения нечетких алгоритмов эквивалентны в некотором смысле<sup>2</sup>.

Ослабления понятия алгоритма означают, как мы видели выше, введение в алгоритмические процессы актов принятия решений в ситуации выбора. «Настоящие» алгоритмы — как «абсолютные», типа программ для ЭВМ, так и «сводимостные», типа алгоритма работы человека-оператора — *исключают ситуации выбора*, так как поведение определяется ими во всех деталях. Недетерминистские алгоритмы *допускают ситуации выбора*, но *правила выбора решения* по существу *отсутствуют*. А для поведения, регулируемого расплывчатыми алгоритмами, не только существуют ситуации выбора, но благодаря формализации «расплывания» могут быть указаны и *правила принятия решения*. Самим Заде были рассмотрены два способа «интуитивно приемлемых» вариантов поведения по расплывчатому предписанию: «вероятностный» и «пороговый». Последний основан на введении понятия «порога членства» в нечетком множестве (множествах), обусловившем «расплывание» соответствующего логического условия.

<sup>1</sup> L. A. Zadeh. Fuzzy Algorithms. — «Information and Control», 1969, v. 12, p. 94—102. (Реферат на русском языке: Экспресс-информация «Техническая кибернетика», 1968, № 38.)

<sup>2</sup> C. S. Santos. Fuzzy Algorithms. — «Information and Control», 1970, v. 17, N 4. (Реферат на русском языке: Реферативный журнал «Кибернетика», 1971.)



В связи с анализом познавательных процессов в алгоритмических терминах возникает также ряд важных *психологических* вопросов. Это — вопрос, относящийся к психологической интерпретации процедур применения алгоритмов, в частности вопрос о роли алгоритмов в формировании *понятий*. Возьмем какой-либо язык алгоритмических описаний интеллектуальных процессов, например язык операторных схем. Какова та «психологическая действительность», которая стоит за этими схемами? Очевидно, что операторы отражают операции как мыслительные (или мыслительно-практические) акты. Но как интерпретировать логические условия?

Оригинальную точку зрения здесь высказал С. И. Шапиро<sup>1</sup>, исходящий в своей психологической интерпретации алгоритмических процессов из идеи С. Л. Рубинштейна о *готовности* как состоянии, которое предвещает мыслительные действия. По мнению Шапиро, именно это состояние готовности отражается в «операторной модели» в виде логических условий. Характеризуемое определенным логическим условием (вопросом) состояние готовности есть состояние возможности перехода к той или иной операции. Мышление (точнее, мышление в его «алгоритмизированной» части) есть последовательность мыслительных актов и состояний готовности к ним.

Не следует, конечно, преувеличивать убедительность предлагаемой Шапиро психологической семантики языка алгоритмических описаний. Заметим, однако, что, опираясь на психолого-педагогический эксперимент, ему удастся пролить свет на определенные психологические закономерности формирования и последующего использования в мышлении тех понятий, которые формируются у людей по алгоритмической схеме. Оказывается, можно экспериментально проследить в человеческом интеллекте *процессы развертывания и свертывания алгоритмически задаваемых понятий*, могущих существовать в «психологической действительности» в трех формах: «операторно-алгоритмической», «логической» и в форме «логических координат». Если формирование понятия начинается с алгоритма, то понятие в интеллекте существует в своей развернутой форме (представимой, например, операторной схемой алгоритма узнавания). По мере овладения понятием в процессе решения соответствующих задач происходит свертывание алгоритма:

<sup>1</sup> См. С. И. Шапиро. От алгоритмов — к суждениям.

некоторые операторы выпадают из алгоритма, другие «склеиваются» вместе, затем происходит «погружение» операторов в логические условия. Так возникает «логическая форма понятия». Интеллект, вполне овладевший этой формой, в конце концов перестает последовательно, шаг за шагом, выполнять операции и проверку логических условий и переходит к *одноактной* их проверке, причем происходит постепенный отсев «несущественных» логических условий. В результате человек начинает оперировать только ключевыми логическими условиями, т. е. условиями, с помощью которых данное понятие отличимо от родственных (так называемые *логические координаты*)<sup>1</sup>.

Роль логических координат как «неполных мыслительных процедур», с одной стороны, *эвристическая*: коль скоро они сформированы, происходит сокращение перебора признаков (логических условий), а с другой стороны, *логическая*; в случае необходимости они «обрастают» опущенными логическими условиями, восстанавливаясь в полные логические формы и (если потребуется) в полные алгоритмы.

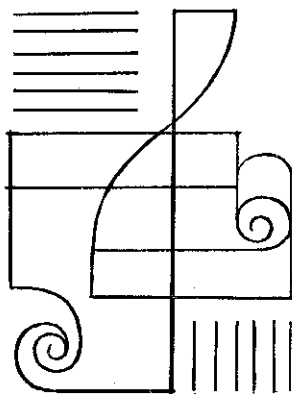
Этот путь *алгоритмического формирования понятий* эффективен в случае их объемной определенности — таковы в подавляющем большинстве математические понятия. В случае *объемно неопределенных понятий* проблема их формирования часто оказывается равнозначной проблеме *абстрагирования* — проблеме, являющейся одной из центральных и в психологии мышления, и в теоретической кибернетике (автоматическое опознавание образов), и в проблематике интеллектуальной коммуникации. Один из подходов к ней пролегает, по-видимому, через теорию нечетких понятий (формирование функции членства в расплывчатом классе), о которой говорилось в главе IV первой части.

<sup>1</sup> Так, для понятия высоты треугольника логической координатой оказывается «перпендикуляр» (человек хранит в памяти лишь тот факт, что «высота — это перпендикуляр», т. е. признак, отличающий высоту от медианы и биссектрисы, остальное для него в данном понятии «и так известно»).

# ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНО- ТВОРЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

---

## IV



Глава I	
ПРОБЛЕМА «ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА»	280
Глава II	
ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ДЕДУКТИВНЫХ ПОСТРОЕНИЙ	300
Глава III	
О МОДЕЛИРОВАНИИ ХУДОЖЕСТВЕННОГО ТВОРЧЕСТВА	327
Глава IV	
КИБЕРНЕТИКА И МЫШЛЕНИЕ: ДИСКУССИИ И ПРОБЛЕМЫ	347

## Глава I

### ПРОБЛЕМА

### «ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА»

«На протяжении жизни всего лишь одного поколения рядом с человеком вырос странный новый вид: вычислительные и подобные им машины, с которыми, как он обнаружил, ему придется делить мир. Ни история, ни философия, ни здравый смысл не могут подсказать нам, как эти машины повлияют на нашу жизнь в будущем, ибо они работают совсем не так, как машины, созданные в эру промышленной революции»<sup>1</sup> — эти слова известного зарубежного кибернетика могут служить показателем той эмоциональной реакции, которую вызывают разработки и технические устройства, составляющие область, обозначаемую термином *«искусственный интеллект»*. Вопреки, однако, категорическому утверждению М. Минского современная философская и научно-прогностическая мысль упорно старается взглянуть в контуры цивилизации будущего, в которой естественный человеческий интеллект будет дополнен и усилен *«интеллектом искусственным»*.

Что же такое искусственный интеллект? Каковы грани проблемы искусственного интеллекта, которая уже сейчас крайне сложна? Не претендуя на всесторонний ответ на эти вопросы, мы выделим в них в качестве относительно самостоятельных три аспекта: *исторический, специально-научный и философский*. Общеисторический аспект предполагает исследование истории постановки и попыток решения задачи создания устройств автоматизации и «усиления» умственного труда во всей ее сложности и противоречивости. Специально-научный аспект — это теоретическая разработка и техническая реализация систем *«искусственного интеллекта»*. Философский аспект — формулирование общеметодологических установок, которых следует придерживаться в работах по *«искусственному интеллекту»*, выяснение гносеологических следствий в области кибернетического моделирования интеллектуальных процессов и создания

<sup>1</sup> М. Минский. Вычисления и автоматы, стр. 9.

машин, осуществляющих такую переработку информации, которая в каком-то смысле похожа на деятельность человеческого разума и может эффективно использоваться последним в познании мира и практическом воздействии на него.

## 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ: ИСТОРИЧЕСКИЕ ИСТОКИ И НАУЧНЫЙ ПОИСК

Использование технических устройств для моделирования отдельных процессов человеческого мышления началось довольно давно и к XX в. приняло уже вполне определенные, хотя и ограниченные, формы. Это можно назвать «доисторическим периодом» данной проблемы. Вспомним, например, о древних абаках, о логических машинах Раймунда Луллия и Стэнли Джевонса, о счетных машинах Паскаля и Лейбница и их многочисленных «потомках». Впечатляющую попытку создания первого в мире универсального программируемого автомата-вычислителя предпринял в XIX столетии Ч. Бэббедж<sup>1</sup>; в том же веке появился автоматический ввод информации — с перфокарт и перфолент. У нас в России можно указать среди других пионерских работ на известные счетные машины В. Т. Однера и П. Л. Чебышева и, к сожалению, забытые, но заслуживающие нашего внимания логические машины П. Д. Хрущева и А. Н. Щукарева<sup>2</sup>.

Современная развернутая постановка проблемы искусственного интеллекта относится к середине XX в., когда возникла кибернетика и ее главная техническая база — быстродействующие электронно-вычислительные машины, выполняющие разнообразные комплексы арифметических и логических операций согласно заданным программам. Машины эти сразу же получили у журналистов прозвище «искусственных мозгов» или «электронных мозгов», хотя это была лишь образная гипербола.

Если обратиться к характеристике некоторых важнейших моментов становления *теоретических* основ кибернетического моделирования интеллектуальных процессов, начинать надо с Лейбница и его идеи создания универсального логико-математического языка, позволяющего сводить решение научных проблем к вычислениям, отметить развитие

<sup>1</sup> См. Р. С. Гутер, Ю. Л. Полунов. Чарльз Бэббедж. М., 1973.

<sup>2</sup> См. В. А. Велигжанин, Г. Н. Поваров. К истории создания логических машин в России. — «Вопросы философии», 1971, № 3.

математико-логической формализации (XIX в.) и создание теории алгоритмов (30-е годы XX в.). В 1937 г. А. Тьюринг ввел понятие «машин Тьюринга», означающее, как мы говорили, уточнение содержательного понятия алгоритма или вычислимой функции. Логик и специалист в области электронно-вычислительных машин, он вполне осознавал, насколько важны работы в области теории алгоритмов и ее приложений для программирования ЭЦВМ. Не удивительно, что Тьюринг одним из первых серьезно проанализировал проблему возможностей машин. Вывод, к которому он пришел, был выражен им в 1950 г. так: «Мы можем надеяться, что машины в конце концов будут успешно соперничать с людьми во всех чисто интеллектуальных областях»<sup>1</sup>.

Важное значение имело также развитие технической логики — применение возникших еще в XIX в. символических логических исчислений к анализу и синтезу переключаемых схем. Как сказал Винер, *machina ratiatrix* (рассуждающая машина) есть не что иное, как *calculus ratiocinator* (исчисление умозаключений) Лейбница, снабженное двигателем<sup>2</sup>. Это вторжение логики в технику связано с именами В. И. Шестакова, К. Э. Шеннона, О. Плехла и др. и может быть датировано приблизительно 1938 г.<sup>3</sup> Следующим шагом был логический анализ нервных сетей и доказательство У. Мак-Каллоком и У. Питтсом (1943 г.) теоремы (точнее, системы теорем), названной их именем; теорема эта фактически сводит техническое выполнение любой функции головного мозга к вопросу о ее однозначном описании на некотором языке<sup>4</sup>. Наконец, У. Р. Эшби и Дж. фон Нейманом было начато исследование фундаментальных механизмов *самообучения и самовоспроизведения*<sup>5</sup>.

Параллельно с обсуждением общих проблем «искусственного разума» и усилиями по созданию соответствующих теоретических моделей делались попытки практической реализации устройств, имитирующих поведение существ, обладающих психикой. «Мыши» К. Шеннона, «черепяхи» Г. Уол-

<sup>1</sup> А. Тьюринг. Может ли машина мыслить, стр. 57.

<sup>2</sup> См. Н. Винер. Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине, изд. 2-е, стр. 192.

<sup>3</sup> См. Г. Н. Поваров. Логика на службе автоматизации и технического прогресса. — «Вопросы философии», 1959, № 10.

<sup>4</sup> См. У. Мак-Каллок, В. Питтс. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности. — «Автоматы».

<sup>5</sup> См. У. Р. Эшби. Введение в кибернетику; его же. Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения; Дж. фон Нейман. Теория самовоспроизводящихся автоматов.

тера, гомеостат У. Эшби знаменовали собой начало этих опытов. Вскоре появились первые программы игры в шахматы и шашки, доказательства теорем, перевода с одного языка на другой, — программы пробные, по существу весьма не совершенные, но привлекающие общее внимание<sup>1</sup>.

Объединяющей «рамкой» для всех этих идей, разработок и результатов явилось провозглашенное Н. Винером комплексное направление — кибернетика. Не лишне, однако, сказать, что уже в ранней статье А. Розенблюта, Н. Винера и Дж. Бигелоу о телеологии (1943 г.) по существу содержалась программа искусственного воспроизведения в технических устройствах поведения сложных организмов<sup>2</sup>. А в своей книге «Кибернетика» (1948 г.) Н. Винер приходит уже к более или менее *положительному* ответу на вопрос о возможности создания искусственного интеллекта. Аналогичную точку зрения высказал в своей «Конструкции мозга» и У. Р. Эшби. В связи с этим Н. Винер писал: «д-р Эшби полагает, что можно действительно создать машины, которые были бы умнее своих создателей; и в этом я с ним совершенно согласен»<sup>3</sup>.

В нашей стране проблема создания искусственного (или машинного) разума была поставлена широко в работах А. Н. Колмогорова, Н. М. Амосова, В. М. Глушкова, А. А. Ляпунова и др.<sup>4</sup> Важность этой проблемы в свое время отметил также М. В. Келдыш: «Следует обратить внимание на новые области применения вычислительных машин, таких, как «искусственный интеллект», на широкое использование электронных вычислительных машин в проектировании и других областях»<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> См. «Вычислительные машины и мышление». О «синтетических животных» см.: М. Г. Гаазе-Рапопорт. Автоматы и живые организмы. М., 1961.

<sup>2</sup> См. А. Розенблют, Н. Винер, Дж. Бигелоу. Поведение, целенаправленность и телеология. — Н. Винер. Кибернетика, стр. 285—294.

<sup>3</sup> Н. Винер. Кибернетика, стр. 300.

<sup>4</sup> См. А. Н. Колмогоров. Автоматы и жизнь. — «Возможное и невозможное в кибернетике». М., 1963; *его же*. Жизнь и мышление как особые формы существования материи. — «О сущности жизни». М., 1964; Н. М. Амосов. Моделирование мышления и психики. Киев, 1965; *его же*. Искусственный разум. Киев, 1969; В. М. Глушков. Мышление и кибернетика. М., 1966; А. А. Ляпунов. О некоторых общих вопросах кибернетики. — «Проблемы кибернетики», 1958, вып. 1; *его же*. Об управляющих системах живой природы и общем понимании жизненных процессов. — «Проблемы кибернетики», 1963, вып. 10.

<sup>5</sup> М. В. Келдыш. Решения XXIV съезда КПСС и задачи Академии наук СССР. — «Вестник АН СССР», 1971, № 7, стр. 8.

При неизбежном различии подходов к этой проблеме, советских кибернетиков объединяет стремление искать решение не на основе тех или иных априорных, умозрительных принципов, а *в тесной связи с практикой автоматизации различных областей человеческой деятельности, с реальными уроками опыта*. Все большее распространение получает мнение, что окончательные границы возможностей машин могут быть определены только на экспериментальном пути.

Вместе с тем становится ясно, что развитие кибернетики и вычислительной техники требует *более глубокого и полного анализа самих понятий «интеллект», «ум», «разум», изучения того, в каком смысле машина может быть умнее человека, а в каком человеческая психика, сознание могут рассматриваться как своего рода «уникальное» явление. Не задерживаясь здесь на этом вопросе, приведем лишь высказывание А. И. Берга: «я считаю тех товарищей (они еще встречаются), которые полагают, что машины думают или будут думать, как человек или даже лучше, мягко выражаясь, ошибающимися»<sup>1</sup>. Могут быть созданы машины в определенном смысле умнее, чем их создатели, но вряд ли их «внутренний мир» будет абсолютно таким же, как у человека. Этот тезис заслуживает того, чтобы быть специально подчеркнутым.*

Исследования по искусственному интеллекту приобретают сейчас широкий размах как вследствие значительного расширения сферы автоматизации, так и благодаря совершенствованию технических средств: вычислительных машин, их вспомогательных устройств, языков и методов программирования и т. п. Создание административных и технологических АСУ, автоматизация процессов проектирования, разработка информационно-поисковых систем ставят перед теоретической кибернетикой новые важные задачи.

Следует также отметить растущую потребность в конструировании и производстве роботов, способных выполнять автономные действия в изменяющемся окружении. Это еще один вариант проблемы «думающих машин». Речь идет о создании роботов, воспринимающих зрительную, тактильную и акустическую информацию о внешней среде и воздействующих на нее в соответствии с поставленными перед ними целями. В настоящее время в ряде стран, в частности в СССР и США, осуществляется внедрение первого поколения про-

<sup>1</sup> А. И. Берг. Современные проблемы образования и воспитания, подготовки кадров ставить и решать на уровне действительно современных требований! — «Вопросы философии», 1973, № 12, стр. 56.



мышленных роботов, между тем как авангардные исследования ведутся уже на уровне третьего поколения<sup>1</sup>. Роботы, по-видимому, сыграют также важную роль в освоении космоса и мирового океана.

Здесь нет возможности подробно рассказать о всей гамме работ по искусственному интеллекту. Схематизируя сложные контуры картины, мы кратко опишем основные сложившиеся направления и отметим некоторые результаты, которые кажутся нам наиболее интересными, что, впрочем, не умаляет другие подходы. На данной стадии исследования по необходимости должно идти различными путями.

## 2. ЧЕТЫРЕ ПОДХОДА

Еще в 50-х годах в исследованиях по искусственному интеллекту выделялись два направления, которые обобщенно можно назвать *бионическим* и *эвристическим*. Первое берет за отправной пункт свойства нервной системы человека и его сенсорных механизмов, второе — проблему представления и алгоритмизации процессов, приводящих к решению сложных задач, решая которые человек, как принято считать, проявляет *творчество*. Впоследствии к этим направлениям стали присоединять в качестве самостоятельных *эволюционное* и *лингвистическое*, или *семиотическое*, направления.

*Бионическое направление* — это путь моделирования интеллекта (и по мере развития такого моделирования воплощения его результатов в реально работающих технических устройствах), при котором *непосредственным* объектом моделирования являются структуры и процессы в нервной системе человека (и животных), включая рецепторы. Наименьшей функциональной единицей при таком моделировании оказывается отдельный нейрон.

Известно, что мозг высших животных и особенно человека представляет собой одну из самых сложных (если не самую сложную) из известных науке «реальных» структур. Только кора больших полушарий мозга человека содержит до 14 млрд. нейронов, расположенных на 50 полях больших полушарий. Короткие и длинные отростки нейронов — дендриты и аксоны, по которым поступают входные воздействия и отводятся выходные реакции, образуют сложнейшие пе-

<sup>1</sup> См. А. Е. Кобринский. Вот они — роботы. М., 1972; «Интегральные роботы». М., 1973.

реплетения связей, лишь с огромным трудом поддающиеся даже частичному изучению. Так, в области разветвления дендритов одного нейрона может находиться свыше *двухсот тысяч* аксонов, принадлежащих другим нейронам.

Моделирование столь сложных структур, как нейрон и тем более нейронные структуры, исходящее, так сказать, из отдельного нейрона, само по себе вряд ли может привести к теории автоматов, способных к интеллектуальному творческому труду. Однако оно может пролить свет на многие феномены «интеллектуальных систем», такие, как самоорганизация, высокая надежность работы мозга и т. п. Кроме того, некоторые результаты исследований по формализации работы нейрона (и сетей из небольшого числа нейронов) имеют принципиально важное гносеологическое значение. Здесь прежде всего следует указать на результат У. Мак-Каллока и У. Питтса, развитый затем в логико-математическую теорию формальных нейронов. В основе ее лежит формализация свойств живого нейрона, связанных с переработкой им информации. Эта формализация воплощается в логико-математическом абстрактном элементе, названном «формальным нейроном». Ограничения теории формальных нейронов, активно разрабатываемой рядом отечественных и зарубежных специалистов<sup>1</sup>, стремятся преодолеть на пути формализации поведения систем, состоящих из больших массивов нейронов, целых нейронных полей и их иерархий.

На этом пути моделирования уже не отдельного нейрона, а определенных аспектов поведения мозга или его частей (моделирования нейродинамики) разрабатываются, в частности, системы, получившие название перцептронов (или персептронов)<sup>2</sup>; исходными при этом были задачи автоматического распознавания образов. Хотя в основу подобных моделей мозга были положены сети из искусственных нейронов, восходящие к «формальному нейрону» Мак-Каллока — Питтса, они означали определенный шаг вперед. Тем не менее существующие перцептронные модели еще слишком просты для представления нейродинамики и характерных свойств естественного интеллекта.

<sup>1</sup> См. С. Н. Брайнес, А. В. Напалков, В. Б. Свечинский. Нейрокибернетика. М., 1962; И. Б. Гутчин, А. С. Кузичев. Бионика и надежность. М., 1967; И. Б. Гутчин. Формальные нейроны в бионике. М., 1967; «Проблемы бионики». М., 1967.

<sup>2</sup> См. Ф. Розенблатт. Принципы нейродинамики. М., 1965; М. Минский, И. С. Пейперт. Персептроны. М., 1971; Н. Г. Загоруйко. Методы распознавания и их применение. М., 1972.

Иной характер носит *эвристическое направление*. Исследователи, работающие в его рамках, стремятся воспроизвести как бы внешнюю деятельность разума, решение задач, поставленных внешней средой, особенно задач *творческих*, содержащих какие-то элементы новизны. Слово «эвристика» означает, с одной стороны, общую теорию творчества<sup>1</sup>, с другой — приемы решения задач, не связанные с жесткими правилами и допускающие риск ошибок.

Известно, что для получения нового достаточно в принципе самого простого способа — метода проб и ошибок. Метод этот, как известно, состоит в последовательном (либо случайном) переборе вариантов, на каждом шаге решения задачи, в выборе одного из них с точки зрения критерия, действующего на *данном* шаге, с последующим испытанием только тех вариантов, которые прошли отбор на каждом из предыдущих этапов. По сути этот метод сводится к пересмотру всех (имеющихся на каждом шаге процесса переработки информации) возможностей с ответом «да» или «нет» на любой промежуточный вопрос. Если задача приведена к форме, допускающей решение методом такого конечного перебора, то *принципиально* ее решение можно поручить машине («принципиально» при этом означает — в рамках абстракции потенциальной осуществимости).

Для практической реализации этого метода решающим препятствием оказывается ограниченное быстроедействие и память вычислительных цифровых машин, причем не только современных, но и таких, которые могут быть созданы на любом предвиденном этапе грядущего развития цивилизации. Иначе говоря, метод проб и ошибок, если его не дополнять какими-то *критериями направленного движения* к цели, практически неприменим. Во многих случаях выбор таких критериев связан с отказом от точного решения задачи, с принятием риска потери ответа или по крайней мере *наилучшего* из допустимых ответов. Отсюда термин «*эвристическое программирование*» как синоним методов неполного просмотра.

Примером эвристического подхода к задаче может служить получившая широкую известность программа «Логик-теоретик» (ЛТ) — разработанный в середине 50-х годов А. Ньюэллом, Дж. Шоу и Г. Саймоном алгоритм поиска до-

<sup>1</sup> См. Д. Пойа. Математика и правдоподобные рассуждения. М., 1957; *его же*. Математическое открытие. М., 1970; В. Н. Пушкин. Эвристика — наука о творческом мышлении. М., 1967.

казательств теорем математической логики (на уровне логики высказываний). В дальнейшем (1959 г.) ими была создана другая эвристическая программа — так называемый «Общий решатель задач»<sup>1</sup>. Эти программы были основаны на методе, состоящем в сведении решаемой задачи к некоторым подзадачам («рассуждение от заключения к посылкам»). Главными средствами ограничения перебора были методы подстановки, отделения и цепеобразования. Метод подстановки использовался для поиска среди ранее доказанных теорем и исходных аксиом такой, которую с помощью подстановок переменных ( $p, q, r, \dots$ ) и тождественных преобразований, основанных на свойствах логических связок & («и»),  $\vee$  («или»),  $\neg$  («не»),  $\rightarrow$  («если... , то»), можно преобразовать в подлежащую доказательству формулу. Имея в виду применение правила отделения, доказываемое выражение заменяется некоторым другим: доказав последнее, мы тем самым доказываем и исходную теорему. Например, если  $p$  — теорема, подлежащая доказательству, то машина ищет аксиому или уже доказанную теорему вида  $q \rightarrow p$ , затем делается попытка решить подзадачу — доказать теорему  $q$ . Если она окажется удачной, то, применяя логическое правило *modus ponens* (иначе называемое правилом отделения), мы докажем теорему  $p$ . Прием цепеобразования предусматривает логический переход в несколько этапов; он основан на «правиле цепного заключения» (или «правиле силлогизма») логики высказываний. Так, если надо доказать теорему  $p \rightarrow r$ , то машина ищет среди ранее доказанных теорем теорему вида  $p \rightarrow q$ ; когда такая теорема найдена в памяти, то доказательство теоремы  $p \rightarrow r$  становится новой подзадачей; если ее доказательство найдено, то в силу транзитивности отношения импликации ( $\rightarrow$ ), согласно которому, если  $a \rightarrow b$  и  $b \rightarrow c$ , то  $a \rightarrow c$ , доказана и теорема  $p \rightarrow r$ . Цепочка импликаций, ведущая к доказательству теоремы  $p \rightarrow r$ , может быть и гораздо более длинной.

Принцип направленного поиска прочно вошел в арсенал «искусственного разума» и широко используется в различных программах и проектах<sup>2</sup>. Главная проблема такого

<sup>1</sup> См. «Вычислительные машины и мышление», стр. 113—144, 283—300.

<sup>2</sup> См. М. М. Ботвинник. Алгоритм игры в шахматы. М., 1968; А. В. Напалков. Эвристическое программирование. Ростов н/Д., 1971; Н. Нильсон. Искусственный интеллект. Методы поиска решений. М., 1973; Дж. Слэйгл. Искусственный интеллект. Подход на основе эвристического программирования. М., 1973; Н. М. Амосов и др. Автоматы и разумное поведение. Киев, 1973.

поиска состоит, очевидно, в совершенствовании критериев ограничения, в создании новых эвристик. Здесь в настоящее время мы наблюдаем соревнование *эвристического* в узком смысле подхода, допускающего потери, *со строгим алгоритмическим*, требующим точного ответа всякий раз, когда тот существует. Их можно назвать еще *индуктивным* и *дедуктивным* подходами, поскольку во втором случае поиск опирается на полное знание свойств данной (массовой) проблемы. Заметим, что эвристическое программирование также использует алгоритмы, но это алгоритмы не решения, а *только поиска*<sup>1</sup>.

Сравнение этих двух видов поиска удобно провести на примере упомянутой эвристической программы ЛТ и более поздних программ Ван Хао, использовавшего для поиска доказательства теоремы точную разрешающую процедуру. Речь идет об аппарате секвенциальных исчислений, идущем от Эрбрана и Генцена<sup>2</sup>. Оказывается, индуктивный поиск не обязательно эффективнее дедуктивного. Уже первая из программ Вана Хао (для логики высказываний) оказалась эффективнее программы трех авторов. Машина ИБМ, в которую была введена эта программа, выдавала на печать доказательства либо опровержения в соответствии с тем, является ли данное предложение теоремой или нет. Более 200 теорем из первых пяти глав труда Б. Рассела и А. Н. Уайтхеда «*Principia mathematica*» было выведено в течение 3 мин. (не считая времени, на ввод—вывод). В частности, были найдены доказательства всех 52 теорем, над которыми работала программа ЛТ и из которых она смогла получить (причем за большее машинное время) только 38.

Дедуктивный путь решения использовала в логике также группа советских математиков под руководством Н. А. Шанина<sup>3</sup>. Ими была поставлена и успешно решена задача создания эффективных алгоритмов — и соответствующих машинных программ — поиска логического вывода в исчислении высказываний, соответствующего интуитив-

<sup>1</sup> Как мы показали в предыдущей главе, главный признак «классического» алгоритма состоит именно в том, что с его помощью решение задачи может быть найдено «чисто механически» и «без всякой изобретательности» (ср. Г. Д. Эббинхауз и др. Машины Тьюринга и рекурсивные функции. М., 1972, стр. 9).

<sup>2</sup> См. Ван Хао. На пути к механической математике. — «Кибернетический сборник», вып. 5. М., 1962.

<sup>3</sup> Н. А. Шанин и др. Алгоритм машинного поиска естественного логического вывода в исчислении высказываний. М. — Л., 1965.

ным представлениям человека о «естественности» рассуждения (алгоритм АЛПЕВ-ЛОМИ-2).

