

УДК 519.7

М.Ф. Бондаренко, Ю.П. Шабанов-Кушнаренко

О БИОНИКЕ ИНТЕЛЛЕКТА

«Искусственный интеллект как область науки — это лишь малая часть грандиозной попытки постичь мышление. Мы считаем, что это основная цель данной области науки и здесь достигнуты немалые успехи. Программы, которые мы пишем, важны как эксперимент, а не как конечный результат. Главный интерес для нас составляет именно интеллект, а не его искусственное происхождение. Если мы достигнем успеха в этом направлении, то проложим путь для создания механических помощников человеку в его повседневных делах и заботах. Но не в этом главное. Самое важное, чего мы тогда добьемся, — более глубокого понимания самих себя, что, безусловно, гораздо ценнее, чем любая программа».

Роджер Шенк [1, с.26].

В статье дана общая характеристика бионики интеллекта как перспективного научного направления, ее предмета исследования, языка и методов формального описания, перспектив дальнейшего развития и области практического использования.

1. Анализ интеллекта

Изобретение в конце XVII столетия паровой машины дало начало *первой научно-технической революции*, в результате которой достигнуто многократное усиление физических возможностей человека за счет использования механизмов и машин. Примерами достижений первой научно-технической революции могут служить: паровая машина, паровоз, электрическая машина, атомная электростанция, космический корабль, самолет, автомобиль, телескоп, станки. В середине XX столетия были созданы универсальные цифровые вычислительные машины, которые стали двигателем *второй научно-технической революции*. Её результатом явилось усиление интеллектуальных возможностей людей за счет использования информационной техники. Технические устройства и системы, усиливающие интеллектуальные возможности людей, называются *искусственным интеллектом*. Интеллект человека и других созданных природой интеллектуальных систем называется *естественным интеллектом*. Примерами изделий второй научно-технической революции являются: телеграф, телефон, радио, телевизор, магнитофон, видеоманитофон, ЭВМ, персональный компьютер, роботы, Интернет, автоматизированные системы управления, экспертные системы, машинная графика. Первая научно-техническая революция направлена на познание *внешнего (объективного) мира*, вторая — *внутреннего (субъективного) мира* человека.

Родоначальником современных представлений об интеллекте является Рене Декарт (1596-1650). Первая научно-техническая революция стимулировала быстрое развитие физики внешнего мира и классической математики (в основном — числовой), которые стали её научным фундаментом. Прогрессу второй научно-технической революции призваны содействовать порождаемые ею физика и математика информационных процессов. Физика информационных процессов называется *физикой интеллекта* или физикой внутреннего мира. Математика информационных процессов имеет преимущественно не числовую, а логическую природу, иначе она называется *математикой интеллекта*. Логическая часть математики интеллекта называется *теорией интеллекта*. Основателем теории интеллекта является Готфрид Вильгельм Лейбниц (1646-1716). Математика интеллекта представляет собой математическое учение, ориентированное на познание природы интеллекта и на решение задач компьютеризации и информатизации. На рис. 1 показано соотношение между теорией интеллекта, математикой интеллекта и числовой математикой.

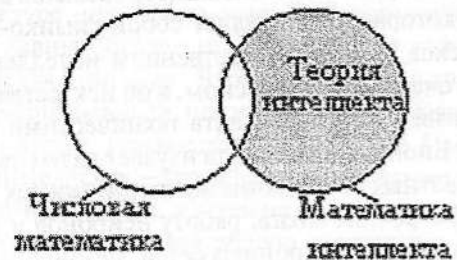


Рис. 1

Математика интеллекта используется как практический инструмент в физике и *технике интеллекта*. Задача физики интеллекта состоит в математическом описании естественных информационных процессов, наблюдаемых в природе, и искусственных информационных процессов, создаваемых техникой интеллекта. Математика интеллекта разрабатывает новый формальный язык и математические методы, необходимые для такого описания. Физика и техника интеллекта выдвигают перед математикой интеллекта новые задачи. Техника интеллекта ставит перед физикой интеллекта актуальные для нее задачи. Прямые и обратные связи (последние указаны жирными стрелками) между математикой, физикой и техникой интеллекта представлены на рис. 2.