Не будем останавливаться на дискуссии между сторонниками двух путей. Индуктивный путь отличается тем, что его цель — выявить методы решения *очень сложных задач*. Возможность решения *трудных индивидуальных задач*, входящих в данную массовую проблему, хотя в этом случае купить за счет возможного сужения той подобласти исходных данных, для которой алгоритм выдает решение. При этом исследователь сознательно идет на то, чтобы строить алгоритм поиска решения в условиях *неполного* знания свойств соответствующей проблемы. Он допускает поэтому, что алгоритм может выдать также и «неверное» решение, которое составитель программы не сочтет решением в свете тех критериев правильности, которыми располагает. Поэтому-то ЛТ, составленная для логики высказываний, не является решением *проблемы разрешения* (массовой проблемы типа «да» или «нет») для этой логики, не позволяет получить ответ на вопрос «доказуема ли (или нет) формула  $x$ ?» для *произвольного* значения  $x$ .

В отличие от этого при дедуктивном подходе, созвучном всему духу математической логики, область применения алгоритма совпадает с областью исходных данных (формул логики высказываний): алгоритм Ван Хао содержит в себе разрешающую процедуру для этой логики. (В случае логики предикатов этот подход предусматривает получение разрешающей процедуры для всех *разрешимых случаев* этой логики, поскольку известно, что общая проблема разрешения для логики предикатов неразрешима.)<sup>1</sup>

В настоящее время работы в области автоматического поиска логических выводов (дедукций следствий из посылок) и доказательств теорем разворачиваются все более широко. Они идут как по пути эвристического программирования, так и по пути «дедуктивной эвристики». В главе II мы расскажем о подходе, предложенном киевскими кибернетиками на основе нового понимания процессов дедукции («алгоритм очевидности»). Из зарубежных работ последнего времени отметим «метод резолювенций»<sup>2</sup>, построенный на

<sup>1</sup> Заметим, что проблему дедукции при переборе можно также представить как проблему *укрупнения* перебора (Г. Н. Поваров. О сравнении булевых функций. — «Синтез автоматов и управление на сетях связи». М., 1973).

<sup>2</sup> От английского resolution (поэтому у нас переводится также как «метод резолюций»). Этот метод широко представлен в работах,

процедуре Эрбрана и в известном смысле соединяющий индукцию с дедукцией.

Американский кибернетик Дж. Маккарти в феврале 1970 г. высказал мнение, что различие между бионическим и эвристическим направлением состоит в их ориентации на разные уровни деятельности интеллекта: физиологический в первом случае и психологический во втором. Однако нам кажется более правильным считать, что эвристическое направление отражает не просто психологический, а *логико-психологический* аспект решения задач человеком.

Еще Винер и Эшби подчеркивали тесную связь исследований по искусственному интеллекту с проблемами *обучения, адаптации, самоорганизации* систем (см., например, дополнительные главы «Кибернетики»). Как уже говорилось (см. вторую часть настоящей книги), развитие кибернетики неуклонно повышает значение этих проблем во всей обширной сфере управления. Не удивительно, что создатели бионических и эвристических моделей нередко стремились заставить их учиться на опыте. Их работы показали, что обучение в процессе поиска может сделать этот поиск более эффективным. В частности, программа ЛТ работает тем лучше, чем больше теорем она уже доказала и записала в своей памяти <sup>1</sup>. Однако в последние годы в исследованиях по искусственному интеллекту стали складываться новые направления с особым упором на эти его более сложные аспекты.

*Эволюционное направление* есть попытка промоделировать не то, что есть, а то, что могло бы быть, если бы эволюционный процесс направлялся по нужному для нас пути и оценивался предложенными нами критериями. Л. Фогелем с сотрудниками были проведены (1966 г.) эксперименты, основанные на идее мутации и избирательного выживания; моделировался процесс порождения многих поколений конечных автоматов и их «естественный отбор» <sup>2</sup>.

Основным элементарным актом эволюционного моделирования является *предсказание*. Автомат (заданный алгорит-

долженных на международной конференции по искусственному интеллекту, состоявшейся в США в 1973 г. Ср. Н. Нильсон. Искусственный интеллект; Дж. Слейгел. Искусственный интеллект (гл. 5 и приложение).

<sup>1</sup> См. «Вычислительные машины и мышление». Ср. «Самоорганизующиеся системы»; А. Г. Ивахненко. Системы эвристической самоорганизации в технической кибернетике. Киев, 1969.

<sup>2</sup> См. Л. Фогель, А. Оуэнс, М. Уолш. Искусственный интеллект и эволюционное моделирование. М., 1969.

мом и играющий роль эволюционирующего организма) решает задачу предсказания последующих символов, воплощающих среду, в которую он погружен, на основании изучения ряда символов, «данных» ему в прошлом и настоящем. Эволюция заключается в самоусовершенствовании автомата, происходящем за счет «мутаций». Случайные изменения параметров формулы предсказания, производимые генератором случайных чисел, приводят к тому, что исходный автомат эволюционирует: появляется «автомат-потомок», который предсказывает символы лучше (или хуже), чем «автомат-родитель». Если точность предсказания повышается, то «мутант-потомок» закрепляется («выживает») и в свою очередь становится объектом эволюции; если точность предсказания падает, мутант отбрасывается и ищутся новые мутанты. Таким образом, автомат, более эффективно выполняющий требуемую функцию, сохраняется и служит «родителем» нового автомата; прогрессивная эволюция порождает все более добротные автоматы, решающие задачи поведения в своей среде. При достижении поведения достаточно хорошего качества или исчерпании предельного числа поколений автоматов процесс эволюции заканчивается и происходит останов. Так при помощи случайного поиска моделируется эволюционный процесс улучшения параметров исходной программы, решающей поставленную задачу.

«Эволюционное моделирование», начало которому было фактически положено теорией самовоспроизводящихся автоматов Дж. фон Неймана, позволяет создать машинную программу, при реализации которой вычислительный процесс, длящийся всего несколько дней, имитирует миллионы лет эволюции. Однако эта имитация чрезвычайно сильно примитивизирует моделируемый процесс: органическая эволюция представляет собой развитие столь сложных систем, что современные «эволюционные модели» даже отдаленно не отражают их сложность.

*Лингвистическое (или семиотическое) направление* имеет своим истоком проблему представления внешнего мира в системе искусственного интеллекта, создания в машине *внутренней модели* того окружения, в котором эта машина призвана действовать. Проблема эта возникает на самых разных уровнях и в самых разных «отсеках» работ по моделированию и автоматизации познавательно-творческих процессов. Например, мы сталкиваемся с нею вплотную при конструировании современных роботов. Здесь применяется «модельный» метод формирования решений в управляющих



роботами системами, основанный на наличии в памяти системы «проблемной среды» (модели мира). Понятно также, что наличие модели окружения намного облегчает обучение машины, позволяет ей быстрее и глубже проникать в механизмы внешних явлений.

В настоящее время становится ясно, что такое моделирование внешней среды есть важнейшее, ключевое звено комплекса работ по автоматизации познавательных процессов. «Новые методы объективного исследования процессов решения задач человеком, — пишут Д. А. Поспелов и В. Н. Пушкин, — позволили на уровне естественно научного эксперимента определить ту психологическую реальность, которая является определяющей в различии методов решения дискретных задач человеком и машиной. Количественный и качественный анализ процесса познания приводит к выводу о том, что в ходе решения задач человек воссоздает проблемную ситуацию в виде системы отношений между составляющими ее элементами, которая служит основой для построения моделей различного уровня. Эксперимент показал, что особенности решения и сама его успешность являются функцией информационного мозгового моделирования»<sup>1</sup>.

Приведем также точку зрения Дж. Маккарти, который считает, что проблема искусственного интеллекта состоит из двух частей: проблемы эвристики и проблемы представления. Последняя проблема — ее Маккарти характеризует как эпистемологическую — состоит в разработке методов машинного представления внешнего мира. Ее решение необходимо для создания программ «интеллектуального поведения» общего типа.

Один из подходов в моделировании, при котором существенно используется информация о «физической» (реальной) природе моделируемого процесса, принимающая форму «языковой модели» этого процесса, вводимой в память ЭВМ, известен ныне как *ситуационное моделирование*<sup>2</sup>. Представляется очевидным — и это подчеркивается в моногра-

<sup>1</sup> Д. А. Поспелов, В. Н. Пушкин. Мышление и автоматы. М., 1972, стр. 213.

<sup>2</sup> См. Ю. И. Клыков, Д. А. Поспелов. Создание модели внешнего машинного мира в памяти вычислительной машины. — «Проблемы эвристики»; Д. А. Поспелов, В. Н. Пушкин. Мышление и автоматы. М., 1972; см. также Р. Банерджи. Теория решения задач. М., 1972. Мы уже обсуждали эти вопросы в связи с эвристическим подходом к анализу больших систем (гл. I второй части данной книги).

фии Д. А. Поспелова и В. Н. Пушкина, — что любое продвижение вперед в области обучения машин ситуациями внешней среды связано с разработкой процедур *машинного формирования понятий*, с проблемой *автоматического абстрагирования и обобщения*. По-видимому, здесь весьма полезным является привлечение результатов логико-психологических исследований по проблеме абстракции. Представляется разумным, что прежде всего нужны такие теории, которые трактовали бы эту проблему так, чтобы получаемые результаты могли быть интерпретированы как в *логико-психологических* (человечески-ориентированная эпистемология), так и в *автоматизационных* (эпистемология машинная) терминах. В этом отношении полезны, например, такие теоретические подходы, как алгоритмическая теория формирования понятий у человека (С. И. Шапиро) и теория нечетких множеств и расплывчатых алгоритмов (Л. Заде)<sup>1</sup>. Первая может быть преломлена в «машинной эпистемологии», а вторая — в «эпистемологии человеческой», помогая исследовать механизмы образования и оперирования человеком нечеткими понятиями и расплывчатыми предписаниями.

### 3. «ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ» КАК ПРЕДМЕТ ДИСКУССИЙ И КАК ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вокруг проблемы искусственного интеллекта всегда было много споров, и споры эти порой носили весьма бурный характер. Отчасти это было связано с самими терминами «искусственный интеллект», «искусственный разум», которые своим буквальным смыслом как бы провоцировали принятие определенной точки зрения на возможность «машинного мышления». В настоящее время вполне осознан их условный характер. В то же время почти никто не оспаривает полезности исследований, собирательно объединяемых упомянутыми терминами. Но по вопросу о их состоянии и перспективах можно услышать разные мнения.

В предисловии к книге «Человеческие способности машин» И. А. Полетаев отмечает «замедление продвижения кибернетики на главных направлениях — разработке проблем искусственного интеллекта и распознавания образов». Примечательно к искусственному интеллекту, говорит он, «основные работы находятся скорее на подступах к главным

<sup>1</sup> Ср. гл. IV первой части и гл. IV третьей части данной книги.

трудностям, чем в процессе их преодоления». Полетаев считает, что «проблема искусственного интеллекта... находится в зачаточном состоянии разработки, а те результаты, которые могут быть продемонстрированы сегодня, производят, подчас, удручающее впечатление примитивности и беспомощности». «Перед исследователями искусственного интеллекта, — по его мнению, — как будто выросла стена, невидимая, но прочная, и пока что не видно, как ее можно преодолеть»<sup>1</sup>. А вот мнение американского специалиста по информационно-поисковым системам Дж. Вейзенбаума: «Наука о вычислительных машинах, в особенности ее ветвь, относящаяся к искусственному интеллекту, всего лишь кашлянула»<sup>2</sup>. Аналогичных взглядов придерживается А. Коут. Он не видит причин, препятствующих созданию машин, способных «размышлять и рассуждать и похожих на живые существа во всем, кроме разве что внешности», но отмечает при этом, что «до сих пор достижения в этом плане ничтожны», и «большинство сенсаций, вызванных техническими достижениями, в особенности в области создания искусственного разума, являются (мягко говоря) неточными»<sup>3</sup>.

Чтобы избежать крайних оценок проблемы, полезно иметь в виду *фактическое состояние* и *цели работ* в рассматриваемой области. В этой связи мы приведем характеристики проблемы, принадлежащие одна американскому специалисту в области «машинного разума» Н. Нильсону, другая — советским ученым Г. С. Поспелову и Д. А. Поспелову.

Согласно Нильсону, цель работ по искусственному интеллекту состоит в создании машин, выполняющих такие действия, для которых обычно требуется интеллект человека. Он отмечает, что, хотя эта задача очень сложна, уже создано несколько программ для ЭВМ, работающих на уровне, приближающемся к «человеческому». Дальнейшее движение вперед зависит в значительной мере от накопления практических результатов. Что касается теории, то Нильсон скептически относится к возможности единой теории искусственного интеллекта. Аргументация его состоит в следующем.

Системы «искусственного разума» должны «воспроизводить» (моделировать) не столько материальный носитель

<sup>1</sup> «Человеческие способности машин». М., 1971, стр. 12, 5—6, 18.

<sup>2</sup> Дж. Вейзенбаум. О влиянии вычислительных машин на общество. — «Информационные системы — миф и действительность». М., 1973, стр. 54.

<sup>3</sup> А. Коут. В поисках роботов. М., 1970, стр. 205, 202.

естественного интеллекта — мозг, сколько его отражательную деятельность. Виды такой деятельности чрезвычайно многообразны. Нильсон анализирует, например, решение головоломок, участие в играх, занятия математикой и даже вождение автомобиля — все они требуют участия «интеллекта», как принято считать. Если бы ЭВМ справлялись с деятельностью такого рода, то про них — взятых вместе с соответствующими программами — вероятно, можно было бы сказать, что они обладают в какой-то мере искусственным интеллектом. Однако ныне все более осознается факт, что процедуры, которые требуются для выполнения даже самых обычных для человека задач, в случае их моделирования или автоматизации неизбежно окажутся чрезвычайно сложными. И совершенно не ясно, как можно объединить их в одной общей системе искусственного интеллекта (что бы ни значило последнее слово). К тому же любой из известных «фундаментальных» компонентов интеллектуального поведения содержит черты других. Так, для моделирования сенсорного восприятия требуются, по-видимому, весьма изощренные способы выбора решения; для последних же, в свою очередь, возникает необходимость в достаточно эффективных аппаратах извлечения информации из внешней среды, опирающихся, возможно, на дополнительные процедуры выбора решения, и т. д.

Имеющийся опыт обращения с такими сложными процедурами, считает Нильсон, недостаточен для создания единой теории организации интеллекта; и нет оснований полагать, что такая теория вообще может быть создана. «Некоторые исследователи считают, что интеллектуальное поведение может быть получено на вычислительных машинах только посредством комбинирования специализированных программ, каждая из которых содержит множество подходящих к данному случаю решений (или, как их часто называют, «программистских находок»), с возможностью обращения к магазину энциклопедических сведений, содержащему хорошо систематизированные факты»<sup>1</sup>.

Вместе с тем, по Нильсону, «искусственный интеллект» как направление научного поиска представляет собой (или должен представлять) инженерную дисциплину. Его цель — создание конструкций, которые можно было бы признать «разумными системами»: «искусственный интеллект» — это «машинный интеллект». Главная доминирующая тема в тео-

<sup>1</sup> Н. Нильсон. Искусственный интеллект, стр. 12.

ретическом обеспечении такого конструирования — это проблематика решения задач посредством эвристически направляемого метода проб и ошибок в пространстве возможных решений или, короче, методы поиска решений в пространстве состояний.

Итак, эвристический поиск для Нильсона — главный компонент техники искусственного интеллекта. Однако работы в этой области наталкиваются ныне на трудности, связанные как раз с проблемой моделирования «внешнего мира» в машине. Создание программ для ЭВМ, которые позволили бы им осуществлять практически приемлемый перевод с одного языка на другой, хорошо играть в шахматы, эффективно управлять деятельностью механических роботов и т. п., связано с умением вложить в них «помимо конкретных сведений (о языке, о шахматах и т. д.), еще и представления «здорового смысла» об окружающем мире»<sup>1</sup>. Как видим, Нильсон дает достаточно реалистическую характеристику нынешнего (на начало 70-х годов) состояния проблемы «искусственного интеллекта», правда имея в виду преимущественно американские работы.

Какова концепция «искусственного интеллекта» в отечественной науке, по каким направлениям идут исследования советских ученых в этой области?

Советская наука рассматривает эту проблему *не только как инженерное направление, а на фоне большого цикла кибернетических (и стыкующихся с кибернетикой) исследований, в области изучения психики, поведения и обучения человека*. Согласно Г. С. Поспелову и Д. А. Поспелову, термин «искусственный интеллект» при своем появлении был окрашен духом антропоморфизма. В те годы считалось само собой разумеющимся, что искусственный интеллект должен быть просто аналогом интеллекта естественного (по крайней мере в отдельных проявлениях последнего). Сейчас уже невозможно оставаться на столь односторонней точке зрения.

В самом деле, почему, создавая новые кибернетические устройства, мы обязаны имитировать «естественный» интеллект? Ведь это лишь один из возможных путей. Теперь все чаще говорят не о создании средств, способных «просто» имитировать человеческие механизмы творческой деятельности, а о разработке методов такого машинного решения задач, которые дают результаты *не хуже*, чем решения, по-

<sup>1</sup> Н. Нильсон. Искусственный интеллект, стр. 10.

лучаемые человеком. Именно в этом видят специалисты, работающие в области кибернетики, одно из главных направлений своих работ. Другим таким направлением является организация взаимодействия человека и ЭВМ, при котором ЭВМ загружается рутинной «вычислительной» работой, а на человека ложится «типично творческая» составляющая труда. Человеко-машинные системы могут дать более значительные творческие результаты, чем ЭВМ или человек в отдельности<sup>1</sup>.

Мы видели выше, что в интерпретации Нильсона проблема «искусственного интеллекта» в конечном счете инженерная. Эту позицию можно передать так: работы по «искусственному интеллекту» так относятся к кибернетическому и математическому моделированию познавательных процессов, как бионика относится к биокибернетике; ибо, обладая важным теоретическим содержанием, они вместе с тем имеют, в конечном счете, техническую и прикладную направленность.

С этой категорической «технизацией» проблем моделирования и автоматизации интеллектуальных процессов вряд ли можно безоговорочно согласиться. В самом деле, посмотрим на проблему «искусственного интеллекта» экстенсionalmente: перечислим круг тех работ, которые обычно к ней относят. Минский, например, в обзорной статье (1961 г.) предложил такой перечень: поиск, распознавание образов, обучение, решение задач, логический вывод<sup>2</sup>. Г. С. Поспелов и Д. А. Поспелов включают в проблему: работы в области формализации *дедуктивного вывода* и машинного доказательства теорем; разработку методов машинного решения *игровых задач*; исследования в области теории и практики создания эвристических программ *широкого профиля*; теоретические вопросы построения систем диалога с машиной на языках, близких к естественным; разработку алгоритмов переработки *сенсорной информации*, вводимой с датчиков в вычислительную машину; создание алгоритмов переработки «макроуказаний», выдаваемых вычислительной машиной, в управляющие команды, обеспечивающие работу исполнительных органов; работы по созданию *роботов*, управляемых машиной. С проблематикой искусственного

<sup>1</sup> Идеи, о которых идет речь, были развиты в докладе Г. С. Поспелова и Д. А. Поспелова на VII Симпозиуме по кибернетике (Тбилиси, 4—6 июня 1974 г.).

<sup>2</sup> См. М. Минский. На пути к созданию искусственного разума. — «Вычислительные машины и мышление».

интеллекта связаны исследования в ряде областей биокibernетики и бионики (например, работы по созданию искусственных аналогов живых тканей и их элементов — нейронов, нервных волокон, мышц, внутренних органов, структур памяти и т. д.), а также в сфере кибернетического моделирования сложного согласованного поведения путем надлежащей организации простого локального поведения (построение моделей пула мотонейронов, моделей распределения ограниченных ресурсов и т. п.).

Следует, однако, подчеркнуть, что в проблематику искусственного интеллекта включаются сложнейшие вопросы, имеющие важные логическую, психологическую и гносеологическую составляющие, — вопросы кибернетического исследования, формализации, алгоритмизации и модельного представления творческих процессов (генерация новых научных идей, процессы интеллектуальной коммуникации, творчество в области литературы, искусства и т. п.), которые явно выходят за рамки «узко инженерной» трактовки проблемы. Успех в упомянутых направлениях означал бы не только создание соответствующих «творческих машин», но и гигантский скачок в понимании человеческого творчества, человеческого интеллекта, феномена разума как космического явления вообще.

С нашей точки зрения, тематика «искусственного интеллекта» — это самые «авангардные» направления кибернетики и ее приложений, непосредственно связанные с изучением феноменов психики, поведения и обучения человека. Они показывают путь к новым ступеням научного и технического могущества, к новым рубежам цивилизации.

## Глава II

### ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ДЕДУКТИВНЫХ ПОСТРОЕНИЙ

Автоматизация дедуктивно-эвристической деятельности — важная область работ по искусственному интеллекту, представляющая значительный интерес для совершенствования управления познавательными и технологическими процессами и повышения их эффективности. Однако, как мы убедились, настоящего практического значения работы в этом направлении еще не получили.

В чем «слабость» той ситуации, которая имеет место ныне в автоматизации дедуктивных построений? Это прежде всего естественное на первых порах стремление к некоей универсальности инструмента автоматизации. Чтобы автоматизировать, например, построение доказательств сложных теорем в математике, разрабатывают некую «единую» доказывающую программу. Такого рода программа зиждется на базе современной логики, реализуя ту или иную форму поиска логического вывода. На данном пути уже достигнуты обнадеживающие результаты, однако лишь в случаях, когда эти доказывающие программы применяются в рамках простейших математических теорий, и прежде всего к самой математической логике.

Дело заключается в том, что автоматизация дедуктивных построений в целом представляет собой *очень сложную задачу* — более сложную алгоритмически, чем, например, задачи численного решения уравнений математической физики. И никто не пытается построить универсальную *вычислительную* программу, с помощью которой можно было бы решать любые задачи вычислительной математики. Тем более странным было бы, если бы удалось построить *единственную доказывающую* программу, которая обеспечила бы автоматизацию заведомо более сложной работы,



чем вычисления, — автоматизацию *дедуктивных построений*, в том числе *доказательств сложных теорем*. Поэтому представляется, что для организации действительно широкого и последовательного наступления на проблему необходимо иной подход к делу. Мы познакомимся с элементами новой методологии автоматизации дедукции, разработанной в Институте кибернетики Академии наук УССР (Киев). Отметим сразу же, что данный вопрос тесно связан не только с дальнейшим развитием работ в области искусственного интеллекта, но и с *повышением возможностей электронно-вычислительных машин*.

### 1. НОВЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗАЦИИ ДЕДУКТИВНЫХ ПОСТРОЕНИЙ. «АЛГОРИТМ ОЧЕВИДНОСТИ»

Прежде всего необходимо создать адекватный язык для представления понятий и процессов доказательств в дедуктивных науках (в математике, теоретической физике и др.), предназначенный не для программирования, а для описания самого объекта автоматизации. Имеющийся язык математической логики (при ее приложениях) в принципе пригоден и для такого рода функций, но математик или естествоиспытатель практически никогда им не пользуется — он неудобен для применения.

Поэтому задача состоит в том (и исследования в этой области уже проводятся<sup>1</sup>), чтобы построить *практически ориентированный язык математической логики*. Этот язык должен относиться к «классическому» языку математической логики примерно так, как алгоритмический язык типа АЛГОЛ — к языку, предположим, машин Тьюринга, или алгоритмов Поста, или нормальных алгорифмов Маркова.

И АЛГОЛ, и «финитные комбинаторные процессы» Поста, и нормальные алгорифмы являются универсальными алгоритмическими языками, и в принципе на каждом из

<sup>1</sup> См. В. М. Глушков. Некоторые проблемы теории автоматов и искусственный интеллект. — «Кибернетика», 1970, № 2; В. М. Глушков, Ю. В. Капитонова. Автоматизация поиска доказательства теорем математических теорий и интеллектуальные машины. — «Кибернетика», 1972, № 5.

них можно выразить любой алгоритм. Но как мы уже отмечали (см. гл. IV третьей части), язык Поста, как и языки Маркова и Тьюринга, строится из мельчайших составных «кирпичиков», и сложить из них здание реального алгоритма чрезвычайно трудно, в то время как АЛГОЛ пользуется гораздо более крупными, привычными для математика блоками. В этом и состоит существенное различие: АЛГОЛ — это практически-ориентированный алгоритмический язык, а языки Маркова и Поста — «теоретические» языки. Последние строились для решения проблем оснований математики, и стремление к простоте языка, к минимизации числа его элементов, к уменьшению размеров самих элементов было естественным. Это облегчало изучение возможностей самого языка и его использование при формализации дедуктивных построений в целях исследования самых фундаментальных основ математики как «доказывающей» науки.

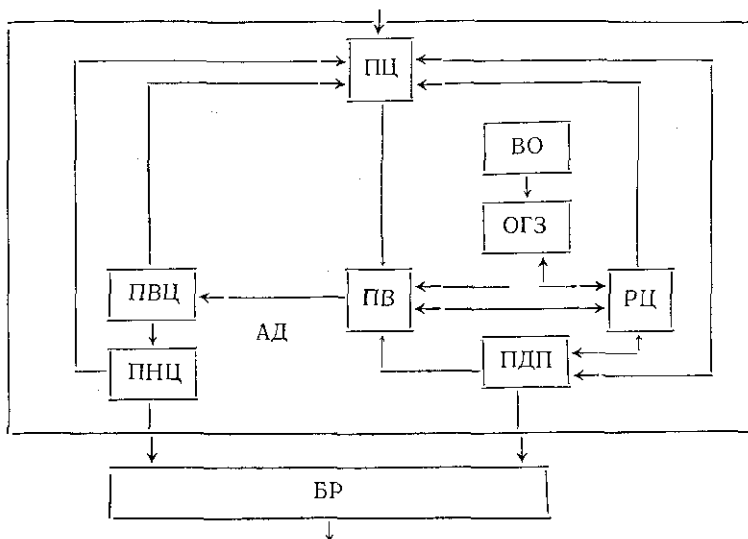
Чем же должен отличаться практически-ориентированный логический язык от языка обычной математической логики? Прежде всего тем, что с его помощью можно будет оперировать *более крупными «блоками»* доказательств.

Поясним идею «крупных блоков» на простом примере. Ниже представлена блок-схема алгоритма поиска доказательств теорем в исчислении высказываний<sup>1</sup>. Основные принципы работы алгоритма следующие. *Целью (Ц)* является формула исчисления высказываний, которую на данном шаге работы алгоритма необходимо доказать. *Посылка (П)* — формула исчисления высказываний, в предположении истинности которой доказывается соответствующая цель. Главными шагами алгоритма являются *расщепление цели* и построение *вспомогательной цели*. При расщеплении из цели выделяются некоторые другие, более простые по структуре цели, из которых непосредственно следует доказываемая цель и, возможно, посылка. Цель считается доказанной, если имеется посылка, с ней совпадающая. В этом случае вспомогательная цель будет пустой.

Наглядно иллюстрирует работу алгоритма следующий пример.

<sup>1</sup> См. Ф. В. Ануфриев, В. М. Костяков, А. И. Малашинок. Алгоритм и машинный эксперимент поиска доказательств теорем в исчислении высказываний, — «Кибернетика», 1972, № 5.

**Блок-схема алгоритма поиска доказательств теорем  
в исчислении высказываний**



АД — блок диспетчера алгоритма; ПВ — поиск вхождения цели в посылку; ПВЦ — построение вспомогательной цели; РЦ — расщепление цели; ВО — внесение отрицания в формулу; ОГЗ — определение главного знака формулы; ПЦ — проверка цели; БР — блок редакции доказательства; ПНЦ, ПДП — режимы работы блока АД при поиске соответственно недоказанной цели и при поиске другого пути.

Теорема Ц 1  $((A \rightarrow C) \rightarrow ((B \rightarrow C) \rightarrow ((A \vee B) \rightarrow C)))$ . Для доказательства этого утверждения предположим:

П 1  $(A \rightarrow C)$

и докажем:

Ц 2  $((B \rightarrow C) \rightarrow ((A \vee B) \rightarrow C))$ .

Для доказательства этого утверждения предположим:

П 2  $(B \rightarrow C)$

и докажем:

Ц 3  $((A \vee B) \rightarrow C)$ .

Для доказательства этого утверждения предположим:

П 3  $\neg C$

и докажем:

Ц 4  $\neg (A \vee B)$ .

Внося отрицание, получаем:

Ц 5  $(\neg A \& \neg B)$ .

Данное утверждение будет доказано, если мы докажем

Ц 6  $\neg$  А и Ц 7  $\neg$  В.

Докажем последнюю цель.

Данное утверждение будет доказано, если мы докажем получаемую из посылки П 2 вспомогательную цель:

Ц 8  $\neg$  С.

Данное утверждение непосредственно вытекает из посылки П 3. Тем самым данная ветвь доказана. Переходим к доказательству утверждения

Ц 9  $\neg$  А.

Данное утверждение будет доказано, если мы докажем получаемую из посылки П 1 вспомогательную цель:

Ц 10  $\neg$  С.

Данное утверждение непосредственно вытекает из посылки П 3. Тем самым теорема полностью доказана.

Как мы видим, задание схемы этого алгоритма сделано на языке крупных блоков. Для реализации блоков имеются стандартные подпрограммы. Это означает, что блоки *понимаются* машиной, и, следовательно, программист может их использовать при программировании задач. Ясно, что подобное программирование резко отличается от программирования, скажем, на языке «машины Поста» (см. гл. IV третьей части).

Кроме обращения к «крупным блокам» в практически-ориентированном логическом языке следует предусмотреть средства определения *новых понятий*. Это возможно, так как язык математической логики, к которому добавлены требуемые постоянные предикаты и функции, позволяет выразить соответствующей формулой то или иное понятие.

Допустим, необходимо определить какой-то класс функций, задавая их специальные свойства. Понятие об этом классе функций можно разложить на элементы и представить определенным выражением логико-математического языка. Но математик, рассуждая и проводя соответствующие записи, как правило, не пользуется таким приемом — не оперирует с подобным выражением. Он прибегает к сокращенному обозначению, общему «образу» данного класса функций. К строгому определению он будет обращаться лишь по мере необходимости, «вытаскивая» из него те или иные свойства, нужные для его эвристических и дедуктивных построений. Такого рода «образы» и должны быть введены в язык.

Далее, необходимо ввести в язык средства, которые позволяют порождать, конструировать примеры тех или иных общих соотношений. Это тоже важно, но вполне чуждо для «классического» языка математической логики (хотя в принципе на нем можно конструировать требуемые примеры).

Нам, таким образом, требуется понятие *конструкций при доказательствах*. Заметим, что конструкция здесь понимается в обычном в математике смысле (а не в смысле, скажем, конструктивной математики), а именно: под конструкцией имеется в виду объект или некоторый класс объектов, который может быть построен либо конструктивно в подлинном смысле, либо с помощью тех или иных определений. Вся суть математических построений и вся «изюминка» доказательств (не только в математических, но и в любых дедуктивных науках) состоит как раз в том, что исследователь строит некоторую конструкцию. Например, математик рассуждает: «Возьмем функцию, которая удовлетворяет таким-то условиям на концах, таким-то ограничениям для производной» и т. п. — и начинает из класса функций с помощью различных методов строить подклассы, выделяя те или иные их свойства; затем он пытается доказать, что та конструкция, тот класс функций, который он построил, удовлетворяет условиям некоторой теоремы. И трудность построения доказательства состоит не в том, чтобы путем дедукции доказать, что найденная конструкция удовлетворяет условиям теоремы (а это именно то, что и делала классическая математическая логика), а в том, чтобы *найти* эту конструкцию.

Когда математику приходит в голову *идея* конструкции, это значит, что он интуитивно чувствует близость решения проблемы; идея «запускает» процесс доказательства — начинается дедукция: с помощью аксиом, теорем, предыдущих результатов строится обоснование того, что предложенная конструкция обладает теми свойствами, которые заложены в идее самой теоремы. Такой подход противоположен подходу «обычной» математико-логической формализации доказательств средствами логики предикатов: использование исчисления предикатов для *нахождения* конструкций совершенно не *естественный* для мышления *математика* путь. Поэтому «чистая» математическая логика не дает возможности по-настоящему автоматизировать процессы доказательств теорем (кроме достаточно узкого круга теорий, включая теории за пределами самой математической логики), и приходится вступать на путь создания различного

рода эвристических программ. Таким образом, реалистический подход к автоматизации дедуктивных построений означает прежде всего выработку нового практически-ориентированного математико-логического языка (и начальный вариант такого языка в настоящее время уже построен).

Вторым компонентом предлагаемой программы работ — компонентом, связанным уже с техникой самих доказательств, является так называемый *алгоритм очевидности*. Суть дела здесь состоит в следующем. Не ставится задача построения такого алгоритма, следуя которому машина доказывала бы *все* теоремы (некоторой теории). Машина должна доказывать *очевидные* вещи: *не угадывать* конструкции, а *по готовой конструкции проверять*, удовлетворяет ли она тем или иным свойствам, применяя для этого логический аппарат, который использует «крупные блоки» дедуктивных выводов, заложенные в ранее доказанных теоремах. Характер этого алгоритма очевидности в принципе ясен.

И третьим компонентом рассматриваемого подхода (вплотную примыкающим к предыдущему) является *информационная база*. Когда есть язык, на котором можно записывать определения, аксиомы, алгоритмы, формулировки теорем, их доказательства и т. д., то возникает естественное желание на этом языке записать тот или иной раздел математики. В работах коллектива математиков Института кибернетики АН УССР в качестве такого раздела выбрана, например, алгебра.

Активно разворачивающиеся ныне работы по логической перестройке математики охватывают преимущественно ее «нижние этажи»: арифметику (теорию чисел), ряд разделов алгебры, основы математического анализа. Трудности «движения вверх» заключаются в том, что математик далеко не всегда в состоянии *фактически* довести доказательство теоремы до разложения его на те элементарные кирпичики, которыми располагает обычная математическая логика; ведь *длина доказательств может при этом увеличиться* в сотни раз, и читать такие доказательства человеку будет, наверное, не под силу. Труд, в котором доказательства каждой теоремы большого «куска» математики представлялись бы в языке математической логики, теперь фактически не предпринимают<sup>1</sup>. Это приводит к тому, что математики, в том числе и коллективный автор многотомного трактата

<sup>1</sup> В XIX в. Дж. Пеано с коллективом итальянских математиков поставил подобную задачу, предприняв вышедшее много лет издание

по современной математике Бурбаки, злоупотребляют термином «очевидно».

«Очевидно» как термин математической литературы носит известную эмоциональную окраску: то, что очевидно одному ученому, не очевидно другому. Это обстоятельство несет в себе серьезную опасность. Знание математики становится все более и более сложным, цепи дедуктивных построений все более и более длинными, специализация все более и более узкой. Очень часто где-то в базисных теоремах имеются цепи доказательств настолько длинные, требующие, как правило, настолько специализированной техники проверки, что они могут быть проверены весьма небольшим количеством исследователей. Например, работу, которая была проделана по одной из проблем Гильберта, разобрало не более 20 человек в мире (теорема доказывается на нескольких десятках страниц<sup>1</sup>, и более короткого доказательства ее не найдено). Уже появились такие работы, как работа Томпсона по решению малой проблемы Бернсайда<sup>2</sup>. Эта работа содержит доказательство лишь одной теоремы на 250 страницах. Ясно, что при этом вполне может где-то вкратце ошибиться, и опасность лежит именно в понятии «очевидно». Ведь исследователи, которые будут пользоваться теоремой, могут прийти к ложным выводам.

Это говорит о важности такого подхода к решению проблемы автоматизации дедуктивных построений, при котором здание математики покоилось бы на вполне понятном, объективированном, едином, универсальном понятии очевидности. Построение некоего алгоритма очевидности и операционной системы организации вычислительного процесса с информационной базой на той или иной конкретной вычислительной машине будет означать введение *формального практического понятия очевидности* (теоретическое понятие «очевидности» фактически присутствует в математической логике, но им пользоваться реально невозможно). Под «формальное практическое понятие очевидности» подпадает всякий вывод, который может быть получен в результате определенного времени (предположим, не более минуты)

«Математического формуляра», но этот труд так и остался незавершенным.

<sup>1</sup> См. В. М. Глушков. Строеие локальных и компактных групп и пятая проблема Гильберта. — «Успехи математических наук», 1957, т. 12, № 2.

<sup>2</sup> W. Feit, J. G. Thompson. Solvability of Groups of Odd Order. — «Pacific Journal of Mathematics», 1963, vol. 3, N 3, p. 775—1029.

работы алгоритма очевидности на определенной машине (предположим, БЭСМ-6 в такой-то комплектации). Такие выводы и образуют формальное определение очевидности.

В отношении самого «алгоритма очевидности», конечно, можно спорить, можно его улучшать и т. д. После того как какой-то алгоритм очевидности будет зафиксирован, возникает возможность построить и записать «фундамент математики» (по Н. Бурбаки, как мы условно будем считать), в котором все базисные понятия будут точно определены, а все базисные теоремы строго доказаны. В этих доказательствах будет применено понятие очевидности, однако оно будет использоваться не в таком «измельченном» виде, как при выводах в обычной математической логике. Вместе с тем это понятие будет совершенно объективным: все доказательства, в которых будет применяться ссылка на «очевидность», могут быть машинно проверены. А далее возникает возможность в соответствии с этим алгоритмом очевидности перестроить все остальные ветви математики.

## 2. ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ И БЛИЖАЙШИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Хотя мы находимся еще довольно далеко от реализации предлагаемой системы автоматизации дедуктивных построений, имеет смысл уже сейчас осознать, что может дать практике ее создание. Допустим, в нашем распоряжении есть некоторая вычислительная система с разделением времени, обладающая соответствующими пультами (на которых могут работать исследователи), операционной системой, организующей вычислительный процесс, и соответствующей информационной базой. Допустим, например, что в этой базе заложена вся современная алгебра — все теоремы, которые есть в монографиях и статьях ведущих ученых, причем это сделано в таком виде, что каждый шаг доказательства, переход от одного шага к другому автоматически проверяются с помощью машинного алгоритма очевидности (который, естественно, туда введен). Кроме того, в машину заложена информационно-логическая система поиска, дающая ответ на вопрос о том, известна ли данная теорема или нет, и если не известна, то не получается ли она как следствие из уже известных теорем в результате работы алгоритма очевидности.

Такая система уже на первом этапе будет обладать рядом интересных и практических важных свойств. Так, она сможет контролировать обучение математиков (например,



студентов или аспирантов), которым дано задание изучить какие-то новые статьи. Обучаемые, конечно, должны понять содержащиеся в статьях доказательства; понять автора — это означает расшифровать соответствующий математический текст и привести содержащееся в нем рассуждение в соответствие с принятым понятием очевидности<sup>1</sup>.

При использовании «алгоритма очевидности» создается возможность осуществлять *объективный* контроль за пониманием. Для этого изучающий может поступать, например, следующим образом: ввести проверяемую теорему вместе с ее доказательством в машину в таком препарированном виде, чтобы последняя на каждом шаге работы алгоритма очевидности отвечала — это «понятно», а это «не понятно». При отрицательном ответе человек должен разъяснить машине соответствующий дедуктивный переход, и, пока это им не сделано, доказательство не понято. Это уже объективная проверка усвоения материала, причем проводимая автоматически. Описанная процедура полезна еще и в том отношении, что каждая «расшифровка» новой теоремы, получаемой из свежих работ, будет обогащать информационную базу системы: в систему будет вкладываться новый результат, которым уже на уровне машинной очевидности сможет пользоваться любой другой исследователь.

Еще более ценным окажется возможность следующего применения системы. Обладая соответствующим практически-ориентированным логическим языком и алгоритмом очевидности определенной силы, с помощью этой системы можно будет организовать автоматическую проверку правильности *самых новых результатов* (а не только правильность их усвоения «расшифровщиками»). Для этого достаточно ввести некоторый практический язык, очень близкий к тому, который обычно используется в математических текстах, но включающий, естественно, некоторые ограничения на выбор формулировок. Тогда, например, можно будет принимать в математический журнал статьи только на этом языке и автоматически (на машине) проверять правильность выкладок их авторов.

Далее. При соединении такой вычислительной системы с мощной информационной базой появляется возможность

<sup>1</sup> Аналогично, для того чтобы обучающий убедился в том, что обучаемый понял текст, он должен выслушать аргументацию обучаемого по поводу расшифровки представлений об очевидности у автора статьи и привести эту расшифровку в соответствие со своим, тоже субъективным пониманием очевидности.

по-новому строить *справочно-информационные системы*. В обычном исполнении такие системы на сегодня лишь сообщают, известен им некоторый факт или нет. Но если система будет дополнена логическим механизмом, включающим алгоритм очевидности, то это уже позволит давать существенно содержательные ответы, например, сообщать, что хотя запрашиваемый факт машине не известен, он является очевидным (в смысле данного машинного алгоритма очевидности) следствием таких-то фактов.

И наконец, указанная система (точнее, ее разработка) создаст как бы «полюс концентрации» усилий большого количества исследователей (в первую очередь математиков и специалистов в области программирования и машинной техники), что неизбежно повлечет расширение возможностей самой системы. Во-первых, исследователи, работая на пультах системы, одновременно будут обогащать ее информационную базу. Таким образом, система будет «растущей» — в ее памяти будет накапливаться все большее количество фактов. Во-вторых, алгоритм очевидности, будучи опубликованным, станет достоянием большого количества людей, работающих в разных местах и способствующих обогащению этого алгоритма на основе решения конкретных задач.

Необходимо отметить, что для реализации этой программы следует — при наличии хорошей организации операционной системы — предусмотреть развитие также и специальных средств автоматизации программирования, ориентированных на определенные классы задач (т. е. соответствующие языки и системы трансляции и интерпретации). Более того, на этом пути естественно возникнут новые требования и к конструкциям машин, касающиеся таких их свойств, как удобство использования вычислительной системы, а также эффективность процессов программирования и решения на ней задач дедуктивных построений. Это значит, что в развитие математики и других дедуктивных наук включатся силы, которые раньше в развитии «теоретического знания» не участвовали (программисты, создатели операционных систем и даже конструкторы ЭВМ): ведь от всех них будет в какой-то мере зависеть дальнейшее развитие алгоритма очевидности в каждой отдельной дедуктивной дисциплине.

Следующий шаг развития «алгоритма очевидности» будет заключаться в том, что алгоритм сам начнет строить *новые дедуктивные конструкции* — сначала методом простого перебора, а затем используя те или иные ограничения

в соответствии с направляющими указаниями программиста-исследователя, работающего за пультом вычислительной системы. На этом этапе потребуются еще один язык — язык общения машины с исследователями. С помощью этого языка будет производиться человеко-машинный поиск программирования доказательств конкретным теорем. В принципе, поскольку дедуктивные конструкции представляют собой фактически функции, аргументами и значениями которых служат математические понятия, их можно строить методом обычной суперпозиции, следя при этом, чтобы подставляемые аргументы функций были того же типа, что и функции; таким образом можно будет организовать процесс построения деревьев дедуктивных конструкций.

Далее, поскольку случайный перебор (хотя бы и чисто автоматический, даже при очень мощных машинах) захлебывается уже на довольно коротких «дистанциях», необходима определенная организация автоматического перебора, т. е. сужение класса применяемых конструкций. Исследователь для этой цели обычно использует свои содержательно-интуитивные представления, которые в основном рождаются из опыта. Поэтому необходимо, чтобы в язык диалога с машиной была вложена возможность сообщения машине этих результатов интуиции, например требование выбора из некоторого класса конструкций, применявшихся при доказательствах таких-то теорем. И когда в алгоритм очевидности будет введена способность автоматического построения новых дедуктивных конструкций, он станет чрезвычайно мощным: очень многие результаты, которые раньше подлежали доказательству, станут для него очевидными. Итак, система становится развивающейся — она перестраивается в ходе функционирования, причем перестройка касается не только ее информационной базы, но и известных системе доказательств теорем.

Перестройка доказательств будет происходить, во-первых, по причине улучшения самого алгоритма очевидности; во-вторых, в результате развития вычислительной техники (замена устаревших ЭВМ более мощными машинами, способными с помощью прежнего алгоритма за ту же единицу времени осуществлять более длинные доказательства); и, наконец, в-третьих, благодаря появлению новых обобщающих математических результатов. Общий результат тем и силен, что из него непосредственно вытекают построения, доказывавшиеся ранее с помощью особых приемов. Последнее обстоятельство открывает очень интересную возмож-

ность (впервые появившуюся в истории дедуктивных наук) объективной оценки обобщающей силы математического результата. Нередко о математическом результате говорят: «Эта теорема весьма обща и глубока, поскольку имеет очень много следствий». Мы интуитивно чувствуем обобщающую силу теорем, но измерить ее не умеем. В системе, путь к созданию которой мы набрасываем, силу результата дедуктивного процесса можно будет точно измерять. Можно, например, предположить, что искомым «измерителем» окажется логарифмическая мера: логарифм отношения числа ячеек памяти, которые были заняты доказательствами всех теорем в данной области математики до этой теоремы, к числу ячеек, занятых для той же цели после ее доказательства.

Из возможности измерения обобщающей силы дедуктивного результата возникает еще одно интересное обстоятельство. Покажем его на примере одного частного, но важного случая. В настоящее время существует различное отношение к работам в области «чистой» математики и к деятельности математиков — программистов и «прикладников»: считается, что последняя носит более «приземленный» характер. Введение точной оценки силы результата лишит этот взгляд основания: любые результаты окажется возможным сравнивать на одних и тех же весах. Если усовершенствования операционной системы ЭВМ гораздо больше отразились на уменьшении общего количества слов, которое требуется для доказательств теорем в данной области, чем доказательство какой-либо новой (красивой и интересной) теоремы, то обобщающая сила первого результата, достигнутого умелым и изобретательным программированием, *глубже*, чем обобщающая сила второго результата, достигнутого в рамках абстрактной математики.

Практика говорит о том, что предлагаемую автоматизированную систему дедуктивных построений можно реализовать уже на существующих машинах, если снабдить их хорошими пультами ввода-вывода информации, развитыми операционными системами, способными обеспечивать эффективное взаимодействие человека с машиной, и большой внешней памятью, достаточной для существенного расширения их информационной базы. Само же построение таких систем явится стимулом дальнейшего развития вычислительной техники и дедуктивной логики.

Работы по автоматизации процессов рассуждения имеют значение не только для математики (или физики), но и для любой науки, вообще для любого вида интеллектуальной дея-

тельности. Поэтому можно с уверенностью полагать, что по мере развития вычислительной техники доля работ по программированию невычислительных дедуктивных построений будет все более возрастать за счет чисто вычислительных задач. На конструкцию машин, на их внутренний язык и систему операций, на организацию связи человека и машины и машинной памяти и т. д. все большее влияние, вероятно, будут оказывать идеи, связанные с развитием систем такого рода. Вместе с тем возможности этих систем будут постепенно охватывать все более широкий круг проблем, выходящих уже далеко за пределы собственно математических задач.

В построении и организации соответствующих вычислительных систем весьма перспективной является идея использования большой машины в комплексе с малыми машинами, являющимися одновременно ее «интеллектуальными» пультами. Дело в том, что в будущем дедуктивные построения будут рождаться, как правило, в процессе интенсивного *многошагового взаимодействия человека с машиной*. Поскольку рентабельно лишь коллективное пользование большой машиной, а в этом случае начинают сильно сказываться технические ограничения на коммуникационные связи, то более рациональным оказывается размещение части общей «интеллектуальности» соответствующей машинной системы на ее периферии — на малых машинах, предназначенных для решения задачи диалога с человеком, который непосредственно работает с системой. Тогда центральная часть системы будет использоваться в основном как хранилище информации с быстрым выбором из памяти и быстрым проведением выкладок, связанных с построением доказательств. Расшифровка же высказываний человека, выбор направления перебора и т. д. будут осуществляться непосредственно на соответствующем «интеллектуальном» пульте<sup>1</sup>.

### 3. НЕКОТОРЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ТВОРЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В предыдущих разделах были намечены контуры практического пути решения проблемы «искусственного интеллекта» применительно к дедуктивным построениям как существ-

<sup>1</sup> Этим пультом могут являться уже машины класса «Мир» — выпускаемая машина «Мир-2» и, естественно, машины «Мир» последующих модификаций.

венно важному и сравнительно легко поддающемуся автоматизации виду *творческих процессов*. Теперь мы попытаемся детализировать аспект, относящийся к соответствующим системам обработки информации. Мы рассмотрим один подход к проблеме взаимодействия в них человека с ЭВМ, а также осветим принципиальные требования к развитию структур машин с целью повышения уровня «машинного интеллекта». При этом мы сделаем упор на использование *перспективных* системотехнических средств — либо уже создаваемых, либо таких, возможность реализации которых не вызывает сомнений.

Специфика вопросов, рассматриваемых ниже, заставляет пользоваться понятием о творческом процессе вообще, не ограничиваясь каким-либо определенным его видом. Вместе с тем необходимо уточнить чрезвычайно емкий термин «творческий процесс».

Примем в качестве рабочей формулировки, что «творческий процесс» — это любая переработка информации, выполняемая неформализованным или частично формализованным способом, целью которой является создание *новой* «информационной структуры» как объекта (результата) творчества. Под неформализованным или частично формализованным способом переработки информации будем понимать такой способ, при котором не используется заранее составленное формальное описание характера и последовательности действий, необходимых для осуществления *всего* процесса (с детализацией, достаточной для реализации его на современных вычислительных машинах). Вместе с тем здесь не исключается возможность выработки каких-то действий (и формирования последовательностей действий) согласно имеющимся правилам в ходе самого процесса, на который воздействует внешняя среда.

Приведенная трактовка творческого процесса, охватывая два вопроса: «что перерабатывается?» и «как перерабатывается?», — ограничивает объект переработки только *информацией*, а автоматизацию этой переработки ставит в прямую зависимость от ее формализации. Таким образом, с одной стороны, выделяется «информационная сущность» творческого процесса и, с другой стороны, проводится четкое разграничение между творческим и нетворческим информационными процессами — безотносительно к их целям. Этот подход отражает ту особенность *современных* (осуществимых в настоящее время и в обозримом будущем) технических средств переработки информации, что для авто-

матизации «творчества» они предполагают ту или иную его предварительную формализацию. При этом не подвергается сомнению возможность создания в дальнейшем (на основе познания процессов творчества и мышления, а также развития техники переработки данных) таких машин, которые смогут настолько глубоко моделировать работу человеческого мозга, что окажутся в состоянии выполнять неформализованные творческие задания, в том числе — что особенно важно — и слишком сложные для человека.

Подчеркнем, что речь идет не о мыслительном процессе вообще, а именно о *творческом* процессе в том смысле, который определен выше. В соответствии с этим ответ на вопрос «может ли машина творить?» отрицателен, по крайней мере если имеются в виду *современные* машины. Однако данная постановка вопроса не трактует творчество как процесс, не доступный машине. Творчество рассматривается методологически независимо от машинной реализации. В настоящее время такая реализация творческих процессов (тем более процессов в «полной» мере творческих) действительно невозможна; творить *самостоятельно* машины не могут. Но *помогать в творчестве* они уже могут, т. е. частичная автоматизация на основе использования автоматизированных (а не автоматических) систем переработки информации ныне вполне возможна для некоторых творческих процессов<sup>1</sup>. И важнейшим условием достижения эффективности этой автоматизации является повышение «интеллекта» современных вычислительных машин.

Далее термин «творческий процесс» будет применяться только в приведенной трактовке. Творческие процессы в этом смысле — процессы эвристические, но последнее понятие шире, ибо эвристический процесс не всегда является творческим, в нашем понимании. Во-первых, эвристический процесс может быть использован не только для создания принципиально новой информационной структуры и, во-вторых, он может быть в некоторых случаях полностью формализованным<sup>2</sup> — заданным алгоритмом (программой), дающим

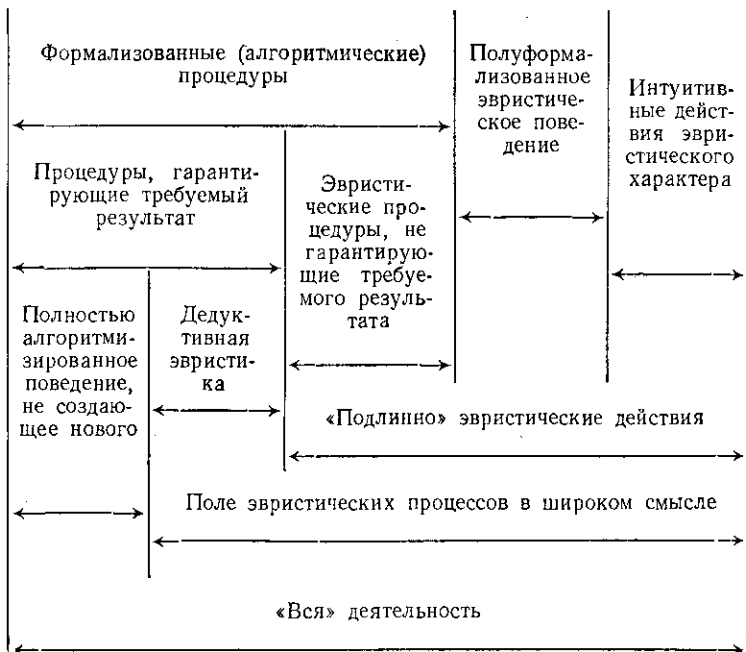
<sup>1</sup> См. А. Моль, В. Фукс, М. Касслер. Искусство и ЭВМ. М., 1975. Примеры образов современного машинного творчества будут даны в следующей главе.

<sup>2</sup> Что и имеет место в процедурах поиска логических выводов и доказательств теорем, основанных на использовании секвенциальных логических исчислений. О методологическом анализе некоторых принципов эвристических процессов такого рода («дедуктивная эвристика») см.: О. Ф. Серебрянников. Эвристические принципы и логические исчисления. М., 1970.

в принципе решение задачи во всех случаях, когда она может быть решена.

Поясним соотношение формализованного, эвристического и творческого (схема 1).

Схема 1



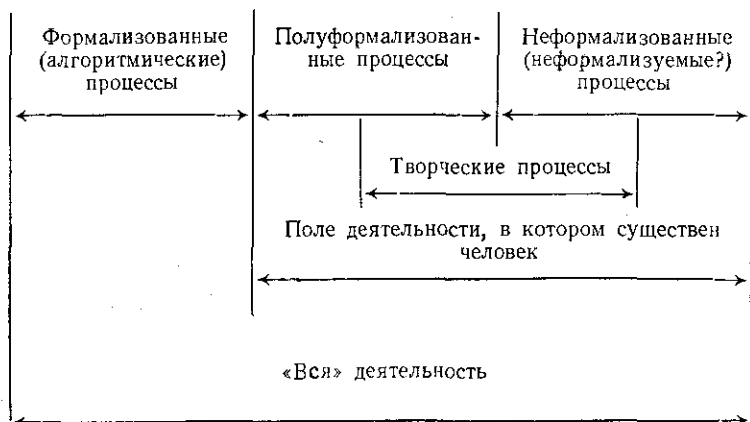
Под эвристическими понимаются процессы (переработки информации, поведения и т. п.), приводящие к созданию нового. Из схемы видно, что новое может создаваться и вполне формализованными процедурами (типа «абсолютных» алгоритмов, подобных программе Ван Хао или АЛПЕВ-ЛОМИ-2). Однако это эвристика в несобственном смысле. В более естественном смысле эвристические — это такие процессы, которые не гарантируют «механического» порождения всего нового, что связано с некоторой ситуацией. В таких случаях при формализации (алгоритмизации) эвристического процесса стремятся опереться на учет особенностей творческой деятельности человека — формализовать неформальные для человека приемы открытия нового. Таков



путь эвристического программирования. Но к эвристическим относятся и полуформализованные (в частности, человеко-машинные) процедуры и «интуитивно» осуществляемые способы поведения, присущие человеку и не моделируемые современными машинами. Под «всей» деятельностью понимается поведение как человека, так и машины, причем оно, конечно, не исчерпывается эвристикой.

Теперь о месте творческих процессов в сфере «формализованного — неформализованного» (см. схему 2).

Схема 2



Примером (полностью) формализованных процедур может служить работа ЭВМ или человека-вычислителя, решающего задачу по «абсолютному алгоритму». К известным в настоящее время полуформализованным процессам можно отнести решение задач, в ходе которого существенную роль играет взаимодействие человека и машины. Творческие процессы входят как в класс полуформализованных процедур, так и в класс неформализованных (и неформализуемых, если таковые имеются) процессов.

Неформализованная переработка информации, примеры которой в изобилии доставляют психика и поведение человека, не обязательно является творческой. Полный охват полуформализованных процедур и неформализованных процессов «полем деятельности, в котором существует человек», имеет силу для современной ситуации в кибернетике. Создание «творческих машин», могущих осуществлять полуфор-

мализованные процедуры, подобные тем, которые характеризуют значительную часть логических процессов у человека, должно «потеснить» в этом поле «человеческий фактор». Очерченная в предыдущем параграфе программа автоматизации дедуктивных построений касается в основном процессов дедукции как части творческих процессов, но, разумеется, предполагает также широкое использование формализованных процедур и полуформализованных процессов взаимодействия человека и машины<sup>1</sup>.