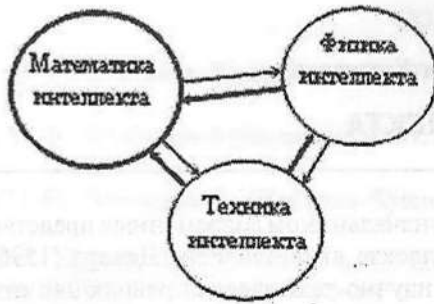


Рис. 2

Вместе взятые, физика и математика интеллекта образуют *анализ интеллекта*, который является научным фундаментом и инструментом в деле познания существующих и разработки новых интеллектуальных систем. Логическая часть анализа интеллекта называется *логическим анализом*. Основателем логического анализа является Бертран Рассел (1872–1970). Примерами объектов физики интеллекта могут служить: зрение, слух, восприятие, оценка ситуаций, принятие решений, язык, речь, мышление, внимание, узнавание, сознание, воля, творчество. Примеры объектов техники интеллекта: электронные схемы ЭВМ, программы для ЭВМ, базы данных и знаний, производственные системы, интеллектуальные агенты, фреймы, семантические сети, иерархические и динамические информационные системы, средства защиты информации.

Анализ интеллекта вливается в более широкое научное направление, называемое *бионикой интеллекта*, которая представляет собой физико-математическое учение о естественном интеллекте, в первую очередь человеческом, и об искусственном воспроизведении интеллекта техническими средствами. Бионика интеллекта изучает разум человека и животных, механизмы эволюции живых организмов, строение мозга, работу нейронов и образованных из них нейронных сетей, механизмы зрения, слуха, восприятия, речи, понимания, узнавания, принятия решений, оценивания и т. п. Она входит особым разделом в *бионику*, изучающую строение и функционирование живых организмов, которые рассматриваются как изделия некой разумной материальной системы, называемой *генетическим интеллектом*. Изделия генетического интеллекта гораздо совершеннее всего того, что может создать человек со всем своим умом. Отсюда вытекает, что генетический интеллект умнее человеческого, и полезно людям у него подучиться. Бионика предлагает добытые ею знания инженерам различного профиля в качестве подсказки при создании ими технических устройств. Бионика имеет много разных направлений соответственно тем областям техники, которые она обслуживает. Имеются, к примеру, строительная бионика, изучающая конструкцию костей и скелета животных, стро-

ение пчелиных сот как инженерных сооружений; гидробионика (форма и движения рыб); аэробионика (механизм полета птиц, форма крыла, движения крыльев).

Для дела совершенствования искусственного интеллекта важна задача формального описания интеллекта человека, любых иных видов естественного интеллекта. Компьютер – это математическая машина, она может усвоить только те знания, которые предварительно были выражены людьми на точном математическом языке. Не менее важна и задача формального описания искусственного интеллекта, который тоже нуждается в физико-математическом анализе. Известны три основных подхода к формальному описанию интеллекта: функциональный, субъективный и материальный. *Функциональный подход* заключается в анализе наблюдаемого извне поведения интеллектуальной системы. *Субъективный подход* заключается в наблюдении интеллектуальной системы изнутри (рис. 3).

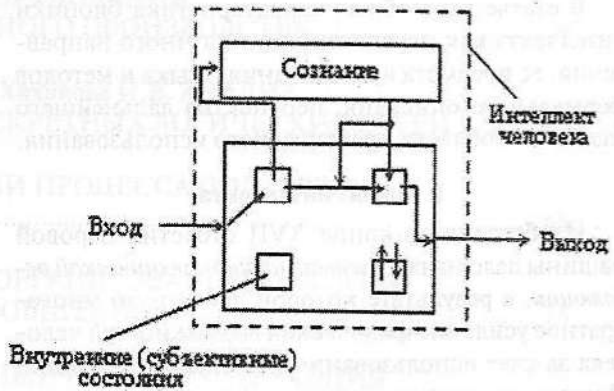


Рис. 3

Психические процессы представляют собой преобразования различных внутренних состояний интеллектуальной системы друг в друга. Психофизические процессы преобразуют состояния внешнего мира, информация о которых поступает в интеллектуальную систему, в ее внутренние состояния и обратно. *Материальный подход* состоит в том, что исследуется структура материального носителя интеллекта (например нейронных сетей мозга человека). Субъективный и функциональный подходы, соединенные вместе, образуют *идеальный подход*, который противостоит материальному. Субъективный и материальный подходы, вместе взятые, составляют *структурный подход*, который противостоит функциональному. Функциональный и материальный подходы, используемые совместно, образуют *объективный подход*, который противостоит субъективному. Связь между подходами выражается в виде треугольника анализа интеллекта (рис. 4).



Рис. 4

Всесторонний анализ интеллекта человека требует совместного использования всех подходов. Результаты такого анализа представляют интерес для разработчиков искусственного интеллекта. Анатомо-физиологические данные о мозге и нервной системе человека могут использоваться при разработке схем и отдельных элементов вычислительных машин. Сведения об интеллектуальных физических реакциях человека на внешние воздействия могут оказаться полезными при совершенствовании функций вычислительных устройств, выполняющих роль отдельных звеньев технических систем. Данные об интеллекте человека, полученные интроспективным путем, могут существенно помочь новым программным разработкам для диалоговых систем, а также любых других человеко-машинных систем, работающих в интерактивном режиме.

Исследование интеллекта человека — это трудоемкий, медленный и длительный процесс добычи информации. Нет ли способа сократить путь за счет получения готовой информации об интеллекте человека из какого-нибудь внешнего источника знаний, подобно тому как школьник получает знания из учебника? Один из таких способов — бионический — мы уже упомянули. Однако на бионическом пути тоже требуются исследования, быть может, не такие обширные, как если бы их пришлось выполнять без какой бы то ни было подсказки со стороны. Бионическая идея состоит в том, чтобы изучать изделие творца. Но можно обратиться непосредственно к замыслам творца человека, которым является генетический интеллект. Эти замыслы записаны в генетическом коде человека. Подсчитано, что запись этого кода на бумаге буквами латинского алфавита имела бы вид библиотеки, составленной из тысячи объемистых томов [2, с. 115]. Сегодня эта запись еще не прочитана полностью и не расшифрована, но в обозримом будущем она может стать источником ценной информации для разработчиков искусственного интел-

лекта. В этом направлении в настоящее время во всем мире ведутся интенсивные изыскания.

Представляется возможным и другой способ получения готовой информации об интеллекте человека. Этот способ еще более проблематичен, чем обращение к генетическому коду человека. У одного из авторов этой статьи обучался аспирант — профессиональный йог. Он утверждал, что с помощью медитации общается с высшим разумом. Для проверки справедливости этого утверждения аспиранту было предложено обратиться наверх для получения информации о механизме человеческого интеллекта. Аспирант приступил к делу и в результате за месяц написал текст объемом около 10 машинописных страниц. Текст имеет вид начальной части тщательно и квалифицированно написанного учебника о механизме человеческого интеллекта. В нем даются исчерпывающие (как утверждал аспирант — автор текста) перечень и характеристика подсистем (около десятка) интеллекта человека и связей между ними. Воспользоваться практически сообщаемыми в этом тексте сведениями разработчик искусственного интеллекта не имеет никакой возможности, так как текст обрывается «на самом интересном месте», и читатель остается в неведении, что же конкретно представляют собой эти подсистемы. У аспиранта было спрошено, когда же он доберется до самого низа и тем самым завершит свое описание механизма интеллекта человека. Он ответил: уровней в иерархической структуре интеллекта много; информация нарастает лавинообразно при переходе на каждый нижеследующий этаж. Чтобы все описать до конца и с исчерпывающей полнотой мне не хватит всей моей жизни. Тем все дело и кончилось. Исследования интеллекта — это движение снизу вверх: сначала изучаем детали, а затем на их основе постепенно воссоздаем все более общую картину его структуры. Обучение же механизму интеллекта — это движение сверху вниз. Пока не доберемся до самого низа, мы ничего конкретного не узнаем о механизме интеллекта. Чтобы изучить предмет, надо прочесть учебник до конца, а не довольствоваться его первыми страницами.