Попытаемся описать понимаемое так творчество в математической символике<sup>2</sup>. По мере протекания процесса творчества создаваемый объект проходит различные *состояния*  $S_i$  в результате выполнения над ними *действий*  $\delta_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ). Действия предпринимаются автором процесса в соответствии с определенными *решениями*  $\rho_i$ , выработанными в результате действий. Таким образом, общая схема творческого процесса может быть выражена как последовательность шагов *принятия решений* ( $\rho_i$ ), приводящих к шагам *построения* соответствующего *объекта творчества* ( $\delta_i$ ):

$$(\rho_1, \delta_1) \Rightarrow (\rho_2, \delta_2) \Rightarrow \dots \Rightarrow (\rho_{n-1}, \delta_{n-1}) \Rightarrow (\rho_n, \delta_n)$$

(стрелками обозначены переходы от одного акта решения — построения к другому), что можно кратко записать как

$$\prod_{i=1}^n (\rho_i, \delta_i).$$

Результаты шагов  $\rho_i$  и  $\delta_i$  как отдельных элементарных процессов представляют собой зависимости, выражаемые в общем виде, соответственно, следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta_i &= \rho_i [S_{i-1}, M_c(S_{i-1}), M_u(c), M_k(k), M_z(z)]; \\ S_i &= \delta_i [S_{i-1}, M_z(z)], \end{aligned}$$

где  $\delta_i$  — программа действий по преобразованию объектов творчества на  $i$ -м шаге;  $S_{i-1}$  и  $S_i$  — состояния объекта

<sup>1</sup> Следует подчеркнуть, что «творчество» понимается здесь в смысле, описанном выше. Заметим также, что описанные схемы — только одна из возможных трактовок соотношения формализованного (алгоритмического), эвристического и творческого. Другая трактовка возможна, например, на основе рассмотрения ослаблений алгоритмического и трактовки творческого в терминах образования (новых) понятий.

<sup>2</sup> Z. L. Rabinovich. Creative Work and Computer Structures. — «Progress of Cybernetics», v. 3. London — New York — Paris, 1970.

творчества, достигнутые на  $(i - 1)$ -м и  $i$ -м шагах;  $S_{i < (i-1)}$  — множество состояний, достигнутых на всех шагах, предшествующих  $(i - 1)$ -му шагу;  $M_{ц}(c)$  — множество целей всего данного процесса творчества;  $M_{к}(k)$  — множество критериев приближения к целям;  $M_{з}(z)$  — совокупность зафиксированных знаний переработчиков информации.

Каждый элементарный процесс рассматривается здесь как функция от помещенных в скобки исходных данных (аргументов). Функция  $\rho_i$  не может быть априорно выражена формальным образом в силу принятого определения процесса творчества. Выражение  $\delta'_i$  лишь показывает, что принятие решения о действиях на предстоящем  $i$ -м шаге процесса (в том числе и выработка формального приема его принятия, если таковая возможна) зависит от оценки полученных результатов на  $(i - 1)$ -м шаге, т. е. от оценки состояния  $S_{i-1}$ , причем по сравнению с предыдущими состояниями  $S_{i < (i-1)}$ .

Оценки и принятие решения выполняются в соответствии с критериями  $M_{к}(k)$ , определяющими степень достижения целей  $M_{ц}(c)$ , с использованием запаса знаний  $M_{з}(z)$ . Существенно переменными величинами здесь являются решения  $\delta'$  и состояния  $S$ , причем отдельные состояния отличаются друг от друга различными степенями приближения к поставленным целям  $M_{ц}(c)$ . Однако в элементарном процессе принятия очередного решения  $\delta'_i$  могут изменяться критерии  $M_{к}(k)$  и даже цели  $M_{ц}(c)$ , но не может изменяться кардинальным образом главная цель, поскольку это уже будет означать замену данного творческого процесса новым. Кроме того, пополняется и запас знаний  $M_{з}(z)$ ; это имеет место, если обеспечивается запоминание характерных особенностей реализуемого творческого процесса. Таким образом, элементарный процесс  $\rho_i$  является, собственно говоря, двухэтапным процессом: первый его этап на  $i$ -м шаге заключается в анализе и оценке результатов выполнения действий  $\delta'_{i-1}$  на предыдущем шаге, а второй этап — в выработке плана-программы действий  $\delta'_i$  на данном шаге, заключающейся, например, в установлении последовательности конкретных операторов обработки информации.

Этапы принятия решения сами по себе не изменяют состояния объекта творчества. Эти состояния изменяются лишь под воздействием очередного элементарного процесса  $\delta_i$ , в результате которого на  $i$ -м шаге вырабатывается новое состояние объекта творчества  $S_i$  — в соответствии с реше-

нием  $\delta'_i$  об изменении состояния  $S_{i-1}$  и с использованием запаса знаний  $M_z(z)$ .

Обычные процессы подготовки математической задачи и ее решения, взятые вместе, составляют уже творческий процесс (хотя и не ярко выраженный), если первый из них не формализован или неполностью формализован. Здесь шагами принятия решений являются выбор либо выработка метода решения задачи, составление программы для ЭВМ, анализ пробного счета и коррекция программы, а исполнительными шагами является реализация вышеупомянутой программы на машине, в том числе и пробный счет. Первые шаги в данном случае в основном творческие, вторые — целиком алгоритмизированы. Более выраженный творческий характер процесс такого рода будет иметь место тогда, когда алгоритм решения всей задачи заранее неизвестен, и программа составляется по отдельным последовательным отрезкам в зависимости от полученных результатов. И наконец, сугубо творческий характер носит такой процесс, когда неформализованными являются не только шаги принятия решений, но и шаги построения объекта творчества в соответствии с этими решениями, т. е. когда неформализованным является весь процесс в целом (как, например, процессы художественного творчества, хотя элементы формализации и в них могут иметь место).

Целесообразность и возможность автоматизации того или иного конкретного творческого процесса в первую очередь зависят от его целей и вида. Но эти два фактора (целесообразность и возможность) не противоречивы. Действительно, для того чтобы процесс можно было бы частично автоматизировать, он должен быть в соответствующей степени формализован.

Хуже всего поддается формализации и такой творческий процесс, который связан с *колоссальным многообразием* множеств решений, действий, знаний и, главное, цели которого *строго не определены*, а критерии их достижения носят *эмоциональный характер*. Но процессы, сочетающие данные свойства, как, например, художественное творчество, относятся к прерогативе человека-творца, и их «полная» автоматизация не нужна (что вовсе не исключает потребности в моделировании этих процессов в целях их исследования). Что же касается тех творческих процессов, которые практически целесообразно автоматизировать (частично или полностью), то они, как правило, имеют *четкие критерии* достижения цели, которые вполне могут быть выражены

*формально.* К такого рода процессам относятся, например, техническое творчество и научные исследования. Ядрами этих процессов зачастую являются дедуктивные построения, об автоматизации которых шла речь в предыдущих разделах.

Следует заметить, что большие возможности формализации процессов второго рода по сравнению с процессами первого рода вовсе не означают меньшую сложность этих процессов, в смысле необходимых интеллектуальных усилий для их реализации. Напротив, какой-либо конкретный процесс научного творчества, например, может оказаться более сложным, чем конкретный процесс художественного творчества в силу наличия в первом из них сильных ограничений на принятие решений и жесткой детерминированности целей; в то же время именно благодаря этим факторам он более легко поддается формализации.

Несмотря на целесообразность и принципиальную возможность полной автоматизации многих творческих процессов, в осуществлении ее возникают существенные трудности, связанные с огромным перебором. На пути же частичной автоматизации эти трудности преодолимы на основе разумных компромиссов в распределении функций творческого процесса между различными переработчиками информации — людьми и машинами.

Прежде всего следует отметить существенную разницу в возможностях формализации подпроцесса получения решений ( $\rho = \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ) и подпроцесса преобразования состояний ( $\delta = \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ ). Первый подпроцесс является в общем наименее формализуемым, правда, в той его части, которая касается оценки состояния объекта творчества, полученного на предыдущем шаге ( $\delta_{i-1}$ ) (оценка эта необходима при выработке решения). Здесь имеются реальные возможности автоматизации (если, конечно, критерии оценки не являются сугубо эмоциональными).

Значит, для подпроцесса  $\rho$  автоматизация может рассматриваться как вспомогательное средство ускорения принятия решения, облегчающее оценку полученного состояния, упрощающее использование запаса знаний  $M_z(z)$  — извлечение нужных сведений и т. д. Такая автоматизация не ограничивает проявления творческих способностей человека, а, наоборот, освобождает от вспомогательной формализуемой работы, оставляя для него только высшие сферы творческого процесса.

Второй подпроцесс — преобразование состояний  $\delta$  — легче поддается автоматизации, чем первый, поскольку на

каждом шаге состоит в выполнении определенных действий по построению объекта творчества в соответствии с принятым решением, т. е. в осуществлении выбранной последовательности операторов, работающих над объектом с использованием текущей для данного шага информации. Однако и здесь могут возникать существенные трудности, связанные с перебором большого количества вариантов, и в зависимости от характера творческого процесса диапазон роли автоматизации варьируется от основной до вспомогательной и незначительной. В целом же тенденция к автоматизации этого подпроцесса довольно сильна.

Следовательно, автоматизации благоприятствует больший вес подпроцесса  $\delta$  по сравнению с подпроцессом  $\rho$  в общем творческом процессе. Вместе с тем возможностью автоматизации творческого процесса способствует и уменьшение количества его шагов, чему соответствует принятие решений на этапах  $\rho_i$  о крупных блоках действий  $\delta'_i$  (в предельном случае, когда весь процесс состоит из единственной пары шагов, мы имеем дело с составлением в подпроцессе  $\rho_1$  окончательной программы  $\delta'_1$  и решением всей задачи в подпроцессе  $\delta_1$ ). Если же этапы формализуемой последовательности действий невелики, т. е. имеет место большая частота неформализуемого вмешательства в процесс, то, естественно, и возможности его автоматизации меньше.

Таким образом, общий путь организации автоматизированного творческого процесса можно видеть в *расчленении всего процесса на перемежающиеся элементарные процессы принятия решений и преобразования состояний создаваемого объекта и в выделении формализуемых участков*, которые целиком можно было бы реализовать средствами автоматической переработки информации.

#### 4. СТРУКТУРЫ ЦИФРОВЫХ МАШИН

Из сказанного выше вытекают требования к автоматическим средствам, предназначенным для применения в решении творческих задач (требований к системе внешнего математического обеспечения машин мы касаться не будем); речь идет о *структурах электронных цифровых машин*. Требования к ним касаются (1) такого развития структурных способов переработки информации, которое позволило бы расширить круг эффективно автоматизируемых участков творческого процесса, и (2) такой реализации режима совместной работы (диалога) человека с машиной, которая впол-

не отвечала бы задачам автоматизированного творческого процесса, состоящего из отдельных шагов подпроцессов получения решений и преобразования состояний.

Эти требования должны существенным образом отразиться на структуре машин, на всем так называемом внутреннем математическом обеспечении (стандартные вычислительные и служебные алгоритмы, зафиксированные в машине структурным способом, т. е. в схемах и в долговременных запоминающих устройствах любого вида, и т. п.).

Развитие структур машин может быть охарактеризовано как повышение искусственного или, лучше, «машинного интеллекта». Термин «интеллект» в применении к машине удобен тем, что он объединяет целый ряд полезных ее свойств, приобретающих особо важное значение, в частности из-за необходимости повышения приспособленности машин к решению сложных логических задач, среди которых доминирующее положение занимают задачи, имеющие эвристический характер. Поскольку, однако, в применении к машине понятие «интеллект» приобретает, естественно, весьма упрощенную трактовку, оно снабжается эпитетами «машинный» или «искусственный»<sup>1</sup>.

К «машинному интеллекту» мы будем относить следующие свойства машины: а) богатство хранящегося в ней запаса «знаний» и «умений» (констант, понятий, всевозможных стандартных алгоритмов), удобство использования этого запаса, а также его пополнения путем обучения в процессе эксплуатации (что является особенно интересным); б) логическое совершенство методов переработки информации в машине, приема и выдачи информации, а также способность машины к организации сложного вычислительного процесса в целом; в) понимание машиной входных языков высокого уровня. Степень развития этих свойств и определяет уровень «машинного интеллекта».

Ясно, что данные свойства в совокупности имитируют такие черты человеческого интеллекта, как эрудиция, сообразительность, продуктивность и организованность, восприимчивость к входной информации (в частности, понятливость). Хотя человеческий интеллект этими чертами далеко не исчерпывается, именно приведенные свойства наиболее существенны с точки зрения их использования при решении задачи автоматизации творческих процессов. Чрез-

<sup>1</sup> Ср. В. М. Глушков и др. Человек и вычислительная техника. Киев, 1971.

вычайно важно здесь то, что повышение машинного интеллекта обеспечивает повышение эффективности процесса математической эксплуатации машин в целом, т. е. как подготовки, так и решения любых задач.

Это происходит как за счет повышения производительности машин в процессе собственно решения задач, так и главным образом вследствие существенного облегчения взаимодействия между человеком и машиной во всем процессе приобретения знаний. Последнее обстоятельство особенно сильно отражается на эффективности использования машин для задач, имеющих творческий характер, которые решаются в режиме диалога, когда человек активно участвует в общем процессе решения задачи в качестве непосредственного переработчика информации (на неавтоматизированных участках подпроцессов получения решений и преобразования состояний объекта творчества).

Развитие указанных свойств «машинного интеллекта» требует в рассматриваемом плане главным образом существенного увеличения объема разных видов памяти и расширения возможностей изменения и дополнения их содержания; совершенствования средств обмена информацией между машиной и пользователями; внедрения мультипроцессорной обработки информации с функциональной специализацией процессоров, а также развития внутренних языков машины и систем их интерпретации.

Проблема развития «машинного интеллекта» с целью приспособления структур машин к творческим задачам в наибольшей мере отражается в развитии их *внутренних языков*. Действительно, во внутреннем языке фиксируются: вложенные в машину знания и информация, приобретаемые ею при обучении. Внутренний язык — это именно то, что «понимает» машина; «понимание» при этом трактуется как непосредственное исполнение выраженных на данном языке алгоритмов, которые машина соответствующим образом интерпретирует. При этом интерпретация истолковывается как процесс текущего преобразования алгоритмов с верхнего программного уровня внутреннего языка через его промежуточные уровни на нижний уровень микрокомандных сигналов, определяющих уже непосредственно выполнение соответствующих машинных микроопераций.

Процесса интерпретации, происходящего в машине, человек не замечает, так же как и процесса собственно вычислений; именно поэтому внутренний язык, как язык интерпретируемый, считается таким, который *непосредственно*



понимает машина. Развитие внутренних языков с целью повышения машинного интеллекта влечет за собой и характерное совершенствование систем их интерпретации, в которые вводятся специальные анализирующие алгоритмы (помимо традиционных исполнительных, также расширяемых при этом в значительной степени).

В общем внутренний язык развивается в двух направлениях<sup>1</sup>. Первое направление — использование на программном уровне языка основных средств (в том числе крупных обобщенных конструкций) *входных языков программирования*, которые, разумеется, должны соответствовать характеру автоматизируемых творческих процессов. Описанный в начале данной главы путь автоматизации дедуктивных построений как раз и демонстрирует это направление. Оно обеспечивает возможность представления заданий машине без их существенного преобразования и детализации, т. е. устраняет либо резко снижает «языковой барьер» между нею и человеком. Это имеет важное значение для достижения высокой эффективности, облегчения и удобства проведения творческого процесса в режиме диалога человека с машиной, особенно в том весьма распространенном случае (охватывающем уже обычный ход подготовки задач для решения их на машине), когда программы алгоритмизируемых участков процесса заранее не известны и устанавливаются человеком на предваряющих их неформализованных участках. Кроме того, приближение внутренних языков ко входным алгоритмическим языкам открывает возможности дальнейшего сближения машинных и естественных языков, что имеет огромное значение для автоматизации творческих процессов.

Второе направление — использование на нижних уровнях *внутреннего языка* разветвленной сети макро- и микро-средств, обеспечивающих высокую эффективность реализации различных вычислительных и служебных алгоритмов, в том числе алгоритмов переработки символьной информации, алгоритмов интерпретации средств верхнего программного уровня и компонентов операционной системы. Этим же целям — достижению высокого уровня организации и эффективности вычислительного процесса — должно служить и развитие программно-структурных операционных систем и мультипроцессорных методов обработки информации, приобретающих важное значение для вычислительных ма-

<sup>1</sup> См. В. М. Глушков и др. Вычислительные машины с развитыми системами интерпретации. Киев, 1970.

шин коллективного пользования. При построении на их основе мощных информационных систем возникает проблема рационального совместного использования больших и малых машин, которая, как уже указывалось, решается путем разумного распределения между ними функциональной нагрузки.

Усложнение структур вычислительных машин, неизбежное в рамках работ по «искусственному интеллекту», делает актуальной задачу формализации их проектирования как весьма непростого творческого процесса, осуществляемого в автоматизированном виде человеко-машинной системой. Такое проектирование вычислительных машин выполняется кибернетическими методами, и в этом проявляется характерная «положительная обратная связь» между кибернетикой и ее средствами (вычислительной техникой), способствующая интенсивному развитию кибернетических «усилителей интеллекта».

### Глава III

## О МОДЕЛИРОВАНИИ ХУДОЖЕСТВЕННОГО ТВОРЧЕСТВА

В главе I данной части книги был высказан взгляд, что работы по «искусственному интеллекту» нельзя рассматривать лишь как «инженерные» по своей направленности. Постараемся показать в этой и следующей главах, что они имеют гораздо более широкое теоретическое и философское значение. Действительно, *крупное* продвижение вперед в проблеме интеллекта *искусственного*, машинного вносит определенный вклад в познание интеллекта *естественного*. Связь проблематики изучения «двух интеллектов» наиболее выпукло проявляется в процедурах кибернетического (математического, логико-семиотического, машинного и т. п.) моделирования естественных интеллектуальных процессов, особенно процессов *эвристико-творческих*. Такое моделирование, с одной стороны, является составной частью «инженерно-ориентированных» работ по искусственному интеллекту, а с другой стороны, служит познанию нейропсихических процессов и поведения человека. Одной из интенсивно развивающихся областей приложения метода кибернетического моделирования является *художественное творчество*.

### 1. КИБЕРНЕТИКА И ИСКУССТВО. МУЗЫКА КАК ОБЪЕКТ МАШИННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Пожалуй, ни одна из областей применения кибернетики не привлекает такого широкого интереса, не вызывает столько споров и разноречивых мнений, как вопросы приложений кибернетики в сфере искусства и искусствоведения. Большой интерес к этим вопросам вызван кроме всего прочего и кажущейся простотой проблемы; многие уверены, что для оценки результатов «машинного художественного творчества»<sup>1</sup> не требуется специальных знаний.

<sup>1</sup> Смысл этого термина станет ясным из последующего изложения.

На самом же деле все гораздо сложнее. Отсутствие понимания существа проблемы, поверхностное отношение к оценке образцов машинного творчества часто приводят к недоразумениям и казусам. Особенно наглядно это проявляется при сравнении образцов машинного и человеческого творчества, что и будет показано дальше.

Любое творчество опирается на опыт человека, характер и природа которого различны для разных видов творчества. Опыт же приобретается в процессе обучения, в период рационалистического, сознательного изучения специфики творчества, а также и иным путем. Так, музыкальные связи, например, ладовые, интонационные или ритмические, образуются в сознании и памяти композитора и вне процесса обучения — интуитивно, стихийно, бессознательно — при прослушивании музыки. И в том, и в другом случае в сознании формируются какие-то взаимосвязи, смысловые зависимости, подчиняющиеся определенным закономерностям.

Изучение специфики творчества способствует раскрытию тайны интуиции как важного фактора любого человеческого творческого процесса. Ведь интуиция — это объективно существующий, но неосознаваемый, скрытый от личности психологический феномен, в закономерности которого наука будет постепенно проникать. Но проникновение это происходит трудно: интуиция плохо поддается трактовке в «точных» терминах. Поэтому здесь (как и всегда в случае объектов, формализация которых затруднительна) важно создание хотя бы самых простых моделей на «конструктивном» уровне, например в виде программ для ЭВМ.

Ныне широко известны эксперименты по моделированию на машине различных видов умственной деятельности, и в частности художественного творчества (музыка, живопись, стихосложение, танцевальные движения, кино и т. п.)<sup>1</sup>. Все это обусловлено желанием понять сущность сложных преобразований, обеспечивающих эффективное решение проблем, выявление закономерностей интеллектуальных процессов, приводящих к созданию художественных ценностей. Подобные эксперименты полезны также для разработки методов и средств кодирования и ввода в машину фактов и знаний, зафиксированных, например, в книгах, на грампластинках и т. п.

<sup>1</sup> Описание многих из них см.: А. Моль, В. Фукс, М. Кисслер. Искусство и ЭВМ. М., 1975; E. N. Ferentzy, M. Havass. Human Movement Analysis by Computer: Electronic Choreography and Music Composition. — «Computational Linguistics», v. 3. Budapest, 1964.

Особенно это относится к тем видам науки и искусства, которые не используют точные, математические способы изложения. Далеко не очевидно, например, как «вложить в машину» учебник по теории музыки или трактат о живописи. Ведь машина понимает лишь язык формул и чисел. Поэтому все вводимые в нее понятия должны быть строго определены, формализованы и закодированы на языке, понятном машине. Задача заключается и в том, чтобы, не уменьшая строгости, расширить этот язык, сделать его более доступным для лиц, не знакомых с программированием. В предыдущей главе мы видели, каким рисуется решение этой задачи в случае дедуктивных областей знания. Теперь мы обсудим моделирование на ЭВМ художественного творчества.

Такое моделирование ставит много новых вопросов. Возьмем, например, машинное сочинение стихов. Если таец, живопись или музыка понятны независимо от речевого языка, то понимание стихов требует знания специфики того языка, на котором они написаны. Поэтому большинство читателей этой книги не имеют представления о машинных стихах. К сожалению, нет ни одного примера подлинных машинных стихов на *русском* языке (у нас этим просто не занимаются), а перевод машинных стихов с другого языка на русский — это уже стихи не машинные, поскольку переводит человек. И здесь многое зависит от отношения поэта-переводчика, от его психологической установки, зачастую даже проявляющейся неосознанно. Автор перевода машинных стихов, хочет он этого или нет, по-своему приспосабливается к машине, «имитируя» ее «манеру» и «стиль»; при этом независимо от намерений он выражает собственное представление о машинном творчестве. И представление это чаще всего такое: «машина не может...»; в результате получаются пародии на машинные стихи<sup>1</sup>. Это и понятно: по одному и тому же тексту (подстрочнику) перевода машинных стихов можно написать совершенно различные по стилю стихи. Идеи оригинала по-разному трансформируются в сознании разных поэтов-переводчиков, вызывая часто совершенно различные образы, ассоциации или впечатления.

Все это позволяет сделать вывод: перевод любых стихов, сделанных человеком, даже по подстрочнику машинных

<sup>1</sup> См. Р. Х. Зарипов. Моделирование художественного творчества на вычислительной машине. — «Методологические проблемы кибернетики», т. 2. М., 1970, стр. 59—80.

стихов, есть стихи человеческие. По-видимому, это же относится и к прозе. Человеческий перевод машинной прозы — тоже не машинная проза; в лучшем случае это дословный перевод, который вряд ли передает манеру и стиль подлинника.

Изучение и выявление общих закономерностей творчества методом моделирования (в частности моделирования на ЭВМ, являющегося новым объективным методом изучения художественной культуры) возможны на разных объектах, на различных видах художественного творчества. Важно, чтобы результаты, полученные при моделировании, были наглядными, в определенном смысле похожими на соответствующие по форме образцы человеческого творчества, и вызывали бы у «потребителей» искусства те же реакции, что и при восприятии результатов человеческого творчества.

Идеальный объект для исследований такого рода — музыка. Основным, главным элементом любого музыкального произведения является мелодия — одnogолосное выражение музыкальной мысли. Именно при сочинении и восприятии музыкальной мелодии наиболее наглядно и полно проявляется работа механизма интуиции подражания, узнавания или распознавания определенного типа композиций. Получение результата при этом не требует знания структуры (синтаксиса) мелодий и основано в значительной мере на интуиции, в частности при сочинении — на неосознаваемом, интуитивном подражании.

Кроме того, музыка обладает особенностью, которая с точки зрения возможности моделирования выгодно отличает ее от других видов искусства: в определенном смысле она относится к «выразительным», а не «изобразительным» видам искусства. Музыкальное произведение, как и произведения других видов искусства, представляет собой определенную структуру, которая, однако, воплощает идеи, мысли, чувства в особой, специфической форме, отражая действительность обычно в отвлечении от ее конкретных внешних признаков. Это обстоятельство, по-видимому, и облегчает моделирование музыкальных сочинений на машине.

«Моделирование» при этом означает, что результаты «машинного» творчества оказываются сравнимыми с сочинениями композиторов-профессионалов и по массовым оценкам слушателей неотличимы от них. Результаты же моделирования на машине других видов художественного творчества (например, танца, стихосложения или живописи

в доступных и привычных массовому слушателю или зрителю (формах) являются менее наглядными при восприятии их по сравнению с человеческими образцами или требуют специальных знаний и опыта при их анализе и оценке. А игнорирование особенностей этих видов искусства, усложняющих их моделирование, и вызываемый этими особенностями необъективный подход при оценке образцов машинного творчества, как показывает опыт, недопустимы<sup>1</sup>.

Применение ЭВМ в изучении музыки — новая, растущая область исследований. Работы, связанные с применением машин в музыке, проводятся как в нашей стране, так и за рубежом по нескольким направлениям.

Так, создаются специальные языки программирования, предназначенные для ввода музыкальной информации в машину, ее машинной обработки (например, анализа) и вывода результатов, а также для составления программ<sup>2</sup>. Анализ музыкальных произведений с помощью ЭВМ имеет целью выявить внутренние формальные (преимущественно статистические) связи элементов композиций; ведутся, например, работы по автоматизации музыковедческого анализа, сравнения музыкальных стилей и др.<sup>3</sup>

В рамках этого направления интересна задача определения параметров, которые при переходе от одного музыкального стиля (эпохи) к другому изменяются, а в пределах каждого стиля остаются неизменными или изменяются незначительно. Были найдены, например, музыкальные параметры, характеризующие развитие некоторых формальных качеств структуры западной музыки на протяжении последних пяти веков<sup>4</sup>. После установления аналогии между 12-тоновыми (додекафонными) системами и конечными группами (в математике) был построен алгоритм, который устанавливал, принадлежит ли некоторая одноголосная композиция, пред-

<sup>1</sup> И. Б. Гутцин. Кибернетические модели творчества. М., 1969.

<sup>2</sup> А. Моль, В. Фукс, М. Касслер. Искусство и ЭВМ (см. статьи М. Касслера). К этому направлению примыкают исследования по тематическому индексированию в области музыки — составлению каталога оригинальных мелодий, основанного на цитировании нескольких начальных нот, а также по автоматизации печатания музыкальных сочинений в виде общепринятых нотных текстов (Н. В. Lincoln. Uses of the Computer in Music Composition and Research. — «Advances in Computers», 1972, v. 12).

<sup>3</sup> См. В. К. Детловс. О статистическом анализе музыки. — «Латвийский математический ежегодник», вып. 3. Рига, 1968.

<sup>4</sup> А. Моль, В. Фукс, М. Касслер. Искусство и ЭВМ (см. помещенную в этой книге монографию В. Фукса).

ложенная машине в обычной музыкальной нотации, к классу этих систем или нет<sup>1</sup>.

Развиваются также работы по *звуквоспроизведению* на ЭВМ, снабженной звуковым выходом. Их цель — синтез тембров, имитирующих звучание как классических музыкальных инструментов, так и новых, не известных практике. Это, в частности, позволяет исследовать некоторые интересные вопросы психологии восприятия. Так, например, выяснилось, что причина утомляемости уха при прослушивании «электронных» звуков заключается в *излишне точной фиксации*, в неизменности частоты и амплитуды генераторов звука. Интонации человеческого голоса или классических музыкальных инструментов не обладают этим «дурным» свойством, так как во всех своих параметрах обнаруживают значительные — и притом случайные — отклонения, не выходящие, однако, за пределы некоторой области, «зоны» (по Н. А. Гарбузову).

К этому же направлению относятся опыты, связанные с «проблемой пианолы» — использованием ЭВМ со звуковым выходом для воспроизведения последовательности определенных звуков, предварительно записанных в виде нот на партитуре. Такие опыты основаны на следующей идее. Нотная запись музыкального произведения — это система указаний для музыканта, обозначающая прежде всего высоту, длительность и силу каждой ноты. Она также содержит указания о тембре (инструменте) и различные исполнительские или динамические указания. Иначе говоря, ноты — это алгоритм (программа) действий, которым музыкант руководствуется при исполнении. Следовательно, подобную программу (ноты) можно задать машине со звуковым выходом. Управляя работой цифро-звукового преобразователя, машина тем самым по соответствующей программе воспроизводит звуки, отвечающие записанным в числовом коде нотам, т. е. «играет» по нотам. Машина, таким образом, может воспроизводить многоголосное и много-тембровое звучание оркестра и может быть полезной композитору для прослушивания, скажем, черновых набросков симфонической музыки без привлечения симфонического оркестра. Интересно отметить, что если до сих пор исполнительские возможности известных музыкальных инструментов были ограничены физическими и механическими

<sup>1</sup> M. Kassler. The Decision of Arnold Schoenberg's Twelve-Noteclass System and Related Systems. Princeton, 1961.



факторами, то машина в качестве музыкального инструмента и исполнителя преодолевает такие ограничения<sup>1</sup>.

Наиболее интересным в рассматриваемом плане является машинный синтез музыкальных композиций с целью выявления (либо подтверждения наличия в них) скрытых закономерностей, которые в процессе сочинения человеком обычно используются неосознанно, интуитивно. Кроме того, за рубежом композиторы уже привлекают ЭВМ для создания новых музыкальных произведений, способных в каком-то смысле конкурировать с произведениями композиторов, сочиняющих без машины<sup>2</sup>. Поскольку эта музыка представляет собой структуру, с которой наша аудитория практически не знакома (додекафония, алеаторика и другая «авангардистская» музыка), такие эксперименты мы не будем принимать во внимание.

Известны два принципиально различных метода, в соответствии с которыми производится синтезирование музыкальных сочинений на ЭВМ.

Один метод основан на принципе локальной взаимосвязи звуков. В нем используются идеи теории марковских цепей, предложенной в 1913 г. А. А. Марковым (старшим) для исследования стихотворных текстов<sup>3</sup>. При этом предполагается, что количество соседних взаимосвязанных нот, зависящих друг от друга, статистически невелико, или иначе, каждая нота мелодии (точнее, высота или длительность ноты) зависит от  $n$  предыдущих нот и не зависит от предшествующих им. В опытах разных авторов количество  $n$  различно и принимает значения от 0 до 7.

Весьма привлекательный по форме, этот способ, однако, не дает (да и не может дать) хороших результатов, поскольку основан на принципе лишь локальной взаимосвязи звуков в мелодии: не учитываются важные специфические стороны музыки и связи между ними. Примерами таких сторон могут служить ладогармоническая, связанная с организацией устойчивых и неустойчивых звуков лада, и структурная, относящаяся к организации в мелодии повторности ритми-

<sup>1</sup> Следует, однако, заметить, что все работы в этой области находятся до сих пор на уровне механического воспроизведения нотной записи, к которой, разумеется, не сводится музыкальное исполнение.

<sup>2</sup> Y. Xenakis. Musiques formelles. «La Revue musicale». Paris, 1963; P. Barbaud. Initiation à la composition musicale automatique. Paris, 1968.

<sup>3</sup> См. А. А. Марков. Пример статистического исследования над текстом «Евгения Онегина», иллюстрирующий связь испытаний в цепь. — «Известия Императорской академии наук», 1913, № 3.

ческих и мелодических фигур, а также расчлененности мелодии на отдельные построения (предложения, фразы, мотивы). Закономерности, касающиеся этих сторон, способствуют при восприятии музыки усвоению различных интонаций и музыкальных тем. И эти закономерности являются более важными, более характерными для музыки, чем локальные связи.

Особенно наглядно все это проявляется в тех работах по моделированию музыки определенного стиля, где наряду с мелодиями, полученными машиной этим методом, приводятся для сравнения мелодии, взятые первоначально для анализа<sup>1</sup>. Самими этими работами подтверждается (разумеется, без намерения их авторов), что в мелодии практически взаимосвязаны определенной корреляционной зависимостью все ноты, а не только несколько соседних. Кроме того, «локальный» подход не выявляет взаимосвязи между различными элементами музыкальных сочинений и не позволяет обнаруживать наличие принципов, правил и закономерностей композиции.

Более перспективным представляется другой метод синтеза музыки, который условно можно назвать *структурным*. Он основан на программировании правил и закономерностей композиций, которые удалось выявить, изучая человеческое творчество, и формализовать. В опытах разных авторов этим методом синтезируется одnogолосная и многоголосная, тональная и атональная музыка.

## 2. ЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ХУДОЖЕСТВЕННОЙ КУЛЬТУРЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЗЫКАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

В процессе музыкального творчества, в сфере художественной культуры в целом человек оперирует понятиями и представлениями (образами), очень далекими от идеала логической строгости. Здесь затруднительно говорить о доказательствах или определениях (раскрытии содержания понятий), т. е. о средствах, которые в науке приводят к установлению логических (и смысловых) связей между суждениями и понятиями — структурируют научное знание, точнее, его крупные блоки. Не говоря уже о явлении распыленности понятий (см. предшествующие главы), здесь типичным является случай, когда некоторое понятие (идея,

<sup>1</sup> См. Р. Х. Закипов. Кибернетика и музыка.

образ)  $P$  не может быть выражено (определено) через другие, более «простые» понятия. Это создает своеобразную «иерархичность» мира понятий (представлений) творца и искусствоведа.

Это можно пояснить следующим образом. В сферах художественной культуры — в каждой из них, будь то музыка, графика или мультипликация, — имеются свои «элементарные», исходные (бесспорные, очевидные, однозначные) понятия, не нуждающиеся в определениях. Но конечно, в них есть гораздо больше *сложных*, неэлементарных понятий, идей, образов. Эти сложные понятия могут быть различными. Сложное понятие  $P_H$  может выражаться (или определяться) через такие другие понятия, каждое из которых в конце концов можно выразить через элементарные понятия; тогда естественно говорить, что  $P_H$  — это понятие «низшего» уровня «иерархии понятий». В этом случае между  $P_H$  и элементарными понятиями можно установить определенные смысловые связи.

Когда же сложное понятие  $P_B$  выражается через другие понятия, из которых *не все* выражимы через элементарные, то смысловые связи между  $P_B$  и элементарными понятиями неполны. Такое понятие  $P_B$  будет принадлежать к более «высокому» уровню. Практически это означает, что понятие  $P_B$  понимается с некоторой, возможно значительной, долей произвола. Каждый субъект (может быть, неосознанно) «достаивает» недостающую систему смысловых связей за счет своих индивидуальных ассоциаций. Вследствие этого одному и тому же слову (или знаку), обозначающему некоторое понятие, разные лица придают существенно различный смысл, так как у каждого субъекта свои ассоциативные связи.

«Высокие» уровни (определения) понятий распространены в системах знаний или деятельности, не использующих точные методы исследования (например, в традиционной психологии, музыковедении, литературоведении). «Высший уровень» — уровень «общих ассоциаций», когда понятия вообще не определяются, характерен для художественного творчества. Противоположный же ему — «низший» уровень определений принят в математике, особенно подвергшейся логической формализации (формальные определения понятий).

Разумеется, было бы странно стремиться во что бы то ни стало пользоваться «низшим» уровнем определений — для обычных потребностей естественные языки, используе-

мые на уровне «общих ассоциаций», вполне устраивают общество. Несмотря на неоднозначность, они имеют то преимущество, что не требуют громоздких построений, базирующихся на «низшем» уровне. Да и не всегда это возможно в силу самой природы системы знаний или деятельности.

Моделирование систем понятий позволяет проверять предположения о связях, в том числе чисто ассоциативных, в «высоких» уровнях и производить сведение понятий «высоких» уровней к более «низким». Однако при «ручном» моделировании (без использования ЭВМ) осуществлять такое сведение практически невозможно, и в результате могут быть внесены различные погрешности. Моделирование же с помощью ЭВМ устраняет влияние факторов субъективного характера, поскольку в данном случае оперируют только с понятиями, определяемыми на «низшем» уровне. При этом производится проверка адекватности моделируемого понятия (системы понятий) той «понятийной конструкции», которая воплощена в соответствующей программе ЭВМ и результатах ее работы.

Описанную ситуацию можно четко проследить на организации алгоритмов при «структурном» методе моделирования на ЭВМ некоторых функций композитора и музыковеда<sup>1</sup>. На основе этого метода уже составлены различные программы, по которым машина строит новые мелодии. Нотные записи некоторых из них представлены на стр. 337. Примечательно, что первая из мелодий совпала с мелодией известной песни И. О. Дунаевского «Молодежная», что подтверждает первоначальные предположения о закономерностях построения подобных музыкальных структур.

Для проведения экспериментов по моделированию различных видов творчества одним из наиболее важных является вопрос об организации программ. Основное назначение программы, по-видимому, не «серийное» производство машинных сочинений, а экспериментирование с целью ее совершенствования. Поэтому важно так организовать программу, чтобы с нею было удобно обращаться: легко вводить в нее изменения, формировать ее, управлять ею. Иначе говоря, программа должна быть настолько гибкой, чтобы с нею можно было проводить эксперименты самого разного рода (структура алгоритма это учитывает).

<sup>1</sup> См. Р. Х. Зарипов. Кибернетика и музыка.



Мелодии, «сочиненные» вычислительной машиной БЭСМ-6 ВЦ АН СССР по программе Р. Х. Зарипова.

В основу построения программ, моделирующих функции композитора и музыковеда, можно положить следующие принципы.

1. Выбор различных элементов композиции (нота, аккорд, тип структуры, закон случайного распределения длительностей или интервалов и т. п.) производится с помощью *датчика случайных чисел* посредством соответствующего способа кодирования.

2. *Синтезирование композиции* происходит так. Имеется набор запрограммированных правил композиции; датчик случайных чисел предлагает одну ноту за другой. Если нота удовлетворяет набору правил, то она помещается в нотную строку; в противном случае нота отбрасывается, и вместо нее предлагается другая. Так происходит до тех пор, пока не будет получена законченная композиция, которая и печатается машиной в закодированном виде.

3. Способ организации алгоритма основан на принципе *иерархичности различных понятий музыки*. Предварительно рассмотрим некоторые определения.

Любая музыкальная композиция как в синтаксическом, так и в семантическом отношении характеризуется некоторым набором *параметров*, отражающих правила, закономерности и элементы ее строения и развития (параметром может быть диапазон мелодии, тактовый размер, распределение частот интервалов, количество ступеней в октаве и др.). Каждый параметр принимает по нескольку значений. *Значение* параметра — это определенное число или числовая структура, конкретный закон распределения частот интервала, набор аккордов и т. п. из множества допустимых в программе. Под *типом* композиций понимается определенный признак, особенность или качество музыки, присущие некоторой совокупности композиций (стиль, жанр, эмоциональная направленность и т. п.). Типом может быть «танцевальная музыка», «вальс», «вальс Штрауса», «широта», «напевность», «вариационность» и др.

Если рассмотреть совокупность какого-нибудь типа композиций, то не все параметры в одинаковой мере его характеризуют. Один параметр будет в большинстве композиций принимать лишь одно — «существенное» — значение (*существенный* параметр). Пример существенного параметра в танцевальной музыке — тактовый размер (для вальса принимающий значение  $\frac{3}{4}$ , для чарльстона —  $\frac{4}{4}$ ); *несущественным* же параметром, например, для вальса является

исло нот затакта. Таким образом, существенные значения параметров — это необходимые (встречающиеся с большой вероятностью) признаки композиций данного типа.

Теперь рассмотрим способ, положенный в основу организации алгоритмов. Пусть  $p_1, p_2, \dots, p_k$  — упорядоченный конечный набор всевозможных параметров  $p_i$  ( $i = 1, \dots, k$ ). Моделирование типа  $T_c$  композиции основано на предположении, что любой тип (признак) композиции характеризуется определенным набором значений параметров  $M_c = \{p_{1c}^0, p_{2c}^0, \dots, p_{kc}^0\}$ , где  $p_{ic}^0$  — определенное значение параметра  $p_i$  из множества допустимых, причем если параметр несущественный, то по определению принимается, что он равен нулю. В результате качественной характеристики композиции (тип  $T_c$ ) ставится в соответствие характеристика формально-количественная (набор только значений *существенных* параметров  $M_c$ ).

В соответствии с этим для моделирования композиций определенного типа  $T_c$  в определенные ячейки машинной памяти засылаются некоторые числа — коды значений параметров, тем самым машине задается определенный перечень правил, которым должна подчиняться получаемая композиция. Указанными кодами автоматически «настраивается» или формируется программа. При этом из всех запрограммированных значений каждого параметра выбирается единственное — заданное. Если же значение какого-то несущественного параметра не было задано (т. е. соответствующее  $p_{ic}$  было положено равным нулю), то при формировании программы это значение выбирается из множества запрограммированных значений случайным образом — посредством датчика случайных чисел.

Отсюда видно, что в синтезировании очередной композиции участвуют не все запрограммированные правила, а лишь их часть. Эта часть и указывается набором  $M_c$ , определяющим тип  $T_c$  композиции. Программы, составленные на основе этого принципа, служат иллюстрацией того, как количество (набор значений параметров) переходит в качество (тип музыки).

Программы построены так, что вместе с машинной композицией печатается и перечень тех закономерностей, которые участвовали в ее сочинении, т. е. указывается ее *структура*. Это позволяет проводить различные психологические эксперименты, например по восприятию музыки. На основе этого метода можно найти зависимость между

структурой музыки и ее воздействием на эмоциональное состояние слушателя.

Этот метод может быть полезен и при анализе музыкальных сочинений, когда требуется восстановить механизм порождения композиций некоторого типа. В этом случае формальный анализ типа данной музыки заменяется формальным анализом синтезированной (машиной) музыки, близкой по типу к данной (метод «анализа-синтеза», или анализа посредством синтеза).

Иерархический принцип алгоритмизации в каком-то смысле похож на «алгоритм очевидности» для дедуктивных построений (см. предыдущую главу). Он позволяет моделировать понятия на разных уровнях сложности — как на «элементарном», так и на «глобальном» (моделирование иерархии понятий). Как уже говорилось, вместе с полученной композицией печатается и набор значений параметров. Поэтому всегда можно установить формальное соответствие некоторого «глобального» понятия, не предусмотренного заранее в программе, и совокупности элементарных запрограммированных понятий. Образование новых, более сложных понятий на «глобальном» уровне, выражаемых определенными «связками» (или отношениями элементов, ассоциативными связями), необходимо при рассмотрении различных задач. Так, при разработке проблемы общения человека и машины в области музыки одной из важных является задача автоматического перевода неспециальных терминов языка музыковедов, выражений обиходного, естественного языка «на уровне общих ассоциаций», которые в музыке имеют некоторый (часто интуитивный и не всегда однозначный) смысл, на язык строго определенных элементарных понятий музыки. Иначе говоря, это задача перевода выражений «высшего иерархического уровня» на язык более «низкого», формального уровня (моделирование «низшего» уровня определений).

Описанные выше принципы были положены в основу рассматриваемых далее алгоритмов, реализованных за ЭВМ<sup>1</sup>. Моделировалось *сочинение мелодий* в форме музыкального периода в мажоре или миноре. В соответствии с общими принципами строения мелодии организация звукового материала подчинена ритмической, звуковысотной, ладогармонической и структурной закономерностям.

<sup>1</sup> См. Р. Х. Зарипов. Кибернетика и музыка.



Выбор формы композиции (период длиной 8 или 16 тактов) обусловлен стремлением глубже исследовать закономерности мелодии, представляющей собой законченное музыкальное сочинение наименьшего объема<sup>1</sup>.

Было запрограммировано также сочинение *песенного ритма* — последовательности длительностей, определенным образом соответствующих некоторому стихотворному ритму (чередованию ударных и безударных слогов заданного стихотворения). Объединение этой программы с программой для сочинения мелодий позволяет моделировать песенные мелодии на заданный стихотворный ритм.

Следует также отметить программу для *гармонизации* заданной мелодии четырехголосными аккордами (трезвучиями и септаккордами в основном виде и их обращениями), которая имитирует решение учебных задач. При решении подобных задач в музыкальных учебных заведениях используются принципы и правила гармонизации, изложенные, в частности, в учебниках гармонии. Однако из-за отсутствия четких определений и конструктивных процедур выполнения процесса гармонизации он во многом протекает неосознанно, интуитивно. При программировании же необходимо вносится формальная ясность в логическую взаимосвязь различных элементов и средств гармонизации. Кроме того, решение задачи гармонизации не является однозначным, поэтому возникает проблема выбора оптимального (по некоторым критериям) решения.

На основе гармонизирующей программы была построена программа для *анализа* вводимых в машину решений задач по гармонизации мелодии или баса с целью отыскания в них ошибок (запрещенных или нежелательных последовательностей аккордов или голосоведения). При обнаружении ошибки (в частности, аккорда, бессмысленного с точки зрения программы) указывается ее характер и местоположение в композиции (путем выдачи на печать условных числовых кодов). Эта программа выполняет функции *экзаменатора* и служит прототипом соответствующей обучающей программы.

<sup>1</sup> Моделируется также сочинение одноголосных музыкальных вариаций на заданную тему — мелодию. См. Р. Х. Заринов. Об алгоритмизации музыкальных вариаций. — «Доклады АН СССР», 1973, т. 211, № 3; *его же*. Моделирование транспозиции инвариантных отношений и музыкальных вариаций на вычислительной машине. — «Кубernetika» (Praha), 1973, том 9, № 5.

### 3. МАШИННАЯ МУЗЫКА — СРЕДСТВО ИССЛЕДОВАНИЯ ТВОРЧЕСТВА

При исследовании и анализе творческих феноменов обычно возникают различные гипотезы, предположения о характере или структуре, о закономерностях изучаемого творческого процесса или его результатов — произведений «духовной культуры». Моделирование на ЭВМ — это метод подтверждения таких гипотез. Но при моделировании музыки на машине обязательно получается *машинная* музыка. В этом сущность данного вида моделирования. И получающиеся при этом машинные композиции являются как бы «отходами производства». Но это такие «отходы», о которых стоит поговорить особо.

Дело в том, что критерием качества и совершенства программы, по которой машина работает и сочиняет музыку, является *степень близости* машинной музыки к той человеческой, которая изучается исследователем. Здесь важно не абсолютное качество машинной музыки, а то, чтобы она была *очень похожа* на изучаемую. В этом смысле большая роль в исследовании закономерностей композиции и музыкального творчества принадлежит *машине-плаггиатору*, моделирующей сколь угодно точно указанные ей типы композиции: авторские стили, жанры, особенности народной музыки и т. п. Создание такой машины или, точнее, программы определило бы степень изученности творчества, тот его уровень, который машина на данном этапе в состоянии воспроизводить. И машинные композиции служат критерием того, насколько глубоко изучены и описаны формальным, объективным языком механизм творческой деятельности или ее продукты.

Однако здесь возникает *проблема оценки* машинных композиций и сравнения их с сочинениями композиторов. Композиции оцениваются в результате прослушивания, и поэтому оценка оказывается связанной с социально-психологическими особенностями людей, проявляющимися в подобного рода ситуациях. Человек не может «объективно» оценивать машинные композиции и сравнивать их с сочинениями композиторов, что вполне объяснимо психологически<sup>1</sup>. Поэтому для объективного сравнения музыки, сочиненной человеком и машиной, необходим специальный социопсихологический эксперимент. Цель его — преодо-

<sup>1</sup> См. Р. Х. Зарипов. Кибернетика и музыка.

леть психологическую установку (предвзятость) слушателей, поставить их в такие условия, чтобы они не знали, какое музыкальное сочинение оценивают в данный момент — машинное или человеческое. Кроме того, такой эксперимент должен дать и определенную объективную оценку машинных композиций сравнительно с человеческими, т. е. показать уровень их качества.

Какую же человеческую музыку следует брать для сравнения с машинной мелодией? Сравнивать надо композиции одинакового объема, одинаковой структуры, одинаковой синтаксической сложности (например, песенные мелодии, сочиненные композитором, с песенными машинными мелодиями).

Для эксперимента было выбрано восемь мелодий песен известных советских композиторов, взятых из опубликованных сборников избранных песен, и столько же мелодий, сочиненных машиной. Все эти мелодии проигрывались в произвольном порядке, не известном слушателям-экспертам. Последние каждую из мелодий оценивали по пятибалльной шкале и оценки записывали на бланках-протоколах. Чтобы исключить элементы случайности при оценке, такой эксперимент носил массовый характер — проводился в составе некоторой группы участников.

Было выбрано несколько различных социомузыкальных групп, в каждой из которых уровень музыкальной подготовленности участников был примерно одинаков («равнотезаурусные» группы). Это были студенты Московского энергетического института и Музыкально-педагогического института имени Гнесиных, участники заседания симпозиума «Проблемы художественного восприятия» по вопросам восприятия музыки, школьники старших классов, математики — участники методологического семинара Математического института и Вычислительного центра АН СССР, артисты Большого театра Союза ССР, работники предприятий культуры и др. Всего в экспериментах участвовало более 600 человек.

При обработке результатов эксперимента были получены различные характеристики и составлены соответствующие таблицы<sup>1</sup>. Как и во всяком конкретно-социологическом исследовании, субъективные оценки отдельных участников в этих массовых экспериментах объективизировались. Выводы из эксперимента делались на основе усредненных

<sup>1</sup> См. Р.-Х. Зарипов. Кибернетика и музыка.

оценок. Из рассмотрения отдельных протоколов выяснилось, что принятая методика проведения эксперимента позволила преодолеть психологическую предвзятость: слушатели не различали, где человеческое, а где машинное, хотя часто были уверены в обратном. В результате эксперимента выяснилось, что во всех группах машинные композиции получили по разным критериям более высокую оценку, чем мелодии композиторов<sup>1</sup>. Вот, например, как были оценены мелодии студентами Института им. Гнесиных (1) и участниками семинара Большого театра (2) (С — соответствующие средние оценки за 8 мелодий):

Оценка	5	4	3	2	1	С
1. Машина . . . . .	76	253	204	22	5	3,67
Композиторы . . .	61	213	247	31	8	3,51
2. Машина . . . . .	52	94	107	14	5	3,68
Композиторы . . .	28	105	121	14	4	3,51

Отсюда, конечно, не следует, что вообще машинные мелодии интереснее мелодий, сочиненных композиторами. Однако результаты этого эксперимента, проводимого многократно и с музыкально подготовленным составом участников, подтверждают, что при моделировании на ЭВМ *простых форм* музыкального творчества (мелодий, песен или танцев) получаются машинные результаты, соизмеримые с человеческими.

Каковы же перспективы вычислительных машин, сочиняющих музыку — и вообще современных ЭВМ — в сфере художественной культуры? Часто высказывается мнение, что машина способна лишь имитировать, «рабски» воспроизводить уже известные музыкальные структуры и авторские стили и не более того, — это только «хороший ремесленник», не способный создать ничего *нового, оригинального*.

Ошибочность такого мнения вытекает прежде всего из того, что не учитываются возможности некоторых классов программ, по которым работает машина. Используя опи-

<sup>1</sup> Этот эксперимент — своего рода реализация идеи А. Тьюринга об «игре в имитацию» применительно к музыке. См. А. Тьюринг. Может ли машина мыслить?

санный выше способ организации алгоритма, машина может «выйти за рамки» заданных правил.

Множество значений какого-то параметра, полученных заранее, может дополняться при синтезировании новыми значениями, не обнаруженными при анализе и, следовательно, не включенными в программу. Синтезированные композиции могут существенно отличаться от проанализированных и содержать закономерности, не предусмотренные заранее.

Рассмотрим простой пример параметра с такими множествами значений — первоначальными и дополненными, которые приводят к известным в музыкальной практике структурам. Предположим, что в результате анализа обнаружен параметр «тактовый размер» и найдены два его значения:  $\frac{2}{4}$  и  $\frac{4}{4}$ . Множество значений этого параметра, состоящее из двух элементов, можно дополнить, вообще говоря, любыми числами, например, такими, как  $\frac{3}{8}$ ,  $\frac{5}{8}$ ,  $\frac{6}{8}$ ,  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{7}{4}$  и т. п. Каждое из них имеет определенный смысл, образуя новую закономерность. Допустим, что наше множество значений при синтезировании каким-либо образом дополнено лишь одним значением  $\frac{3}{4}$  и состоит уже из трех элементов:  $\frac{2}{4}$ ,  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{4}{4}$ . Тогда синтезированные композиции также будут трех размеров:  $\frac{2}{4}$ ,  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{4}{4}$ . При этом существенно то, что заранее размер  $\frac{3}{4}$  не был выявлен и введен в программу; однако известно, что музыка на  $\frac{3}{4}$ , образуя новую структуру, при восприятии на слух существенно отличается по своему эмоциональному характеру от музыки на  $\frac{2}{4}$  или  $\frac{4}{4}$ , как, например, вальс от марша.

Отсюда видно, что к образованию новых синтаксических структур, а следовательно, новых правил и закономерностей, может привести лишь одно расширение множества значений первоначально заданных параметров. А параметры могут быть самые разнообразные: «количество нот затакта», «количество ступеней в октаве» и многие другие. Напомним, что для параметра «количество ступеней в октаве» значение 5 соответствует пентатонике (корейская, татарская, венгерская и другая музыка), 7 — диатонике (распространенная у нас музыка), 12 — атональной музыке, в частности додекафонии. А эти три типа структурной организации музыкальных звуков, как известно, при восприятии производят совершенно различный эффект.

Приведенные примеры показывают возможность (принципиальную и практическую) расширить множество классов композиций, взятое первоначально для анализа, даже

«в рамках правил», заданных заранее. Машина способна не только имитировать уже известные сочинения, но и создавать новые музыкальные структуры, стили, строи и тому подобные элементы музыки, т. е. она может «предвосхищать стили будущих композиторов».

Не рассматривая здесь подробно этого вопроса, подчеркнем только, что более важной и значительно более трудной задачей является не создание новых стилей, а *отбор перспективных стилей*. Кстати, подобная задача возникает и в других областях кибернетики, например, при оценке теорем<sup>1</sup>. И здесь мы подходим к той проблеме, которую условно можно назвать «проблемой шедевра», т. е. к проблеме создания таких произведений, которые намного переживают своих творцов. Но это уже не только кибернетическая проблема, ибо музыкальные шедевры отбираются не композиторами, а, говоря образно, временем.

<sup>1</sup> См. гл. I и II данной части книги.

## Глава IV

# КИБЕРНЕТИКА И МЫШЛЕНИЕ: ДИСКУССИИ И ПРОБЛЕМЫ

### 1. ДИСКУССИЯ «МАШИНА И МЫШЛЕНИЕ»

Известно, что развитие естествознания и наук о человеке все полнее раскрывает смысл материалистического тезиса о мышлении как функции мозга. Однако путь физиологии, эволюционной биологии, психологии в раскрытии «природы» мышления в некотором смысле уязвим, так как все эти науки исследуют мозг и его функционирование как то, что уже есть: берут его в «готовом», природой данным виде. Это оставляет возможность трактовки отношения мозга и мышления в духе психофизиологического параллелизма<sup>1</sup>.

Как всегда, судьей в вопросе о природе мышления выступает практика; главным здесь оказывается возможность воспроизведения исследуемого явления человеком и возможность использовать искусственно воссозданное явление в целеполагающей, практической деятельности. Это-то главное и отсутствует в современных нейропсихологических исследованиях. Кибернетика же открывает путь к его достижению, ибо уже то, что фактически сделано в кибернетическом моделировании интеллектуальных процессов, показывает, что целый ряд проявлений человеческого мышления в той или иной форме и степени искусственно воспроизводится кибернетическими устройствами.

Но вместе с конкретно-научным обоснованием материалистической концепции мышления кибернетика ставит вопрос, который вовлекает нас в пучину споров, — вопрос о возможности «искусственного разума», «машинного мышления», «воспроизведения функций мышления кибернети-

<sup>1</sup> Ср. образное рассуждение У. Джемса (*У. Джемс. Прагматизм. СПб., 1910*). Не оспаривая факты физиологии, говорящие о связи между процессами, которые осознаются субъектом как его мышление, и нейродинамическими процессами в мозге, он вместе с тем показывает, что с логической точки зрения эта связь не означает еще, что мозг есть орган мысли: данные физиологии свидетельствуют лишь о наличии соответствия между упомянутыми процессами. Подробнее об этой аргументации Джемса см.: *Л. Б. Баженев, И. Б. Гутчин. Интеллект и машина. М., 1973, стр. 5—6.*

ческими устройствами» и т. д. Здесь обнаруживается полный спектр взглядов — от крайне «оптимистических» до крайне «пессимистических». Сторонники последних категорически отвергают возможность машин, обладающих чем-то родственным мышлению человека. Нам представляется, что *на сегодня* не известны *принципиальные* преграды к созданию искусственных устройств, обладающих способностью «мышления» (точнее, ее аналогом), однако перед создателями «искусственного разума» стоят огромные трудности, и нынешнее развитие кибернетики не столько преодолевает, сколько выявляет их.

Проанализируем подробнее проблему возможности «искусственного разума». Аргументы против такой возможности, оперирующие имеющимися научными теориями и эмпирическими данными, могут быть названы «конкретными» аргументами. Обычно они состоят в указании каких-то конкретных функций мышления, которые не способны выполнить кибернетическое устройство. Однако такого рода аргументы один за другим опровергаются развитием кибернетики.

Конечно, не исключена возможность открытия *в будущем* некоего принципа невозможности реализации функций мышления системами, отличными по субстратной основе от головного мозга человека. Но такой принцип может быть сформулирован только как итог конкретных исследований. Если это произойдет, то будет раскрыта какая-то существенно новая черта реальности: установление принципа невозможности «кибернетического разума» было бы не менее революционным завоеванием науки, чем построение такого разума<sup>1</sup>.

В какой мере можно ожидать установления данного принципа наукой будущего? Принцип невозможности «кибернетического разума» жестко привязывал бы определенный род функционирования (мышление) к строго определенному, единственному субстрату (человеческому мозгу). Ряд исследователей склоняются в пользу этого принципа; они считают психические процессы специфической особенностью высокоразвитых белковых тел и видят в этом границу возможностей кибернетического моделирования интеллекта. Так, А. Н. Кочергин пишет: «Всякая попытка дать определение мышления без учета структуры и субстрата

<sup>1</sup> Ср. Г. Н. Поваров. Предисловие редактора перевода. — Э. Беркли. Символическая логика и разумные машины. М., 1961, стр. 12.