Различают частный и общий анализы интеллекта. *Частный анализ интеллекта* изучает конкретные интеллектуальные системы и их отдельные механизмы. Примерами разделов частного анализа интеллекта могут служить: анализ человеческого, машинного и генетического интеллекта; анализ механизмов зрения, слуха, узнавания, восприятия, понимания, оценивания и принятия решений. *Общий анализ интеллекта* изучает все то общее, что содержится во всевозможных интеллектуальных системах. С позиций общего анализа интеллекта любая интеллектуальная система представляет собой материальное воплощение некото-

рой части *универсальной логической алгебры*, разработка которой является одной из важнейших задач теории интеллекта. Разработка универсальной логической алгебры достигается главным образом за счет *алгебраизации логики*. Источниками идей для алгебраизации логики служат классическая математика, практика интеллектуальной деятельности человека, интроспективные сведения об интеллекте, физика и техника интеллекта, а также собственная логика развития теории интеллекта, логического анализа, бионики интеллекта. Приведем примеры разделов общего анализа интеллекта: алгебры булевых функций, отношений, множеств, предикатов, предикатных операций; теории линейных логических преобразований, моделей; учения о композиции и декомпозиции математических структур, об аксиоматических теориях, об алгебрах.

Анализ интеллекта входит составной частью в более широкую задачу *синтеза интеллекта*, которая схематически изображается в виде квадрата синтеза интеллекта. Проблема синтеза интеллекта разработана наукой и техникой еще очень слабо. Приведенная на рис. 5 схема синтеза интеллекта несовершенна, но лучшей схемы, насколько нам известно, пока нет. Вершины квадрата представляют собой учебу и исследование в области интеллектуальных систем, разработку и применение интеллектуальных систем. Противоположные стороны квадрата задают пары знание—изделие и производство—потребление, относящиеся к интеллектуальным системам. Каждая вершина квадрата подпитывается остальными. В процессе познания и совершенствования интеллектуальных систем квадрат синтеза интеллекта растет вверх и вправо в направлении всеведения и всемогущества. Интеллектуальная система обладает *всеведением*, если она все о себе знает, и *всемогуществом*, — если ей полностью подвластен собственный материальный носитель. Абсолютное всеведение и всемогущество для любой реально функционирующей интеллектуальной системы недостижимы, в этом — гарантия воз-



Рис. 5

можности не ограниченного во времени ее познания и совершенствования. Человеческий интеллект актуально не всеведущ и не всемогущ, но можно утверждать, что потенциально он этими свойствами все же обладает, поскольку человечество в целом может, развиваясь, достичь любого рубежа на пути самопознания и самосовершенствования. Можно также говорить и о потенциальном *бессмертии* биологического вида *homo sapiens*.

2. Компараторная идентификация

Человек, интеллектуальная деятельность которого изучается, называется испытуемым. Математическое описание любого процесса называется его идентификацией. Важной задачей анализа интеллекта является идентификация интеллектуальной деятельности человека. Различают прямую и косвенную идентификацию процессов. При прямой идентификации на вход идентифицируемого процесса f подаются сигналы x , выбираемые из некоторого множества A , и регистрируются ответные сигналы y на выходе процесса. Всевозможные сигналы y образуют множество B . Цель идентификации заключается в получении математического описания функции $f(x) = y$, отображающей множество A на множество B , которая характеризует ход (поведение) изучаемого процесса. Функция f называется характеристической функцией процесса (рис. 6).

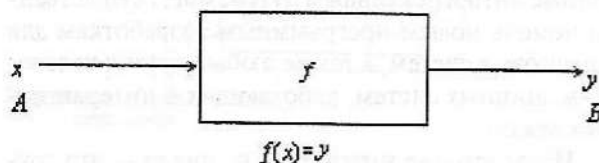


Рис. 6

Отличительная особенность прямой идентификации состоит в том, что входные и выходные сигналы изучаемого процесса доступны для прямого физического наблюдения и измерения. Методом прямой идентификации можно изучать только наблюдаемое извне поведение испытуемого, но не его внутренний субъективный мир. Приведем примеры прямой идентификации процесса: любой классический физический эксперимент, наблюдение за игрой в шахматы, наблюдение за работой ЭВМ, изучение поведения людей. Однако для информатизации представляют интерес не только разумное поведение людей, но и те внутренние субъективные состояния и информационные процессы, которые явились причиной этого поведения. Внутренние состояния субъективны, они недоступны для внешнего наблюдения. Для изучения внутренних состояний испытуемого метод прямой идентификации непригоден. Идентификация называется *косвенной*, если требуется найти характерис-

тическую функцию процесса в условиях, когда входной или выходной сигналы процесса недоступны для непосредственного физического наблюдения. При косвенной идентификации приходится, кроме самого процесса, математически описывать его неизвестные входные или выходные сигналы. Примерами косвенной идентификации процесса могут служить: определение с берега расстояния до плывущего в море корабля, измерение высоты пирамиды Хеопса, предсказание времени солнечного затмения. Найдя метод решения этих и подобных им задач, Фалес Милетский в 6 веке до н.э. положил начало косвенной идентификации.

В математике интеллекта разрабатывается и изучается, а в физике и технике интеллекта широко используется *компараторная идентификация*, являющаяся одним из важных видов косвенной идентификации. Компаратором K называется устройство с m входами y_1, y_2, \dots, y_m и одним выходом t (рис. 7).

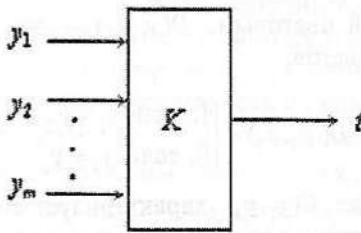


Рис. 7

Здесь t — двоичная реакция компаратора, $t \in \Sigma$, $\Sigma = \{0, 1\}$; y_1, y_2, \dots, y_m — внутренние состояния информационной системы, $y_1 \in B_1, y_2 \in B_2, \dots, y_m \in B_m$; B_1, B_2, \dots, B_m — вообще говоря, различные множества внутренних состояний. Приведем примеры внутренних состояний информационной системы: для человека — ощущение, присутствующее в поле зрения в данный момент времени; цвет и яркость зрительного ощущения в данной точке поля зрения; слуховое ощущение, его громкость и тембр; мысли, эмоции, намерения, оценки, представления, восприятия; для ЭВМ — текст или рисунок в файле, программа с некоторым именем, двоичный код в заданном регистре.

Компаратор устанавливает, находятся или нет его входные сигналы y_1, y_2, \dots, y_m в заданном отношении K . Если — да, то он реагирует сигналом $t=1$, если — нет, то сигналом $t=0$. Примеры компаратора: сознание человека, сравнивающее ощущение цветов или звуков на равенство, определяющее, является ли один заданный звук громче другого, устанавливающее предпочтение субъективной оценки одного места работы другому, сравнивающее оценки вариантов при выборе мужа, жены, друга, вуза, устанавливающее, соответствует ли смысл данного утверждения знаниям о заданной ситуации, следует ли заданное математическое утверждение

В из математического утверждения A , присутствуют ли конкретной словоформе заданный падеж (например, «синей, родительный» — да; «столом, родительный» — нет), правилен ли ответ студента на экзамене, является ли данный цвет красным; программа ЭВМ, определяющая, имеются ли в тексте орфографические ошибки, русский ли это текст, содержит ли вводимый в машину текст вирусы, совпадают ли два заданные текста, выражают ли два предъявленные предложения одну и ту же мысль, соответствует ли данный рисунок словесному описанию. Своим поведением компаратор реализует предикат $K(y_1, y_2, \dots, y_m) = t$, соответствующий отношению K , который называется предикатом компаратора. Ко входам компаратора K подключаются своими выходами идентифицируемые информационные процессы f_1, f_2, \dots, f_m (рис. 8). Здесь $x_1 \in A_1, x_2 \in A_2, \dots, x_m \in A_m$ — физические сигналы; A_1, A_2, \dots, A_m — множества физических сигналов различного типа.