мыслящей системы, на основе которых оно сформировалось, есть сведение мышления лишь к его информационной стороне. Но информационные процессы могут осуществляться на различной материальной основе»<sup>1</sup>. И далее: «...здесь (в кибернетических устройствах.— *Авт.*) функция не вырастает «изнутри» субстрата системы под влиянием социальной среды, а искусственно «привязывается» человеком к определенной структуре»<sup>2</sup>.

Однако эта позиция по существу представляет собой лишь гипотезу. Другие ученые считают теоретически возможным развитие биологических и психических процессов на иной материальной основе, тем более в условиях целенаправленного вмешательства человека, воплощающего в себе уже существующее социальное начало. Подобная точка зрения была выражена, например, А. Н. Колмогоровым: «В век космонавтики возникает реальная возможность встречи с «формами движения материи» ... обладающими основными практически важными для нас свойствами живых и даже мыслящих существ, устроенных иначе... Если свойство той или иной материальной системы «быть живой» или обладать способностью «мыслить» будет определено чисто функциональным образом (например, любая материальная система, с которой можно разумно обсуждать проблемы современной науки и литературы, будет признаваться мыслящей), то придется признать в принципе вполне осуществимым *искусственное создание живых и мыслящих существ*»<sup>3</sup>.

Проблема слишком сложна для того, чтобы ее можно было решить немногими общими рассуждениями. Окончательный ответ здесь могут дать лишь систематические теоретические и экспериментальные исследования.

Разумеется, мышление, сознание представляет собой феномен высокоорганизованной системы и определено ее структурой. Но с гносеологической точки зрения не знание функций вырастает из знания структуры, а, наоборот, знание структуры возникает в результате все более полного изучения способов функционирования; «поведение», т. е. по существу движение, гносеологически первично по отношению к «субстрату»: познание субстрата не содержит ничего иного, кроме непрерывно расширяющегося изуче-

<sup>1</sup> А. Н. Кочергин. Моделирование мышления. М., 1969, стр. 61.

<sup>2</sup> Там же, стр. 78.

<sup>3</sup> А. Колмогоров. Автоматы и жизнь. — «Кибернетика ожидаемая и кибернетика неожиданная». М., 1968, стр. 12—13.

ния способов поведения объектов: «лишь в движении тело обнаруживает, что оно есть... Познание различных форм движения и есть познание тел»<sup>1</sup>. Сказанное не означает, что существует «только движение» (такое заключение в противоположность метафизическому субстанционализму было сделано столь же метафизическим релятивизмом); оно означает лишь утверждение о неправомерности вообще употребления противопоставления «первичности — вторичности» для характеристики отношения движения (поведения) к субстрата в онтологическом аспекте.

## 2. ПРОБЛЕМА

### «ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА»

### НА РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ АБСТРАКЦИИ

Практика современной жизни выдвигает ряд проблем чрезвычайной сложности, решать которые нередко необходимо в глобальном масштабе. К такого рода задачам относится экологическая проблематика. Еще В. И. Вернадский говорил о том, что человек становится крупнейшей геологической силой, изменяющей лицо нашей планеты. При этом он отмечал, что биосфера изменяется человеком сознательно лишь в небольшой степени, что человеческое воздействие на природу носит главным образом неосознаваемый характер<sup>2</sup>. Развитие кибернетики в значительной мере вызвано насущной необходимостью резко увеличить долю сознательного, целенаправленного, разумного, оптимизированного в воздействиях на окружающий нас мир. В этой связи автоматизация интеллектуальных процессов — хотя бы частичная — становится острой потребностью, поскольку масштабы и темпы процессов, которыми должен управлять человек, все более выходят за границы «естественных» возможностей разума.

Есть и другие факторы, непреложно вызывающие к жизни кибернетические «усилители интеллекта». Экстраполируя на обозримое будущее сегодняшние тенденции развития общества, можно прийти к парадоксальным выводам. Например, количество людей, профессионально занимающихся научной деятельностью, растет столь стремительно, что если так пойдет дело, то к концу века все

<sup>1</sup> К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. 33, стр. 67—68.

<sup>2</sup> См. В. И. Вернадский. Химическое строение биосферы и ее окружения. М., 1965.

население Земли будет заниматься только наукой... Нереальность этой и других аналогичных экстраполяций приводит к выводу: тенденции развития должны в ближайшие десятилетия измениться. Если еще сегодня они описываются кривыми экспоненциального типа (т. е. задаются показательными функциями вида  $e^x$  или  $a^x$ ), то в будущем неизбежен переход их в  $s$ -образные кривые логистического типа. Переход этот может быть чреват негативными последствиями, и, только передавая искусственным усилителям разума всевозрастающую часть интеллектуального труда, можно будет безболезненно «соскочить» с экспоненты. Системы «искусственного интеллекта», таким образом, необходимы для цивилизации.

Проблема соотношения человека и машины, «интеллекта естественного» и «интеллекта искусственного» может рассматриваться на следующих трех основных уровнях. Первым из них является уровень принципиальной возможности или, иначе, потенциальной осуществимости. На этом уровне проблема должна решаться исключительно исходя из имеющихся на сегодня знаний фундаментальных законов природы безотносительно к каким бы то ни было техническим возможностям. Если уже познанные нами фундаментальные законы природы таковы, что они не противоречат осуществлению того или иного проекта, необходимо признать его принципиально реализуемым. Другое дело — что не все то, что принципиально реализуемо, является реализуемым технически хотя бы в силу ограниченности наших возможностей в пространстве, времени и материалах.

На втором уровне — на уровне *технологической осуществимости* — выясняется, можно ли реально осуществить данный конкретный проект, причем именно при существующем состоянии науки и техники. Наконец, третьим из уровней является уровень *практической целесообразности*. Переходить к серьезному обсуждению проблемы «искусственного интеллекта» на этом уровне стоит только в том случае, если она получает положительное решение на предшествующих.

Сейчас нет никаких оснований утверждать, что на первом уровне проблема «искусственного интеллекта» неразрешима. Скорее наоборот: тезис Мак-Каллока — Питтса естественно истолковать в пользу отсутствия ограничений на «искусственный интеллект». Ибо тезис этот утверждает, что любая функция естественной нервной системы, которая может быть описана на некотором логическом языке при

помощи конечного числа слов, может быть реализована формальной нервной сетью. Этот тезис — одно из оснований, на котором покоится *основной эносеологический результат кибернетики*: любая строго очерченная и точно описанная (формализованная, конструктивизированная и т. п.) область мыслительной деятельности человека в принципе может быть алгоритмически описана и, следовательно, воспроизведена машиной<sup>1</sup>.

Что касается второго уровня, то речь здесь идет о конкретных путях развития работ по «искусственному интеллекту». Мы уже говорили об этом. Здесь мы обсудим только вопрос об определениях основных понятий.

Сделать это не просто: крайне трудно (если не невозможно) всем нужным терминам дать определение «до конца». Поэтому, быть может, лучше стремиться к тому, чтобы соответствующие определения строились как некоторый итог исследования, а не его исходный пункт.

Если обратиться к интуитивным представлениям об интеллекте, зафиксированным в словарях и энциклопедиях, мы увидим, что *интеллект* — это синоним (или почти синоним) слов «ум», «мышление», «сознание». В словаре современного русского литературного языка (т. 5. М., 1956, стр. 386) указывается, что интеллект — «мыслительная способность, ум, рассудок, разум», в толковом словаре под ред. С. И. Ожегова (изд. 9. М., 1972, стр. 232) — «мыслительная способность, умственное начало у человека», в толковом словаре русского языка под ред. Д. Н. Ушакова (т. 1. М., 1935, стр. 144) — «ум, рассудок, мыслительная способность у человека (в противоположность воле и чувствам)». В БСЭ (изд. 2, т. 18. М., 1953, стр. 270) мы читаем: «Интеллект — ... в широком смысле вся познавательная деятельность человека, в узком смысле — процессы мышления, неразрывно связанные с языком...» Наконец, в третьем издании БСЭ интеллект определяется как способность мышления, рационального познания, в отличие от таких способностей, как чувство, воля, интуиция, воображение и т. п.; термин «интеллект», говорится там, представляет собой латинский перевод древнегреческого понятия «*нус*» (ум) и по своему смыслу тождествен ему.

Трудно дать определение и такому чрезвычайно емкому и сложному понятию, каким является *творчество*. Счи-

<sup>1</sup> Ср. Б. В. Бирюков. Машина и мышление (три принципа). — «Художественное и научное творчество». Л., 1972, стр. 255 и далее.

тается общепризнанным, что творчество — это деятельность человека, создающая новые материальные и духовные ценности, имеющие общественную значимость.

Кибернетике нечего делать с этими определениями. Приходится, не требуя точных определений «интеллекта» или «творчества», тем не менее пытаться искусственно воспроизвести определенные их проявления; приходится жертвовать «окончательными», «абсолютно точными», «исчерпывающими» определениями ради сугубо приблизительных, временных, но зато рабочих определений, из которых можно исходить в экспериментах. Так возникает подход, при котором разумно сочетается интуитивное понимание интеллекта и творчества с попытками сформировать определения, строгость которых может возрастать по мере прогресса в моделировании и автоматизации познавательных и творческих процессов.

Одно из рабочих определений интеллекта гласит<sup>1</sup>: это способность любого организма (или устройства) достигать некоторой измеримой степени успеха при поиске одной из многих возможных целей в обширном многообразии сред. При этом подходе от интеллекта отличают *знания*, понимая под последними полезную информацию, накопленную индивидом. Интеллект — это не «статические» знания, а способность его носителя предсказывать состояния внешней среды в сочетании с умением преобразовывать каждое предсказание в реакцию, ведущую к заданной цели.

Разумеется, это определение весьма ограничено. Увы, здесь полностью сказывается жизненность афоризма: «Определить — значит ограничить». Но характер ограничения здесь таков, что позволяет надеяться построить широкий класс автоматов, обладающих интеллектом в указанном смысле, в целях решения разнообразных задач практики.

М. Минский, определяя интеллект, пишет: «С моей точки зрения, это скорее вопрос эстетики или самолюбия, чем науки и техники! Для меня «интеллект» означает едва ли больше, чем комплекс активности, который мы уважаем, но не понимаем»<sup>2</sup>. Он же в другой работе связывает понятие интеллектуальности системы со степенью непонимания наблюдателем того, как она решает задачи. Например, если доказательство теоремы ясно до

<sup>1</sup> См. Л. Фогель, А. Оуэнс, М. Уолш. Искусственный интеллект и эволюционное моделирование.

<sup>2</sup> М. Минский. На пути к созданию искусственного разума. — «Вычислительные машины и мышление», стр. 453.

конца, то излишне говорить о ее «глубине» и приписывать процессу ее получения такое «мистическое» свойство, как интеллектуальность. «Вместе с пониманием приходит и ощущение потери»<sup>1</sup>, — пишет Минский.

По-разному даются определения и «искусственному интеллекту». Л. Фогель, А. Оуэнс, М. Уолш полагают, что о реализации «искусственного интеллекта» можно говорить только лишь тогда, когда автомат начнет решать задачи, непосильные для человека; причем сделает это не вследствие быстроедействия, а в результате нахождения новых методов решения. Однако это довольно жесткое определение. Оно напоминает о выдвигаемых иногда таких требованиях к подобного рода автоматам, которые выходят за рамки не только целесообразности, но и здравого смысла. Например, некоторые композиторы не признают «машинной музыки» на том основании, что образцы «творчества машин» не достигли уровня творений Чайковского или Моцарта; при этом забывают, что, по-видимому, и не все из ныне живущих и творящих композиторов достигли этого уровня.

Вряд ли стоит предъявлять к «искусственному интеллекту» столь жесткие и категорические требования; на нынешнем начальном этапе исследований по моделированию и «усилению» интеллекта естественно ограничиваться целью — получать результаты, соизмеримые с «достаточно простыми» формами работы мышления человека.

Впрочем, и для творческих форм умственного труда такой подход оправдан. Например, в эвристическом программировании «творчество» выступает как отбрасывание вариантов. Но разве не так понимал творчество великий Микеланджело? В своем 65-м сонете как воплощение творчества он рассматривал глыбу мрамора: удалив из глыбы все «лишнее», можно получить конкретное произведение искусства.

В нем гроз концентраты. В нем тела изгибы.  
В нем вся Красота, все Уродство. Сполна  
Спрессовано Творчество в мраморной глыбе,  
Все громы, порывы и вся тишина.  
Но если художники все же смогли бы  
В свой собственный замысел вникнуть до дна,  
Бог смертною мукой венчал бы их: ибо  
Ему середина совсем не нужна.

<sup>1</sup> М. Минский. Проблемы в области «искусственного интеллекта». — «Математические проблемы в биологии». М., 1966, стр. 78.

Проходят века, ну а мрамор — нетленный...  
И нужно, вникая в Начало Начал,  
Безумному Гению вскрыть себе вены,  
Чтоб в мраморе Гений его прозвучал.

А мрамор погибшему жаждет замены,  
И нет ничего, что бы он не включал.

Перевод О. Ивинской

При помощи эвристических методов человек пытается автоматизировать процесс извлечения некоего Произведения из Хаоса, не прибегая при этом к перебору возможных вариантов так, как это происходит при решении задач методом проб и ошибок. Правда, это достижение (как и любое другое) требует определенной «платы». В данном случае такой «платой» является некоторая отличная от нуля вероятность упустить наилучшее (оптимальное) — или попросту удовлетворительное — решение; об эвристике можно сказать, что она предлагает решения, которые в большинстве случаев оказываются достаточно хорошими.

Важно при этом, что, пользуясь методом «поощрения» удачных решений и «наказания» неудачных, эвристическую программу можно сделать обучающейся, совершенствующейся и находящей новые методы решений. В результате этого при решении конкретных интеллектуальных задач машина сможет превзойти своего программиста. Это и не удивительно: «Утверждать сегодня, будто бы автомат способен к самостоятельным действиям, — это все равно, что сказать: «ни один человек никогда не создаст ничего нового, так как все его действия предопределены комбинацией генов, полученных от отца и матери»<sup>1</sup>.

Таким образом, мы имеем существенные основания полагать, что машина способна порождать *новое*. «Старое изречение, что «машина никогда не знает больше программиста», уже оказывается просто неверным»<sup>2</sup>. Это имеет принципиальное значение, ибо открывает развитию «искусственного интеллекта» далеко идущие возможности; не противоречит это и житейской практике: хорошо известно, что ученик часто превосходит своего учителя, спортсменов, устанавливаю-

<sup>1</sup> Е. С. Венцель. Спор «Машина и творчество». — «Методологические проблемы кибернетики», т. 2, стр. 115; см. также И. Б. Гуткин. Кибернетические модели творчества.

<sup>2</sup> Л. Фогель, А. Оуэнс, М. Уолш. Искусственный интеллект и эволюционное моделирование, стр. 161.

щий мировой рекорд, воспитывается тренером, к таким достижениям не способным, и т. д.

Таким образом, если задаваться вопросом о «верхнем пределе искусственного интеллекта», то ответ надо искать не в словесных диспутах, а прежде всего в преодолении трудностей, связанных с быстродействием вычислительных систем, объемом их памяти, размерами и т. п. и особенно программированием. Очень сложным выглядит вопрос о возможности создания систем, способных к самостоятельной постановке целей. В работе Л. Фогеля и других высказывается убеждение в принципиальной возможности построения систем, способных к проявлению черт самосознания, тенденций к самосохранению и, следовательно, к постановке своих собственных целей. Основой этого должен явиться механизм построения системой идеальных внутренних моделей «самой себя» и внешнего окружения; всякая реакция вовне должна явиться следствием многократной и всесторонней «проработки» ситуации на этих внутренних моделях. Реализация этих процессов самоорганизации на вычислительных системах и приведет со временем, по-видимому, к созданию «подлинного искусственного интеллекта». Это будет важнейший шаг в том «отодвигании» границы между потенциально и реально осуществимым, которая всегда будет существовать в проблеме «машина и мышление».

### 3. О НЕКОТОРЫХ ФИЛОСОФСКИХ ВОПРОСАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЫШЛЕНИЯ

В настоящее время ряд исследователей (в нашей стране, например, В. В. Налимов, В. М. Глушков и др.) выдвигают принципиальный вопрос о статусе научного закона в его сопоставлении с моделью. Термин «модель» очень многозначен, но при всем том четко выделяется аспект, связанный с определенным противопоставлением модели и моделирования естественнонаучному закону. В. В. Налимов один из разделов своей книги «Теория эксперимента» так и озаглавил: «Модель вместо закона».

Закон претендует на точное (конечно, в рамках данного уровня строгости, данного аспекта рассмотрения и т. д.) описание явлений. Он либо верен, либо неверен — нет смысла говорить о хороших и плохих законах. Модель в этом отношении не похожа на закон. Она может быть плохой или хорошей, она не претендует на точное воспроизведение «всей» сложной си-



стемы, ограничиваясь отображением отдельных ее сторон, причем для одной и той же стороны, «среза» системы могут быть построены разные модели, одновременно имеющие право на существование<sup>1</sup>.

Все это не значит, что понятие закона теряет значение в науке; это означает, что дополнительно к ранее известным интеллектуальным орудиям (строгой дедукции и эксперименту) родилось новое орудие — *математическое моделирование*, в котором математика играет уже иную роль (происходит «снижение требований, предъявляемых к математическому мышлению, замена закона моделью»<sup>2</sup>) и которое использует новый вид эксперимента — машинный эксперимент.

К теориям и моделям в науке возможны три подхода. Первый состоит в «волевом» акте построения некой конструкции, признание которой есть по существу акт веры. Второй, «систематический» подход это есть во многом классический путь науки нового времени: сначала полное выяснение «внутренней сущности», затем построение «точной картины» изучаемой области и лишь затем построение ее модели. Модель в этом случае может быть полезна для уточнения, практического использования, но она не играет фундаментальной роли. Наконец, третий подход — кибернетический, широко использующий *математическое моделирование*.

Проблема создания «искусственного разума» вряд ли разрешима на путях классического, «систематического» подхода к ней сначала познать «сущность» естественного разума (установить законы, определяющие его функционирование), а затем осуществить построение возможно более точной его копии. Путь, который предлагает кибернетика, — в определенном смысле противоположен классическому. Он состоит в построении эскизных моделей, описывающих отдельные стороны мышления, в «воспроизведении» определенных феноменов нейродинамики и психики; продвижение в этом направлении приводит к системам, поведение которых постепенно приближается — по некоторым параметрам, во всяком случае — к картине функционирования человеческого мозга.

Здесь, однако, возникает вопрос: может ли кибернетическая машина, занятая обработкой информации и дающая сходные с человеческим мозгом результаты, в принципе

<sup>1</sup> См. В. В. Налимов. Теория эксперимента. М., 1971, стр. 13.

<sup>2</sup> Там же, стр. 14.

притязать на характеристику «мыслящей», «разумной» и т. д.? Может ли сходство результатов быть достаточным основанием для заключения о сходстве внутренних процессов, которые приводят к этим результатам?

Нет недостатка в попытках отрицательного ответа на эти вопросы. Иногда такой ответ высказывается с непреклонной верой в его само собой разумеющуюся очевидность и, следовательно, без какой-либо аргументации (кроме разве ссылок на высокое достоинство человека, которого просто «безнравственно» сравнивать с машиной), иногда же этот ответ пытаются аргументировать. Один из вариантов такой аргументации состоит в ссылке на особенности информационного моделирования. Утверждается, что кибернетические устройства в принципе способны сколь угодно полно моделировать мышление, но это будет лишь «информационная модель» мышления, и она так же не будет обладать чем-то похожим на мышление, как, скажем, информационная модель поведения самолета не будет летать. На это утверждение следует простой ответ. Тезис о том, что моделирование мышления на ЭВМ есть моделирование в информационном плане и, следовательно, информационная модель мышления так же не мыслит, как информационная модель самолета не летает, основан на том, что не учитывается различие моделирования *информационных* и *неинформационных* процессов. Моделирование первых (в отличие от моделирования вторых) в информационном плане может оказаться *функционально полным*. Если информационная модель мышления дает *те же результаты*, что и само мышление, то здесь теряет смысл различие воспроизведения в информационном плане и «реального» воспроизведения.

Почему же именно так? Ведь можно привести десятки примеров, когда одни и те же результаты достигаются с помощью различных внутренних процессов. Ответ состоит в том, что в обсуждаемой проблеме речь идет о сходстве результатов в любой потенциально безграничной области. Именно эта потенциальная безграничность делает философски несостоятельным рассуждение о том, что аналогия результатов не есть основание для аналогии внутренних процессов, к ним приводящим.

В самом деле, с одной стороны, утверждается, что сходны лишь результаты работы машины и человеческого мозга, внутренние же процессы совершенно различны (чисто физические в первом случае, мышление — во втором). С другой стороны, признается, что любое проявление мыш-

ления может быть в принципе промоделировано на универсальной вычислительной машине. Соединение этих двух утверждений приводит к выводу, что сходство результатов работы кибернетического устройства и мозга даже в потенциально безграничной области все равно не позволяет заключить о сходстве процессов, ведущих к этим результатам. Но это означает, что мышление как внутренний процесс деятельности мозга отрывается от своих проявлений в поведении, превращается в таинственное, неуловимое «нечто».

#### 4. ФИЛОСОФСКОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ: КИБЕРНЕТИКА И ЧЕЛОВЕЧЕСКОЕ ДОСТОИНСТВО

Никакие «облегченные» требования к «качеству» «искусственного интеллекта» не снимают вопроса, который беспокоит многих: а не скрывается ли за задачей создания кибернетических «усилителей умственных возможностей» человека стремление заменить людей роботами?

По нашему убеждению, многие споры вокруг этого вопроса — как и вокруг проблемы «кибернетики и мышление» вообще — имеют не столько научную, сколько эмоциональную подоплеку. Признание возможности «искусственного разума» представляется чем-то унижающим достоинство человека. Особенно резко, откровенно, патетически эта точка зрения выражена Э. В. Ильенковым. Отождествляя возможность «искусственного разума» с рассмотрением человека как машины, вещи, он пишет: «...нет большей безнравственности, чем смотреть на человека как на вещь. Что из того, что такой человек — я сам? Тем нелепее и гнуснее»<sup>1</sup>.

Однако кибернетика и открываемые ею перспективы создания аппаратов «искусственного разума» так же мало покушаются на честь и достоинство человека, как и великие научные открытия прошлого. Появление кибернетики и начало работ по системам, моделирующим и автоматизирующим интеллектуально-творческие процессы, — это еще один новый и необходимый шаг на пути отказа от мнимой чести и достоинства человека, на пути понимания *действительного места* человека в реальном мире.

<sup>1</sup> Э. В. Ильенков. Об идолах и идеалах. М., 1968, стр. 282.

Н. Винер, ряд советских и зарубежных специалистов (И. А. Полетаев, Н. М. Амосов, Л. Фогель и др.) неоднократно предупреждали, что, чем большим интеллектуальным потенциалом наделяется машина, тем больше у нее возможностей принимать самостоятельное решение. А это значит, что становится сложнее управление машиной, что возрастает ответственность человека за ее правильное, социально полезное применение. «Вычислительная машина,— сказал Винер в последнем интервью,— ценна ровно настолько, насколько ценен использующий ее человек»<sup>1</sup>.

Эту четкую и достаточно убедительную постановку проблемы иногда обостряют. Утверждают, например, что использование «искусственного интеллекта» для получения творческих результатов может привести к ослаблению стимулов творчества у человека; что число людей, не желающих искать решения таких проблем, с которыми эффективно справляется машина, возможно, со временем начнет прогрессивно возрастать, и т. п. Думается, однако, что эти опасения неосновательны. Ведь никого из творчески одаренных людей не останавливает тот факт, что одновременно с ними трудится множество их коллег, быть может более талантливых и результативных.

Если машина, моделируя среду и самое себя, проявит творческие возможности, получит нечто вроде самосознания и способности избирать цели поведения, то не узурпирует ли она исконное право человека самому ставить задачи перед орудиями своего труда? Не приведет ли процесс самоусовершенствования работы машин в конечном итоге к полному пренебрежению ими целями создавшего их человека?

Машины, работающие по эволюционирующим программам, уже сейчас научаются повышать по заданному критерию эффективность своей работы. Вряд ли можно сомневаться в том, что в обозримом будущем они смогут осуществлять целенаправленный поиск и принимать решения, близкие к оптимальным, без вмешательства человека. Не снимут ли с человека со временем такие машины ответственность за принятие решений? Не представляет ли это угрозу самому существованию такой способности у человека?

Эти вопросы заслуживают трезвого рассмотрения. Уже сейчас существуют автоматизированные системы управле-

---

<sup>1</sup> Н. Винер. Машины изобретательнее людей? — *Его же*. Кибернетика, стр. 310; ср. А. Тьюринг. Может ли машина мыслить?

ния, вырабатывающие некоторые элементарные решения; но эти решения поступают на пульт руководителя, который может их видоизменить или вовсе отменить, приняв иное решение; однако, если по прошествии некоторого заранее фиксированного времени руководитель не вмешается в машинное решение, оно автоматически поступает на исполнение. Так как машина принимает решение на основе учета множества параметров и анализа сложнейших взаимосвязей между ними, то по мере совершенствования самообучающихся машинных программ руководитель, возможно, будет все реже и реже вмешиваться в машинные решения, хотя ответственность всегда будет лежать на человеке-руководителе, который может изменить или отменить решение, но фактическая его отработка может действительно в значительной мере перейти в руки «интеллектуальной машины».

Было бы неразумно закрывать глаза на опасности «искусственного интеллекта» на том основании, что человек будто бы всегда сумеет своевременно заметить угрозу и «выключить рубильник». Дело в том, что *вовремя заметить опасность* не так просто, ибо уже в наши дни человек отстает от машины по быстрдействию и пропускной способности; что надо *захотеть* выключить рубильник в условиях, когда это может вызвать много бед (если машина, например, находится на ответственном участке планирования или управления); что, наконец, надо *суметь* выключить рубильник, — вопреки «воле» машины, которая, если она действительно «разумна», будет убеждать человека в бесполезности (или вредности) такого шага. Остроту ситуации нагляднее других выразил И. А. Полетаев: «Невозможно выключить «рубильник науки». Нельзя прекратить исследования генетического анализа и синтеза, невозможно не полететь на Луну, нельзя закрыть Америку. Если человек может открыть Америку, полететь на Луну, синтезировать живое существо, построить механическое чудовище, он непременно и неизбежно все это сделает, даже если его не побуждает к этому прямая нужда»<sup>1</sup>. Такова логика человеческого познания, такова психология человека.

Дать исчерпывающий анализ возможных последствий «искусственного интеллекта» пока нельзя. И уж во всяком случае не существует единого — философского или техни-

<sup>1</sup> И. А. Полетаев. «Трудный период» кибернетики и американские роботы. Предисловие. — «Человеческие способности машин».

ческого — решения, которое навеки застраховало бы человечество от любых нежелательных результатов работ в области моделирования и автоматизации интеллектуально-творческих процессов. Более важным является, однако, то, что работы эти открывают перед человеком огромные позитивные возможности, включая, быть может, преобразование самого естественного разума. В научной литературе уже высказывались гипотезы, что конечным итогом раскрытия «тайны жизни и мысли» будет не создание новых Франкенштейнов, ужасных соперников своих творцов, а наделение человека новыми силами и способностями, усовершенствование его физической природы<sup>1</sup>. В целом очевидно, что проблематика «искусственного интеллекта» заслуживает самого тщательного — и специально-научного, и философско-методологического, и морально-этического — рассмотрения.

Касаясь проблемы детерминизма и свободы человеческого поведения (проблема в социально-нравственно-эмоциональном и т. д. аспекте, имеющая много общего с проблемой «искусственного интеллекта»), В. И. Ленин писал: «Идея детерминизма, устанавливая необходимость человеческих поступков, отвергая вздорную побасенку о свободе воли, нимало не уничтожает ни разума, ни совести человека, ни оценки его действий. Совсем напротив, только при детерминистическом взгляде и возможна строгая и правильная оценка, а не сваливание чего угодно на свободную волю»<sup>2</sup>.

Перефразируя эти слова, мы хотим заключить: идея «искусственного интеллекта», устанавливая возможность наличия мышления у особым образом организованных материальных систем, отвергая вздорную побасенку о «волшебных свойствах человеческого мозга» (выражение Эшби), нимало не уничтожает ни чести, ни достоинства человека. Напротив, только при кибернетическом взгляде и возможна строгая и правильная оценка действительной мощи человека, который во все большей степени будет окружать себя «усилителями умственных способностей».

<sup>1</sup> См. гл. IV второй части данной книги.

<sup>2</sup> В. И. Ленин, Полн. собр. соч., т. 1, стр. 159.

## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аккерман В. 102  
 Акофф Р. Л. 99  
 Алеев Л. С. 18, 21  
 Амосов Н. М. 283, 288, 360  
 Ампер 14  
 Ануфриев Ф. В. 302  
 Аптер М. 169  
 Арбиб М. 68, 110  
 Аристотель 25  
 Афанасьев В. Г. 99, 131, 177  
  
 Баженов Л. Б. 4, 347  
 Банерджи Р. 293  
 Бар-Хиллел И. 196—214, 225, 231  
 Бейес 217  
 Бейтсон Г. 88  
 Берг А. И. 3, 4, 9, 43, 72, 98, 127, 284  
 Беркли Э. 348  
 Бернал Дж. 171  
 Берталанфи Л. фон 67, 69, 98  
 Бехтерева Н. П. 239—241  
 Бигелоу Дж. 283  
 Бир Ст. 125, 132  
 Биркгоф Г. 82  
 Бирюков Б. В. 3, 4, 15, 16, 43, 55, 72, 89, 92, 93, 176, 177, 186, 211, 226, 253, 256, 269, 351  
 Блауберг И. В. 98, 137  
 Блюменфельд Л. А. 100  
 Бойко Е. И. 264  
 Бонгард М. М. 227, 229  
 Бор Н. 59, 217  
 Борель Э. 169  
 Ботвинник М. М. 288  
 Браге Тихо де 25  
 Брайнес С. Н. 286  
 Бриллюэн Л. 167, 183, 196  
 Бродский И. Н. 83  
 Будбаева С. П. 228, 230  
 Будников В. С. 4, 260  
  
 Букановский В. М. 47  
 Буль Дж. 211  
 Бурбаки Н. 57, 102, 307, 308  
 Бусленко Н. П. 68, 99, 110, 122  
 Бутковский А. Г. 128, 129  
 Вэббедж Ч. 281  
  
 Ван Хао 289, 290, 316  
 Вацуро Э. Г. 164  
 Веденов М. Ф. 127  
 Вейзенбаум Дж. 295  
 Вейль Г. 57, 177  
 Вейн А. М. 194  
 Веккер Л. М. 66  
 Велигжанин В. А. 281  
 Вентцель Е. С. 121, 355  
 Вернадский В. И. 350  
 Винер Н. 14, 96, 102, 109, 126, 167—169, 172, 175, 183, 234, 282, 283, 291, 360  
 Войшвилло Е. К. 205—211, 226  
 Воробьев Н. Н. 3, 30  
  
 Гаазе-Рапопорт М. Г. 3, 67, 100, 106, 108, 125, 283  
 Галантер Е. 233  
 Галилей Г. 25, 57  
 Галуа Э. 25  
 Гальперин П. Я. 262  
 Гамильтон У. Р. 53  
 Гарбузов Н. А. 332  
 Гвишиани Д. М. 99  
 Геллер Е. С. 3, 4, 16, 72  
 Гельфанд И. М. 76, 86, 158  
 Гемпель К. 215  
 Генцен Г. 289  
 Геодакян В. А. 194  
 Гермейер Ю. Б. 130  
 Гильберт Д. 102, 307  
 Глушков В. М. 4, 99, 109, 119, 283, 301, 307, 323, 325, 356  
 Гоббс Т. 126

Голубев В. Л. 194  
Голубев-Новожилов Ю. С. 114  
Гольдберг Т. 4  
Горбатов В. А. 118  
Горский Д. П. 225, 226, 251  
Готт В. С. 176  
Грениевский Г. 98, 166  
Грин К. 291  
Гришкин И. И. 4, 204—206, 227  
Гуд Г. Х. 99, 118  
Гургенидзе Г. С. 232  
Гутер Р. С. 281  
Гутчин И. Б. 4, 286, 331, 347, 355

Дайсон Ф. Дж. 54  
Дал О. И. 123  
Дельгадо Х. 238  
Дембовский Я. 164  
Деренковский В. Я. 11, 21  
Детловс В. К. 331  
Джевоис С. 281  
Джемс У. 347  
Дирак П. 46  
Добров Г. М. 99  
Дубровский Д. И. 4, 233, 239  
Дунаевский И. О. 336

Жеребин В. М. 73  
Жиммерин Д. Г. 14  
Жинкин Н. И. 226  
Жуков-Вережников Н. Н. 191, 192

Загоруйко Н. Г. 286  
Заде Л. 80—84, 91, 92, 173, 274—276, 294  
Зараковский Г. М. 264  
Заринов Р. Х. 4, 329, 334, 336, 337, 340—343

Ивахненко А. Г. 169, 291  
Ивинская О. 354  
Ильенков Э. В. 359  
Ильин В. А. 128

Калашников В. В. 110, 122  
Калман Р. 68, 110  
Калмыков В. Д. 23  
Капитонова Ю. В. 301  
Калица П. Л. 172  
Карнап Р. 196—214, 225, 231  
Карр Г. 123  
Касслер М. 16, 315, 328, 331, 332  
Каськов Н. Н. 110, 111

Кедров Б. М. 49  
Кейслер Г. Дж. 83  
Келдыш М. В. 283  
Кемени Дж. 201—206, 225, 226, 231  
Кеплер И. 31  
Клини С. К. 271—274  
Кларк А. Ч. 172  
Клыкков Ю. И. 120, 123, 293  
Кнорозов Ю. Б. 155, 158  
Кобринский А. Е. 285  
Коваленко И. Н. 110, 122  
Коекин А. И. 130  
Козуляев П. А. 175  
Колмогоров А. Н. 175, 184, 185, 188, 245, 283, 349  
Кононенко К. И. 194  
Косвен М. О. 171  
Костяков В. М. 302  
Котельников В. А. 175  
Коут А. 295  
Кочергин А. Н. 348, 349  
Кравец А. С. 229  
Кремянский В. И. 127  
Крон Г. 121  
Крушинский Л. В. 232  
Кузичев А. С. 286  
Кузнецов А. В. 267  
Кулаков Ю. И. 3, 54, 62  
Кулик В. Т. 142, 173  
Куратовский К. 102  
Кухтенко А. И. 128, 129  
Кушнер Б. А. 256, 257

Лагранж Ж. Л. 53, 182  
Ланда Л. Н. 263, 265, 269, 273, 275  
Лаплас П. С. 167  
Ласкер Э. 29, 30  
Лафарг П. 24, 25  
Леви-Брюль Л. 165  
Лейбниц Г. В. 281, 282  
Лем Ст. 23  
Ленин В. И. 6, 7, 66, 101, 133, 187, 232, 362  
Литинецкий И. Б. 125  
Лосев А. Ф. 165  
Луллий Р. 281  
Лурья А. Р. 232  
Льюс Р. 30, 39  
Ляпунов А. А. 261—265, 283

Майминас Е. З. 73  
Мак-Каллок У. 282, 286  
Маккарти Дж. 291, 293



Мако Д. 110, 118, 128, 132, 133, 139, 141  
 Макол Р. Э. 99, 118  
 Малашинок А. И. 302  
 Мальцев А. И. 245  
 Мангейм М. Л. 142  
 Марков А. А. 54, 57, 59, 60, 244, 245, 247, 251—255, 258—260, 301, 302, 333  
 Маркова Е. В. 43, 72  
 Марковиц Г. 123  
 Маркс К. 10, 24, 25, 66, 74, 97, 133, 185, 350  
 Мах Э. 76  
 Меницкий Д. Н. 194  
 Месарович М. 68, 98, 110, 118, 128, 132, 133, 139, 141, 173  
 Микеланджело 354  
 Микулинский С. Р. 99, 100  
 Миллер Дж. 233  
 Миллер Р. В. 121  
 Милн Дж. 164  
 Мили М. 164  
 Минский М. 261, 280, 286, 298, 353, 354  
 Михальченко Г. Г. 54, 59  
 Моисеев Н. Н. 130  
 Моль А. 16, 88, 94, 143, 194, 315, 328, 331  
 Моргенштерн О. 29, 38, 217  
 Морозов К. Е. 24  
 Мульченко З. М. 152

Назлован Г. М. 194  
 Налимов В. В. 84, 152, 356, 357  
 Напалков А. В. 4, 264, 286, 288  
 Наппельбаум фон Э. Л. 110  
 Нейман Дж. фон 29, 38, 80, 86, 168, 217, 282, 292  
 Нигард К. 123  
 Нильсон Н. 288, 291, 295—298  
 Новик И. Б. 3, 24, 48, 187  
 Новиков П. С. 83  
 Новоселов М. М. 251  
 Ньютон И. 21, 25, 31, 53, 59, 61—65, 167  
 Ньюэлл А. 287

Однер В. Т. 281  
 Ожегов С. И. 100, 162, 352  
 Оуэн Г. 39  
 Оуэнс А. 291, 353—355

Павлов И. П. 76  
 Павловский Ю. Н. 130

Палей И. М. 66  
 Пеано Дж. 306  
 Пейперг И. С. 286  
 Петров Ю. А. 207, 208, 254  
 Питтс У. 282, 286  
 Планк М. 46 — 49  
 Плехель О. 282  
 Поваров Г. Н. 3, 4, 111, 161—163, 165, 171, 172, 181, 281, 282, 290, 348  
 Пойа Д. 287  
 Полетаев Н. А. 227, 229, 294, 360, 361  
 Полунов Ю. Л. 281  
 Попов Ю. Н. 4  
 Портер У. 68, 109  
 Поспелов Г. С. 128, 295—298  
 Поспелов Д. А. 120, 121, 293—298  
 Пост Э. 177, 258—260, 301, 302, 304  
 Прайс Д. 100, 145, 152  
 Пресман А. С. 51  
 Прибрам К. 233  
 Пуассон С. Д. 53  
 Пушкин В. Н. 264, 265, 287, 293, 294

Рабинович З. Л. 4, 318  
 Радченко А. Я. 129  
 Райфа Х. 30, 39  
 Рассел Б. 289  
 Ратнер В. А. 191, 192  
 Ращевский Н. П. 186  
 Ревзин И. И. 91  
 Ревзина О. Г. 91  
 Рид М. Б. 121  
 Роджерс Х. 245  
 Родный Н. И. 99  
 Розенблатт Ф. 286  
 Розенблют А. 283  
 Рубинштейн С. Л. 277

Садовский В. Н. 98, 100  
 Саймон Г. 287  
 Свечинский В. Б. 286  
 Северцов А. Н. 135  
 Семенов А. Л. 123, 124  
 Семенов Н. Н. 47, 48  
 Семенова Е. Т. 123, 124  
 Серавин Л. Н. 191  
 Серебрянников О. Ф. 315  
 Сетров М. И. 68, 137, 169, 194  
 Сешу С. 121  
 Слэйгл Дж. 288, 291

Смирнов В. А. 206  
Соболев Б. А. 142  
Соболев С. Л. 261  
Столяр А. А. 94

Такахара И. 110, 118, 128, 132,  
133, 139, 141  
Талызина Н. Ф. 262  
Тахтаджян А. Л. 68, 170  
Тейлор Э. Б. 165  
Тимофеев Б. Б. 142  
Тондл Л. 211, 215  
Трахтенброт Б. А. 255, 257  
Тростников В. Н. 4  
Трубачев В. В. 194  
Тьюринг А. 177, 247, 257—260,  
276, 282, 289, 301, 344, 360  
Тюхтин В. С. 98, 187

Уайтхед А. Н. 289  
Узнадзе Д. 88  
Украинцев Б. С. 187, 242  
Уолтер Г. 282, 283  
Уолш М. 291, 353—355  
Урсул А. Д. 4, 176, 177, 184,  
186—188, 194, 206, 210  
Успенский В. А. 245, 249, 251,  
258  
Утеуш З. В. 24  
Утеуш Э. В. 24  
Ушаков Д. Н. 352

Фалб П. 68, 110  
Фейнман Р. 45  
Фельдбаум А. А. 108  
Фишер Р. А. 175  
Флейшман Б. С. 118, 142  
Фогель Л. 291, 353—356, 360  
Фролов И. Т. 71  
Фукс В. 16, 315, 328, 331

Харкевич А. А. 191, 227, 228  
Хартли Р. 175, 180  
Хартон В. Л. 3, 4, 129, 142  
Хауснер Б. 123  
Хинтикка Я. 211—226, 231  
Хрущов П. Д. 281

Целищев В. В. 211  
Цетлин М. Л. 76, 80, 86, 158

Чайлд Г. 171  
Чебышев П. Л. 281  
Черныш В. И. 264  
Черняк Ю. И. 11, 21, 73, 99, 127

Черри К. 194  
Черч А. 177, 259, 270  
Чудаков В. Н. 194  
Чэн Чень-чунь 83

Шанин Н. А. 289  
Шапиро С. И. 263, 267, 273,  
277, 294  
Шастова Г. А. 130  
Шеннон К. 77, 87, 88, 175, 181,  
182, 184, 190, 200, 209, 282  
Шестаков В. И. 282  
Шестопал Г. Ш. 262—265  
Шляхин Г. Г. 211  
Шмальгаузен И. И. 134, 135  
Шмидт Г. 148  
Шоломий К. М. 273, 274  
Шоу Дж. 287  
Шредингер Э. 175  
Шрейдер Ю. А. 3, 4, 76, 87—93,  
112, 144—146, 151, 153, 159,  
225—231, 251, 252, 282, 283  
Шубина Г. П. 136

Щукарев А. Н. 281

Эббинхауз Г. Д. 289  
Эйген М. 48, 193  
Эйнштейн А. 44, 50  
Энгельс Ф. 25, 66, 97, 133, 164,  
185, 350  
Эрбран 289, 291  
Эшби У. Р. 96, 98, 103, 109, 132,  
135, 139, 166, 183, 186, 188,  
282, 283, 291, 362

Юдин Э. Г. 98

Якоби К. Г. Я. 53  
Янг С. 99  
Яновская С. А. 225, 226, 266

Ackoff R. L. 227  
Anderson A. R. 206

Bar-Hillel Y. 196—198  
Barbaud P. 333  
Beinap N. D. 206

Carnap R. 196—198

Feit W. 307  
Ferentzy E. N. 328  
Frank H. 228

Harrah D. 87, 93, 227—229

Havass M. 328

Hintikka J. 221—226, 231

Kassler M. 331, 332

Katz D. 164

Kemeny J. G. 201—206, 226, 231

Klaus G. 184

Kubinsky T. 207

Lasker E. 30

Lincoln H. B. 331

Mesarović M. D., 110, 173

Miles W. 227, 229

Osgood G. E. 94

Pietarinen I. 216

Santos C. S. 276

Stone R. 146

Suci G. J. 94

Tannenbaum P. H. 94

Thompson J. G. 307

Tondl L. 211, 215

Törnebohm H. 204, 225

Trybulec A. 150

Wells R. 205, 206, 210, 225

Xenakis Y. 333

Zadeh L. A. 81, 91, 92, 173,  
274—276

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абстрагирование 278
- Абстрактное и конкретное 251
- Абстракция
  - введение и исключение абстракций 225
  - как отвлечение 26, 106, 250, 251, 253, 255, 294
  - уровни (ступени) абстракции 117, 143, 145
- Абстракция безошибочности 85, 250, 256, 265, 266
- Абстракция дискретности 253
- Абстракция отождествления 250 — 252
- Абстракция потенциальной осуществленности 250, 254 — 256, 265, 266
- Автомат 19, 21, 166, 168, 256, 280, 281, 290 — 293, 353, 354
  - абстрактный 261
  - детерминированный 168
  - конечный 109, 110, 247, 291
  - разросшийся 145
  - самовоспроизводящий 168, 282
  - коллектив автоматов 145
- Автоматизированные системы дедуктивных построений 312, 313
- Автоматизированные системы управления (АСУ) 10, 12 — 14, 22, 129, 142, 284, 360
  - отраслевые (ОАСУ) 13, 114 — 116
  - предприятия (АСУП) 13
- Автоматизация 6, 10, 19, 97, 99, 108, 119, 172, 280, 284
  - дедуктивных построений 300 — 326
  - программирования 310
  - умственного (интеллектуального) труда 280, 293, 298, 313 — 322, 350, 353, 362
- Адаптация (адаптивное поведение) 9, 20, 72, 291
- Аксиоматический метод — см. Метод
- Алгебра логики 112, 268
- Алгоритм 60, 91, 115, 118, 120, 127, 132, 134, 138 — 141, 176, 177, 188, 244 — 261, 269 — 278, 282, 288 — 290, 311, 323, 331, 336, 338 — 340, 344
  - «абсолютный» 265, 270, 317
  - анализа сообщений (текстов) 89, 92
  - вероятностный 274, 275
  - классификации 272, 273
  - нормальный (алгоритм) 77, 244, 251, 258 — 260, 301
  - «очевидности» 290, 306 — 310, 340
  - преобразования 272
  - разрешающий (узнавания, опознавания) 271, 272
  - расплывчатый, нечеткий 275 — 278, 294
  - распознавания 272, 273
  - сводимости 266, 270
- Алгоритмизация — см. Алгоритмический подход
- Алгоритмически неразрешимые проблемы 257, 268
- Алгоритмический подход (алгоритмическое описание) 15, 74, 142, 184, 244, 250, 261 — 269, 285, 316, 340
- Алгоритмический язык — см. Язык
- Алфавит (букв, знаков, форм) 88, 184, 242
- Анализ и синтез 8, 163, 340
- Антиномия (парадокс) 103, 170
- Антропоморфизм 297
- Апории Зенона 170

Банк данных 17  
Бессознательное 75, 120, 237  
Бионический подход 124, 125, 129, 136, 285, 286  
Биосфера 43, 72, 350  
Большая система — см. Система  
Буква 182, 190, 247, 251

Вероятностный (вероятностно-статистический) подход 43, 167, 175, 206, 209

Вероятностная Вселенная 167  
Вероятностная картина мира 168, 172

Вопросно-ответная процедура 93

Время реакции человека 9

Выгодность 33

Высказывание (см. также Суждение) 82, 195, 197 — 200, 202, 203, 205, 209, 211 — 213, 222, 223, 313

— номологическое 55, 60, 205, 215

Вычислительная машина (электронная, цифровая — ЭВМ, ЭЦВМ) 9, 10, 12, 16, 18 — 23, 42, 76, 116, 118, 119, 122, 123, 129, 151, 244, 246, 247, 254, 256, 260, 276, 280 — 284, 289, 295 — 298, 301, 311 — 317, 320, 322 — 326, 328 — 333, 336, 340

Вычислительная система (вычислительный комплекс) 9, 12, 114, 121, 244, 309, 311 — 313, 323, 356

Вычислительная техника 13, 22, 23, 97, 115, 119, 122, 142, 284

Генетический способ развития теории — см. Метод

Гиромат 120

Гомеостаз 9

Гуманизация знания и техники 71 — 94

Гуманитаризация 72

Дедуктивно-аксиоматический метод — см. Метод

Дедукция 60, 65, 92, 129

Декеж 36 — 38

Демократический централизм 149

Детерминизм

— лапласовский 43, 159, 166

— стохастический 167

— и случайность 169

Детерминистский и вероятностный принципы (процессы), их соотношение 145, 169, 247, 248, 250

Диалог человека с машиной 322 — 327

Дискретное (дискретность) и непрерывное (непрерывность) как абстракции (идеализации) 55, 253

«Диффузность» 84, 92

Единичное и общее

— диалектика единичного и общего 249

Закон (принцип) необходимого разнообразия (Эшби) 135, 139, 183

Закон тождества 83

Знак 87, 88, 176, 190, 198, 247, 267

Знаковая система — см. Система

Значение (языкового выражения, сообщения, информации и др.) 77, 83, 194, 197, 225 — 227, 231; см. также Смысл

Игра антагонистическая 39, 40 — бескоалиционная 34

— кооперативная 34, 37, 38

Идеализация 201, 250, 252, 254, 255, 266

Идеальное 231 — 237, 243

Иерархическое строение, структура (иерархичность) 114, 115, 126 — 142, 150 — 152, 340.

Избыточность 116, 119

Изоморфизм 54, 176

Импликация 197, 205, 222, 226, 227, 273

— материальная 206

Индуктивная логика — см. Логика

Индукция (индуктивные методы) 126, 199

Интеллектуальная коммуникация — см. Коммуникация

Интеррогативная логика — см. Логика вопросов

Информативность 216, 217, 224;  
 см. также Ценность  
 Информационно-поисковые сис-  
 темы (ИПС) 17, 18, 284  
 Информационно-поисковый  
 язык — см. Язык  
 Информационные процессы (как  
 процессы хранения, перера-  
 ботки, передачи и восприятия  
 информации) 8—12, 18, 65,  
 88, 96, 99, 117, 118, 178,  
 187 — 189, 194, 233, 239,  
 241, 243, 244, 261, 266, 269,  
 272, 280, 287, 314, 322, 349,  
 357  
 Информационный (теоретико-  
 информационный) подход 117,  
 118, 194  
 Информация 27, 43, 48, 54, 59,  
 60, 76, 106 — 109, 111, 113 —  
 118, 128, 149, 150, 158, 168,  
 175 — 243, 322, 324 — 326  
 — «актуальная» 188  
 — генетическая 191 — 192  
 — «глубинная» 218 — 223  
 — «документальная» 177  
 — «идеальная» 243, 245  
 — «материализованная» 243  
 — научно-техническая 87, 146,  
 189  
 — «перенесенная» 214, 215  
 — «поверхностная» 218 — 227  
 — «потенциальная» 188  
 — прагматическая 230  
 — свободная 183  
 — связанная 183  
 — семантическая 89, 177, 195 —  
 232  
 — синтаксическая 198, 210  
 — социальная 177  
 — «субъективная» 228, 229  
 — удельная 179 — 182  
 — «физическая» 47  
 — шенноновская (статистиче-  
 ская) 77, 167, 175, 183, 198,  
 206, 207, 228  
 — эмпирическая 204  
 — в живой природе (биологи-  
 ческая) 189 — 194  
 — и мышление (сознание) 226,  
 231 — 243  
 — и отражение 185 — 189  
 — и причинность 188, 242  
 — и управление 8, 127, 129 —  
 135

— и энергия 66  
 — количество информации 9,  
 149, 178 — 181, 184, 185,  
 188, 199, 202, 204 — 206,  
 208  
 — объективность информации  
 186  
 — смысл информации 189 — 191  
 — статистический подход к по-  
 нятию информации 175, 216,  
 217  
 — термодинамическое истолко-  
 вание 175, 183, 193  
 — ценность информации 87, 177,  
 189 — 193, 217, 227 — 230;  
 см. также Селекционная цен-  
 ность  
 Информационная причинность  
 242  
 Искусственный интеллект (ра-  
 зум) 23, 125, 145, 151, 280 —  
 301, 327, 348, 353 — 362  
 Исследование операций 121, 123  
 Истина абсолютная и относи-  
 тельная 163  
 Исчисление 83, 94, 270, 289;  
 см. также Логические исчис-  
 ления  
 Исчисление высказываний 289,  
 302, 303; см. также Логика  
 высказываний  
 Исчисление предикатов 70, 89,  
 90, 93, 201, 203  
 Кибернетизация 6, 15, 16, 31, 53  
 Кибернетика  
 — биологическая 15, 194, 299  
 — математическая 176  
 — медицинская 15  
 — теоретическая 10, 12, 80, 98,  
 129, 176, 256, 266, 268, 278,  
 284  
 — техническая 169  
 — экономическая 10 — 14  
 — и абстракция безошибочности  
 256  
 — и абстракция потенциальной  
 осуществимости 256  
 — и гуманитарные науки 15, 16,  
 72 — 74, 78, 79, 84, 85  
 — и принцип развития (движе-  
 ния) 169  
 — и причинность 54, 60  
 — и проблема абстракции 256  
 — и психология 172

- и системный подход 96, 98
- и тенденции развития науки 7, 98
- и теория информации 7
- и физика 44, 53, 59, 60, 65 — 70
- и как научное направление 7 — 10
- и как общая теория причинных сетей 54, 60
- определение 14, 54, 59
- основной гносеологический результат кибернетики 351
- разделение на теоретическую, техническую и прикладную 10
- Кибернетическая педагогика 265, 273
- Кибернетическая система — см. Сложная динамическая система
- Классификация 93
- систем 161 — 173
- Коалиция 38, 139
- действия 32 — 36
- интересов 32 — 36
- Кодирование (и декодирование) 9, 15, 118, 188, 237 — 239, 244, 267
- оптимальное 182, 183
- Количество информации — см. Информация
- Коллектив
- моделирование коллективов 147 — 156
- Конкретизация
- научный 146, 147, 156 — 160
- «невидимый» 145
- структура коллектива 147 — 156
- Коммуникация (коммуникативный процесс) 16, 143, 227 — 229, 243
- интеллектуальная 75, 224, 225, 227, 278
- Конструктивная математика (конструктивное направление в математике) — см. Математика
- Конструктивные объекты 252 — 255, 266
- Континуальные модели управляющих систем 86
- Конфликт 12, 29 — 34, 43, 133, 139 — 141, 147

- формализация конфликтов 29 — 34
- Концепция разнообразия 185 — 189
- Критерий оптимизации (качества) 11, 12, 85, 101 — 103, 105, 106, 109, 114
- Лингвистика математическая 65
- Лингвистическая семантика 226
- Логика 60, 65, 75, 78 — 80, 85, 86, 87, 91, 102, 176, 208, 225, 262, 266, 268, 269
- бесконечнозначная 81, 83
- вероятностная Дж. фон Неймана 86
- вопросов (вопросительных предложений) 207, 208
- высказываний 82, 93, 164, 211, 267, 273, 288, 289
- дедуктивная 60, 312
- диалектическая 170
- индуктивная 93, 167, 196, 212
- интуиционистская 86
- классическая 81 — 83
- математическая — см. Математическая логика
- многозначная 80 — 83
- модальностей 225
- «небулярная» 173
- «расплывчатых понятий» 173
- символическая 196, 348
- формальная 79, 85
- и техника 282
- Логико-прагматическая теория информации — см. Теория информации
- Логико-семантическая теория информации — см. Теория информации
- Логическая (индуктивная) вероятность 199, 200, 204, 208, 209, 212, 218, 221 — 223, 228
- Логическая семантика 196, 201, 218, 225
- Логическая систематизация 72, 215, 223
- Логические (логико-математические) исчисления 282, 315
- Логическое мышление — см. Мышление
- Логическое следствие, следование (выводимость) 90; см. также Дедукция

Логические схемы алгоритмов  
263, 264, 274

Математизация 24 — 31, 40, 48,  
84

Математика 15, 69, 94, 102,  
176, 257, 265, 266, 268, 273,  
287, 312

— вычислительная и машинная  
15, 244, 260, 300

— «конечная» 15

— конструктивная 255 — 257,  
305

— прикладная 130

— «диффузных» («размытых») ве-  
личин 173

— и логика 244, 255 — 257

— применение математических  
методов в других науках  
28, 29

Математическая теория экспе-  
римента — см. Планирование  
эксперимента

Математическая логика 25, 83,  
85, 176, 260, 271, 274, 288,  
290, 301, 305, 306

Машина 19, 98, 166, 170 — 172,  
253, 255, 258, 265, 280, 281,  
284, 288, 304, 306, 309 — 317

— детерминированная 166

— логическая 281

— Поста 258 — 260, 304

— стохастическая со входом 166

— Тьюринга 176, 247, 257,  
258 — 260, 276, 289, 301

— и мышление (их соотношение)  
145, 284, 288, 295, 347 — 349

«Машинный интеллект» — см.  
Искусственный интеллект

Машинный перевод 87

Машинный эксперимент 122, 123,  
302, 357

«Мера содержания» 200, 202, 203

«Мера информации» 200

Метаматематика 47

Метанаука 75 — 80

Метатеория 47

Мета-физика 47, 54, 60, 65

Метод

— аксиоматический (дедуктив-  
но-аксиоматический) 31, 45

— генетический 189

— экспертных оценок 85

Метод (схема) конституентов 211,  
373

Методы

— агрегирования 122, 130

— машинно-математические 16,  
121, 125

— общенаучные 72

сетевые 120, 121

точные методы в исследованиях  
культуры и искусства 16, 165

Механицизм 48 — 50

Множество 56, 59, 67, 77, 79 —  
85, 102, 110, 111, 133, 184,  
196, 213, 247, 252, 266, 319

— нечеткое (расплывчатое) —  
см. Нечеткое множество

Моделирование 15, 24, 73 — 75,  
99, 109, 117, 125, 143, 145,  
189, 275

— биологических процессов 275

— идеальное 236

— кибернетическое 24, 206, 264,  
280, 281, 327

— мыслительных (интеллек-  
туальных) процессов; мыш-  
ления, психики 84, 85, 264,  
280, 281, 283, 285, 286, 292,  
293, 347, 349, 353

— ситуационное 293

— физическое 124

— художественного творчества  
327 — 341

— эволюционное 291, 292, 353,  
355

— на электронных цифровых  
машинах 73, 122, 327

— виды (типы) моделирования  
121 — 124

Модель 15, 52, 73, 76, 78, 83,  
92, 111, 128, 130, 132, 135,  
142, 161, 162, 176, 202, 205,  
206, 227, 277, 282, 298, 331,  
356, 357

— вероятностная 84

— внутренняя модель внешнего  
мира 120, 292, 293

— коллектива 145, 146, 148, 155

— логическая, процесса комму-  
никации 86, 87, 224 — 230

— математическая (логико-мате-  
матическая) 29, 73, 98, 122,  
123, 161

— мышления (мозга) 286, 356 —  
358

— нейрона — см. Формальный  
нейрон

— поведения 289, 299



- социальной структуры 145, 146, 148
- экономики 146
- экономико-математическая 11 — 13
- «Модель-интерпретация» 201, 202
- «Мыслящая машина» — 169; см. также «Искусственный интеллект»
- Мышление 75, 79, 81 — 85, 91, 93, 98, 119, 164, 165, 172, 194, 210, 232, 261 — 264, 267, 277, 278, 283, 288, 291, 293, 347, 349, 357
- аналитическое 164
- логическое 86, 165, 277, 278, 315
- образное 9
- синтетическое 164
- творческое 86, 120
- Надежность 81, 124, 125, 253
- построение надежных систем из ненадежных компонентов 86
- Науковедение 99, 100
- Наукометрия 99, 100, 152
- Научная организация труда 7
- Научно-техническая информация — см. Информация
- Научно-техническая революция (прогресс) 6, 14, 15, 18, 19, 22, 74, 94, 100, 161 — 163, 171, 173, 194
- Негэнтропийный принцип информации 175, 183
- Нейродинамический код субъективных явлений 236 — 243
- Нечеткий предикат 83, 92
- Нечеткое множество 80, 82, 103, 294
- Нечеткое понятие 75 — 94, 278, 294
- Нечеткое свойство 82
- Ноосфера 52
- Нормальный алгоритм — 77, 244, 251, 258 — 260, 301
- Образ
  - идеальный (психический) 234, 334
  - кодовый 234, 237
  - образы как элементарные уровни понимания 104

- Обратная связь 9, 27, 28, 106, 108, 168, 176
- Обучающая машина 19
- Обучение 9, 19, 20, 72, 87 — 93, 244, 251, 261 — 265, 268, 269, 274, 291, 294, 297, 298
- автомата 291, 294
- алгоритмизация обучения 177, 265, 266, 268 — 270
- три уровня обучения 88 — 93
- Общая теория систем — см. Теория систем
- Общенаучные понятия 15, 176, 177
- Общество 71, 99, 143, 144, 146 — 149, 167, 168, 173, 236, 240, 295, 350
- «Описание состояния» 196 — 201, 213, 214
- «Описание структуры» 197, 199, 213, 214
- Опознавание образов — см. Распознавание образов
- Оптимизация, оптимальность 10, 11, 19, 21, 33, 39 — 41, 43, 71, 72, 85, 119, 120, 128, 130, 139, 145
- Организация (организованность) 6, 7, 66, 67, 72, 98, 99, 101, 104, 126, 137, 158 — 160, 168, 169, 193, 240
- Осуществимость
  - потенциальная 254, 255
  - реальная (практическая, фактическая) 250, 251
- Осуществимый процесс 250, 251, 254
- Отношение предпочтения 32, 34, 36, 37
- Отождествление — см. Различение и отождествление
- Отражение (отображение) 187
- психическое 233, 234, 236
- и разнообразие 185 — 189
- Отраженное разнообразие 187, 188
- Парадокс — см. Антиномия
- Перцептрон (персептрон) 286
- Планирование эксперимента 12, 15, 167, 262
- Поведение (функционирование) 32, 68, 72, 73, 89, 105, 109, 132, 140, 166, 168, 228, 230, 233, 246, 248, 261 — 268,

274, 282, 283, 286, 292, 297 —  
299, 316, 317, 327, 349, 355—  
359  
— оптимальное 32  
— регулярное 261  
Поверхностная семантика 218  
Поиск логического вывода (до-  
казательства) 223 — 225  
Поисковая система — см. Сис-  
тема информационно- поиско-  
вая  
Понимание 91, 309  
— три уровня понимания 92  
Понятие расплывчатое (нечет-  
кое) — см. Нечеткое поня-  
тие  
Порождающая грамматика 90, 91  
Порождающие правила (система  
порождающих правил) 47, 55,  
65, 90, 91  
Порядок — см. Организация  
«Постулат значения» — 201,  
203  
Потребности 241  
«Правосознание» коллектива  
147, 149, 152, 154  
Прагматика 87, 189  
Предикат 83, 85, 90 — 92, 196,  
197, 201, 203, 212, 213, 218,  
270 — 272  
Предписание алгоритмического  
типа 177, 265, 266, 268 — 270  
Предмет большой (сложный) 162,  
165, 166  
— малый (простой) 162, 164,  
165, 170  
— превращающийся 162, 164,  
170  
Принцип иерархичности управ-  
ления 119, 126, 142  
«Принцип локальной проверяе-  
мости» 77  
«Принцип множественности сис-  
темных образов вещей» 163  
Принцип наименьшего взаимо-  
действия 158  
«Принцип обусловленности» 159,  
160  
Принцип осуществимости цели 35  
Принцип подготовки развития  
119  
Принцип предсказуемости 159,  
160  
Принцип разумной универсали-  
зации 119

Принцип симметрии 213  
Принцип соответствия 51, 59  
«Принцип справедливости» 39  
Принцип «феноменологической  
симметрии» 56 — 62  
Принятие (выбор) решения 18 —  
21, 29, 40, 43, 75, 91, 93, 97,  
114, 120, 140, 147, 159, 160,  
228, 229, 273 — 276, 296 —  
299, 318 — 322, 341, 360 —  
361  
Причинная сеть 54, 60  
Проблема Бернсайда 307  
Программированное обучение  
262, 269  
Психика 232, 259, 261 — 265,  
268, 275, 282, 284, 297  
Психология 164, 172, 228, 241,  
244, 265, 267, 269, 275, 278  
Развитие 86, 104, 124, 125, 135 —  
138, 169, 171, 210, 292, 311,  
350, 351  
— принцип подготовки разви-  
тия 119  
Различение и отождествление  
206, 266  
Разнообразие 134, 135, 183,  
185 — 189  
«Разнообразностная» концеп-  
ция — см. Концепция раз-  
нообразия  
Расплывчатое множество — см.  
Нечеткое множество  
Расплывчатое понятие — см. Не-  
четкое понятие  
Расплывчатый алгоритм — см.  
Алгоритм расплывчатый  
Распознавание образов 15, 83,  
275, 278, 298  
Самовоспроизведение 282  
Самообучение 282  
Самоорганизация 124, 125, 133,  
136, 152, 168, 169, 193, 236,  
291, 356  
— эвристическая 169  
Самоорганизующая система —  
см. Система  
Сведение 50  
Сведения — см. Информация  
Сверхсистема — см. Система  
парадоксальная  
Селекционная ценность 193

Семантика 87, 93, 189, 201, 203, 268  
 Семиотизация знания (семиотический подход) 54, 72, 73, 120, 292 — 294  
 Семиотика 244  
 — средства семиотики 51  
 Сетевые методы — см. Методы  
 Симметрия 55, 57, 93, 176, 196, 213  
 — «феноменологически-информационная» — см. Принцип «феноменологической симметрии»  
 Синтаксис 87, 189  
 Синтез — см. Анализ и синтез  
 Система (структура) 100 — 102, 111  
 — абстрактная (автономная) 103  
 — большая 8, 10, 11, 97, 99, 112 — 125, 127, 128 — 131, 133, 138, 141 — 144, 162, 163, 166 — 173, 244, 261  
 — детерминированная 109, 166  
 — динамическая — см. Сложная динамическая система  
 — знаковая 73, 86, 87  
 — кибернетическая 10, 105 — 109, 142, 229  
 — логическая 201, 202  
 — малая (простая) 162, 163, 166, 170 — 173  
 — обратимая 105, 106  
 — относительно обособленная 103, 113, 114, 118, 143, 162  
 — парадоксальная 166  
 — превращающаяся — см. сверхбольшая  
 — простая — см. Малая  
 — самоуправляющаяся (самоорганизующаяся) 169, 228, 232, 235, 240, 242, 291  
 — сверхбольшая 15, 103, 113, 114 — 118, 143, 162, 168 — 171  
 — статическая 104, 162  
 — стохастическая (вероятностная) 109, 166  
 — ультрасложная — см. превращающаяся  
 — языковая 195 — 196, 198 — 200, 204, 209  
 — типа «автомат — человек» («человек — машина») 124, 298

Системно-кибернетический подход 72, 73, 143  
 Системный подход (системная ориентация) 66, 96 — 100, 144, 161  
 Системотехника 99, 111, 118, 314  
 Ситуация (в теории игр) 32 — 35, 41, 140, 147, 156, 178  
 Сложная система 8, 52, 53, 65, 74, 84, 96, 99, 106 — 108, 110, 118, 122, 128, 131 — 144, 158, 261, 292, 356; см. также Система большая  
 Сложная динамическая система 9, 10, 53, 66, 68, 69, 105 — 111, 162, 166, 169, 261  
 Сложное (сложность) 8, 32, 96, 113, 143, 161 — 173, 184, 255, 292  
 — и простое 50 — 52, 162, 163, 170 — 173  
 Смысл языковых выражений, сообщения, информации 77, 88, 92, 109, 189 — 191, 194 — 232; см. также Значение  
 Содержание (языкового выражения) — см. Смысл  
 Сознание 231 — 233, 238, 243  
 Сообщение — см. Информация  
 Справедливость 33  
 Статистический подход — см. Вероятностный подход  
 Строгость 44  
 Структура и функция 43, 68, 73  
 Структурно-логический подход 118  
 «Субстратный» подход 44, 66, 67  
 Субъективная вероятность 228 — 230  
 Суждение (высказывание) 190, 205, 207 — 211, 257, 263, 267, 269, 270, 277, 334  
 Творческая деятельность (творчество) 75, 352, 353  
 Тезаурус 87, 93, 157, 158  
 — коллективный 157, 158  
 Тезаурусная концепция (модель) информации и коммуникации 86 — 94  
 Тезис Поста 259  
 Тезис Тьюринга 259  
 Тезис Черча 259  
 «Теоремы существования» 41

Теория автоматов 118, 301  
 — конечных 15  
 — самовоспроизводящихся 168  
 Теория алгоритмов 79, 83, 176,  
 177, 244, 246, 253, 257, 260,  
 261, 271  
 Теория игр 29 — 32, 123, 139  
 Теория индуктивной вероят-  
 ности 199  
 Теория информации 15, 87, 127,  
 167, 169, 175 — 243  
 — алгоритмическая 184, 185, 188  
 — математическая 175  
 — прагматическая (логико-  
 прагматическая) 189, 225, 227,  
 228, 230, 231, 334  
 — «психологическая» 231  
 — семантическая (логико-се-  
 мантическая) 87, 88, 189,  
 195 — 231  
 — синтаксическая 227  
 — статистическая (шеннонов-  
 ская) 87, 88, 118, 178, 183 —  
 187, 217, 231  
 — топологическая 184, 186  
 Теория конечных автоматов —  
 см. Теория автоматов  
 Теория кумулятивных сетей 111,  
 112, 121  
 Теория многоуровневых систем  
 139  
 Теория нечетких (расплывчатых)  
 множеств 79 — 86  
 Теория самоорганизации 168  
 Теория самоорганизующихся  
 систем 129  
 Теория систем («системология»)  
 44, 65 — 70, 97 — 100, 106,  
 144, 161, 170, 173  
 — общая 67, 68, 98, 110, 118,  
 161, 165  
 — математическая 68, 100, 103,  
 109 — 111  
 Теория системной сложности  
 173  
 Теория управляющих систем 75  
 Теория цепей 173  
 Термодинамика 55, 65  
 Техника 6, 10, 16, 17, 71, 74,  
 173  
 — больших систем 97, 169, 172  
 — вычислительная — см. Вы-  
 числительная техника  
 Точность 16, 75, 79, 80, 196, 240  
 Транзитивность 52

Упорядоченность, порядок —  
 см. Организация  
 Управление (процесс управле-  
 ния) 6 — 14, 27, 43, 59, 68,  
 72, 74, 96, 97, 99, 104, 109,  
 115—121, 125—142, 158, 167,  
 173, 189, 190, 232, 236, 262,  
 360  
 — уровни управления 126—129  
 — цель (задачи) управления 9,  
 106, 290  
 Установка (по Узнадзе) 88  
 Устойчивость 33, 37, 38  
 Уточнение — см. Экспликация  
 Фасцинация (в коллективе) 155,  
 158  
 Физика 45 — 49, 53 — 57, 59,  
 63 — 65, 67  
 — «вавилонский» и «греческий»  
 пути развития 45  
 «Физикализация» 44 — 53  
 «Физическая информация» —  
 см. Информация  
 Физическая картина мира 46,  
 49, 54  
 Формализация 25, 29 — 34, 48,  
 72, 83, 85, 86, 93, 189, 282,  
 286, 314 — 316, 320 — 322,  
 328  
 — логическая 78 — 86, 93, 282  
 Формальная логика — см. Ло-  
 гика  
 Формальная первная сеть —  
 см. Формальный нейрон  
 Формальный нейрон 282, 286,  
 351  
 «Функция членства» 80 — 85,  
 92, 278  
 Функциональная полнота 267  
 Функциональный подход 43, 44  
 Целелогающая деятельность  
 347  
 Целесообразность 39, 136, 160  
 Целологание 160  
 Цель (задача) 9 — 12, 20, 43,  
 101, 106, 112, 119 — 121,  
 132 — 133, 139 — 141, 150 —  
 152, 156, 157, 160, 190,  
 287, 302 — 304, 319 — 321,  
 352 — 356  
 Целостность 100, 102, 104, 105,  
 113, 115, 131, 133, 136 — 139,  
 142, 144

Ценность 71, 87, 177, 189 — 194,  
205, 217, 227, 328, 352  
— эвристическая 196, 206

Централизация и децентрализация (автономность) 125, 127,  
131, 132, 140 — 142

Часть и целое 101 — 103, 131,  
141, 162 — 165, 169, 170

Человек 19 — 23, 71, 77, 84,  
120, 162—166, 172, 176, 183,  
238, 239, 241, 253, 255, 258,  
261 — 265, 272, 274 — 276,  
278, 290, 295 — 299, 315 —  
318, 321, 329, 333, 347 — 362

— и кибернетическая машина  
9, 71 — 75, 318, 322 — 327,  
340

— оператор 264, 267, 269, 276,  
312, 313, 317

Человеческий фактор 19, 74, 78—  
86, 143, 266, 318

Человеческая деятельность 20,  
21, 74, 96 — 98, 100, 264,  
267, 269, 270, 276, 316, 347,  
351

Эволюция 125, 135, 292

— (пред)биологическая (биоэволюция) 48

Эвристика (эвристические рассуждения, эвристические методы) 65, 118 — 120, 177,  
223, 285, 287, 291, 315 — 318,  
354, 355

Эвристическое программирование 287, 289, 318

Экспериментальная семантика  
226, 269

Экспликанд 196

Экспликат 77, 196 — 199, 205

Экспликация 77, 88, 177, 178,  
185, 196, 199, 204 — 211, 226,  
256, 257 — 261, 282

Энтропия 168, 175

— вопроса 207 — 210

— и информация 175, 183, 188,  
207 — 210

— в теории информации 168

Эротетическая логика — см. Логика вопросов

Явление и сущность 163

Язык 78, 94, 158, 163, 176, 182,  
195, 202, 203, 205, 211 — 214,  
218, 260, 262, 267, 270, 277,  
297, 304, 309, 313, 323, 329

— алгоритмический 73, 123,  
244, 252, 263 — 265, 277, 301,  
324, 325

— естественный 84, 86, 87, 91,  
298, 325

— информационно-поисковый 73  
— искусственный 262

— логический 73, 201, 224, 301,  
302, 304 — 306

— «монадический» 212 — 214,  
217 — 219

— науки 69, 83 — 85, 87, 196,  
201

— общения человека и ЭВМ 87,  
298, 311

— описания 51, 72, 73, 76, 112,  
123

— «полиадический» 218, 220, 221

— программирования 123, 254,  
284, 310, 331

## СОДЕРЖАНИЕ

От редакторов . . . . .	3
<b>Часть первая. О КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ АСПЕКТАХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА . . .</b>	<b>5</b>
<b>Глава I. КИБЕРНЕТИКА И СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ . . . . .</b>	<b>6</b>
1. Социально-экономическая сфера . . . . .	—
2. Наука . . . . .	15
3. Человеческий фактор . . . . .	19
<b>Глава II. ПРОБЛЕМА МАТЕМАТИЗАЦИИ ЗНАНИЯ . . . . .</b>	<b>24</b>
1. Математизация в свете кибернетики . . . . .	—
2. Формализация конфликтов . . . . .	29
3. Бескоалиционные и кооперативные игры . . . . .	34
4. Реализация принципов оптимальности . . . . .	31
<b>Глава III. «ФИЗИКАЛИСТСКИЙ» И ТЕОРЕТИКО-СИСТЕМНЫЙ АСПЕКТЫ КИБЕРНЕТИКИ . . . . .</b>	<b>43</b>
1. Проблема «физикализации» . . . . .	44
2. Метатеоретизация фундаментальных знаний о природе . . . . .	53
3. Физика, кибернетика, теория систем . . . . .	66
<b>Глава IV. КИБЕРНЕТИКА И ГУМАНИЗАЦИЯ ЗНАНИЯ: РОЛЬ ЛОГИЧЕСКИХ ИДЕЙ . . . . .</b>	<b>71</b>
1. О проблеме точности научных понятий . . . . .	75
2. Логическая формализация и «человеческий фактор» . . . . .	78
3. От логики к логико-тезаурусной концепции интеллектуальной коммуникации . . . . .	86
<b>Часть вторая. СКАЧОК СЛОЖНОСТИ—БОЛЬШИЕ СИСТЕМЫ . . . . .</b>	<b>95</b>
<b>Глава I. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД И ИССЛЕДОВАНИЕ БОЛЬШИХ СИСТЕМ . . . . .</b>	<b>96</b>
1. Развитие системного подхода . . . . .	—
2. Изменение и управление. Кибернетические системы . . . . .	104
3. Большие и сверхбольшие системы . . . . .	112
4. Методы исследования больших систем . . . . .	117

Глава II. ПРОБЛЕМА ИЕРАРХИИ . . . . . 126

1. Об уровнях управления . . . . . —
2. Потоки управляющей информации и качественная разнородность частей . . . . . 129
3. Объективные основы структурообразования . . . . . 135

Глава III. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЛЕКТИВОВ . . . . . 143

1. Системный подход и исследование коллективов . . . . . 144
2. Коллектив и его структура . . . . . 147
3. Особенности структур коллективов . . . . . 152
4. О научных коллективах. Коллективы и организация . . . . . 156

Глава IV. СТУПЕНИ СЛОЖНОСТИ . . . . . 161

1. Индуктивная шкала . . . . . 162
2. Уровни системной сложности и стадии научно-технического прогресса . . . . . 164
3. Динамика простого и сложного . . . . . 170

Часть третья. ИНФОРМАЦИЯ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ . . . . . 174

Глава I. «ПРИРОДА» ИНФОРМАЦИИ . . . . . 175

1. О развитии понятия информации . . . . . —
2. О математических экспликациях феномена информации . . . . . 178
3. Информация, разнообразие, отражение . . . . . 185
4. Качественная сторона информации. «Биологические» тенденции . . . . . 189

Глава II. О ЛОГИКО-СЕМАНТИЧЕСКИХ ТЕОРИЯХ ИНФОРМАЦИИ . . . . . 195

1. Основные принципы семантических теорий информации . . . . . —
2. Понятие семантической информации для логических языков с зависимыми предикатами . . . . . 201
3. Критерий «адекватного синонимичного описания». Семантическая информация и логика вопросов . . . . . 204
4. Метод конститuentов в логическом анализе семантической информации . . . . . 211
5. «Поверхностная» и «глубинная» информация . . . . . 218
6. От семантической концепции информации к гносеологическим и прагматико-коммуникативным проблемам . . . . . 223

Глава III. ИНФОРМАЦИЯ И СОЗНАНИЕ . . . . . 231

1. Идеальное как информация, непосредственно «данная» личности . . . . . —
2. Проблема нейродинамического кода субъективных явлений . . . . . 236

Глава IV. АЛГОРИТМ — ПРЕДПИСАНИЕ К ПЕРЕРАБОТ-  
КЕ ИНФОРМАЦИИ . . . . . 244

1. Содержательное понятие алгоритма и связанные с ним основные абстракции . . . . . 245
2. О строгих экспликациях идеи алгоритма . . . . . 256
3. Алгоритмический подход . . . . . 261
4. Алгоритмы: логические и психологические аспекты . . . . . 269

Часть четвертая. ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
И АВТОМАТИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНО-  
ТВОРЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ . . . . . 279

Глава I. ПРОБЛЕМА «ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА» 280

1. Моделирование и автоматизация интеллектуальных процессов: исторические истоки и научный поиск . . . . . 281
2. Четыре подхода . . . . . 285
3. «Искусственный интеллект» как предмет дискуссий и как предмет исследований . . . . . 294

Глава II. ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ДЕДУКТИВНЫХ  
ПОСТРОЕНИЙ . . . . . 300

1. Новый подход к автоматизации дедуктивных построений. «Алгоритм очевидности» . . . . . 301
2. Пути реализации и ближайшие возможности . . . . . 308
3. Некоторые методологические вопросы построения систем автоматизации творческих процессов . . . . . 313
4. Структуры цифровых машин . . . . . 322

Глава III. О МОДЕЛИРОВАНИИ ХУДОЖЕСТВЕННОГО  
ТВОРЧЕСТВА . . . . . 327

1. Кибернетика и искусство Музыка как объект машинных экспериментов . . . . . —
2. Логический аспект художественной культуры и моделирование музыкальных композиций . . . . . 334
3. Машинная музыка — средство исследования творчества . . . . . 342

Глава IV. КИБЕРНЕТИКА И МЫШЛЕНИЕ: ДИСКУССИИ  
И ПРОБЛЕМЫ . . . . . 347

1. Дискуссия «машина и мышление» . . . . . —
2. Проблема «искусственного интеллекта» на различных уровнях абстракции . . . . . 350
3. О некоторых философских вопросах моделирования мышления . . . . . 356
4. Философское заключение: кибернетика и человеческое достоинство . . . . . 359
- Именной указатель . . . . . 363
- Предметный указатель . . . . . 368



## CONTENTS

Editors' remarks . . . . .	3
Part one. ON THE CYBERNETIC ASPECTS OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL PROGRESS . . . . .	5
Chapter I. CYBERNETICS AND MODERN TASKS OF CON- TROL . . . . .	6
1. Socio-economic sphere . . . . .	—
2. Science . . . . .	15
3. The human factor . . . . .	19
Chapter II. THE PROBLEM OF MATHEMATIZATION OF KNOWLEDGE . . . . .	24
1. Mathematization in the light of cybernetics . . . . .	—
2. Formalization of conflicts . . . . .	29
3. Non-coalition and cooperative games . . . . .	34
4. Realization of optimality principles . . . . .	39
Chapter III. THE «PHYSICALISTIC» AND SYSTEM-THEORE- TIC ASPECTS OF CYBERNETICS . . . . .	43
1. The problem of «physicalization» . . . . .	44
2. Meta-theorization of fundamental knowledge of nature . . . . .	53
3. Physics, cybernetics, system theory . . . . .	66
Chapter IV. CYBERNETICS AND THE HUMANIZATION OF KNOWLEDGE. THE ROLE OF LOGICAL IDEAS . . . . .	71
1. On the problem of scientific concept exactness . . . . .	75
2. Logical formalization and the «human factor» . . . . .	78
3. From logic to the logic-thesaurus conception of intellectual communication . . . . .	86
Part two. THE COMPLEXITY LEAP — LARGE SYSTEMS . . . . .	95
Chapter I. SYSTEM APPROACH AND THE STUDY OF LARGE SYSTEMS . . . . .	96
1. The evolution of system approach . . . . .	—
2. Change and control. Cybernetic systems . . . . .	104
3. Large and super-large systems . . . . .	112
4. Methods for the study of large systems . . . . .	117

Chapter II. THE PROBLEM OF HIERARCHY . . . . .	126
1. Control levels . . . . .	—
2. Control information flows and the qualitative heterogeneity of components . . . . .	129
3. Objective foundations of structure formation . . . . .	135
Chapter III. MODELS OF COLLECTIVES . . . . .	143
1. System approach and the study of collectives . . . . .	144
2. The collective and its structure . . . . .	147
3. Features of collective structures . . . . .	152
4. On scientific collectives. Collectives and organization . . . . .	156
Chapter IV. COMPLEXITY STEPS . . . . .	161
1. An inductive scale . . . . .	162
2. System complexity levels and stages of scientific and technical progress . . . . .	164
3. The dynamics of the simple and complex . . . . .	170
Part three. INFORMATION IN THE MODERN WORLD . . . . .	174
Chapter I. THE «NATURE» OF INFORMATION . . . . .	175
1. On the evolution of the concept of information . . . . .	—
2. On the mathematical explications of the phenomenon of information . . . . .	178
3. Information, variety, reflection . . . . .	185
4. The qualitative side of information. «Biological» tendencies . . . . .	189
Chapter II. ON LOGIC-SEMANTIC THEORIES OF INFORMATION . . . . .	195
1. Fundamentals of semantic theories of information . . . . .	—
2. The notion of semantic information for dependent-predicate logical languages . . . . .	201
3. The criterion of «adequate synonymate description». Semantic information and erotetic logic . . . . .	204
4. The constituent technique in the logical analysis of semantic information . . . . .	211
5. «Surface» and «depth» information . . . . .	218
6. From the semantic conception of information to gnoseological and pragmatic-communicative problems . . . . .	223
Chapter III. INFORMATION AND CONSCIOUSNESS . . . . .	231
1. The ideal as information immediately «given» to a person . . . . .	—
2. The problem of neurodynamic code of subjective phenomena . . . . .	236
Chapter IV. ALGORITHM — THE PRECEPT FOR INFORMATION PROCESSING . . . . .	244

1. The informal concept of algorithm and related basic abstractions . . . . .	245
2. On the strict explications of the idea of algorithm . . . . .	256
3. Algorithmic approach . . . . .	261
4. Algorithms: logical and psychological aspects . . . . .	269

Part four. QUESTIONS OF SIMULATION AND AUTOMATION OF INTELLECTUAL CREATIVE PROCESSES . . . . .	279
--	-----

Chapter I. THE PROBLEM OF «ARTIFICIAL INTELLIGENCE» . . . . .	280
---	-----

1. Simulation and automation of intellectual processes: historical background and scientific research . . . . .	281
2. Four approaches . . . . .	285
3. «Artificial intelligence» as the subject of discussion and study . . . . .	294

Chapter II. PROBLEMS OF AUTOMATION OF DEDUCTIVE CONSTRUCTIONS . . . . .	300
---	-----

1. A new approach to the automation of deductive constructions. «Evidence algorithm» . . . . .	301
2. The ways of realization and the nearest possibilities . . . . .	308
3. Some methodological questions of design of creative process automation systems . . . . .	313
4. The structures of digital computers . . . . .	322

Chapter III. ON THE SIMULATION OF ARTISTIC CREATION . . . . .	327
---	-----

1. Cybernetics and art. Music as the object of computer experiments . . . . .	—
2. The logical aspects of art culture and the simulation of musical compositions . . . . .	334
3. Computer music — a tool for the study of art . . . . .	342

Chapter IV. CYBERNETICS AND THINKING: DISCUSSION AND PROBLEMS . . . . .	347
---	-----

1. Discussion about machines and thinking . . . . .	—
2. The problem of «artificial intelligence» at various abstraction levels . . . . .	350
3. On some philosophical questions of simulation of thinking . . . . .	356
4. Philosophical conclusion: cybernetics and human dignity . . . . .	359

Subject index . . . . .	363
-------------------------	-----

Name index . . . . .	368
----------------------	-----

**Управление, информация, интеллект.** Под ред.  
У67 А. И. Берга и др. М., «Мысль» 1976.

383 с. со схем. (Филос. о-во СССР. Науч. совет по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР).

Цель книги — осветить современный уровень развития кибернетики и связанных с нею наук. Среди авторов — видные ученые, философы и естествоиспытатели, разрабатывающие методологические проблемы кибернетики. В работе рассматриваются взаимосвязи современной научно-технической революции и кибернетики в области управления, а также методов научного исследования. Важное место занимают проблемы раскрытия природы информации и выявления специфики и значения теоретико-информационного подхода, вопросы автоматизации и моделирования интеллектуальных процессов.

У 10501-170  
004(01)-76 56-75

680.1

## УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТ

Заведующая редакцией В. Е. ВИКТОРОВА

Редактор Л. К. НАСЕКИНА

Младший редактор М. М. МЕКШЕНКОВА

Оформление художника Е. Р. СКАКАЛЬСКОГО

Художественный редактор Е. М. ОМЕЛЬЯНОВСКАЯ

Технический редактор В. Н. КОРНИЛОВА

Корректор Т. С. ПАСТУХОВА

Сдано в набор 5 июня 1975 г. Подписано в печать 2 марта 1976 г.  
Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага типографская, № 2. Усл. печатных листов 20,16. Учетно-издательских листов 21,96. Тираж 25 000 экз. А03633.  
Заказ № 55. Цена 1 р. 48 к.

Издательство «Мысль». 117071. Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького  
Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136, Ленинград, П-136, Гатчинская ул., 26.