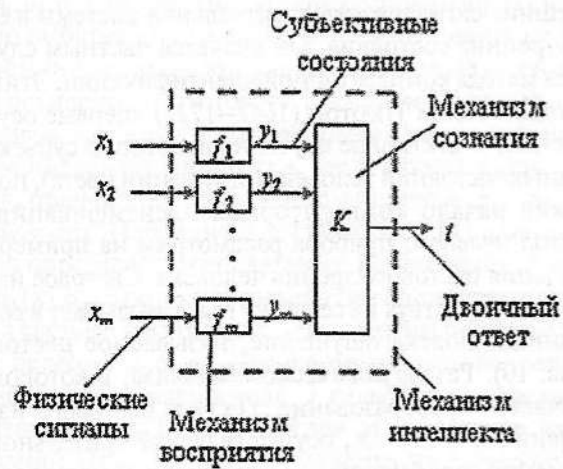


Рис. 8

Информационные процессы, вместе с подсоединенным к ним компаратором, называются идентифицируемым объектом (рис. 9). Символом P обозначен предикат объекта $P(x_1, x_2, \dots, x_m) = t$. Он выражается, если верить субъективному свидетельству испытуемого, в следующем виде:

$$P(x_1, x_2, \dots, x_m) = K(f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_m(x_m)).$$

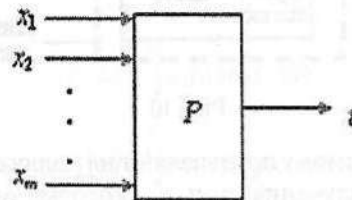


Рис. 9

Сигналы $y_1 = f_1(x_1), y_2 = f_2(x_2), \dots, y_m = f_m(x_m)$ являются внутренними состояниями объекта P ,

недоступными для внешнего наблюдения. Примерами идентифицируемых объектов могут служить: человек, устанавливающий, равны или нет цвета двух предъявленных ему световых излучений; ЭВМ на атомной электростанции, блокирующая неправильные действия обслуживающего персонала. Простейшая задача компараторной идентификации заключается в том, чтобы по заданному компаратору и по известным свойствам объекта P математически описать выходные сигналы y_1, y_2, \dots, y_m процессов f_1, f_2, \dots, f_m и сами эти процессы. Более сложные задачи компараторной идентификации возникают, когда приходится одновременно рассматривать систему объектов P_1, P_2, \dots, P_n , связанных друг с другом, где n — число объектов в системе.

3. Метод нулевого прибора

Метод нулевого прибора представляет собой наиболее употребительное средство объективного изучения внутренних состояний и преобразований внешних сигналов интеллектуальной системы в её внутренние состояния. Он является частным случаем метода компараторной идентификации. Этим методом Исаак Ньютон (1642–1727) впервые осуществил объективное изучение некоторых субъективных состояний человека (ощущений цвета), положив начало компараторной идентификации. Метод нулевого прибора рассмотрим на примере изучения цветового зрения человека. Световое излучение, действуя на сетчатку глаза, вызывает в сознании человека ощущение, называемое цветом (рис. 10). Раздел логического анализа, в котором изучается преобразование $f(x) = y$ светового излучения x в цвет y , осуществляемое зрительной системой человека, называется теорией цветового зрения.

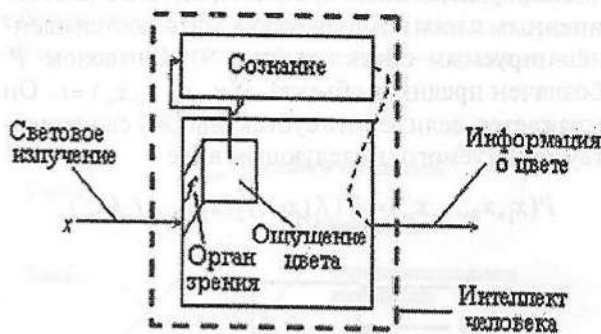


Рис. 10

Испытуемому предъявляют на полях сравнения световые излучения x_1 и x_2 , которые он воспринимает в виде цветов y_1 и y_2 . Если цвета совпадают друг с другом, то испытуемый должен отреагировать ответом $t=1$, если же не совпадают, то — ответом $t=0$ (рис. 11).

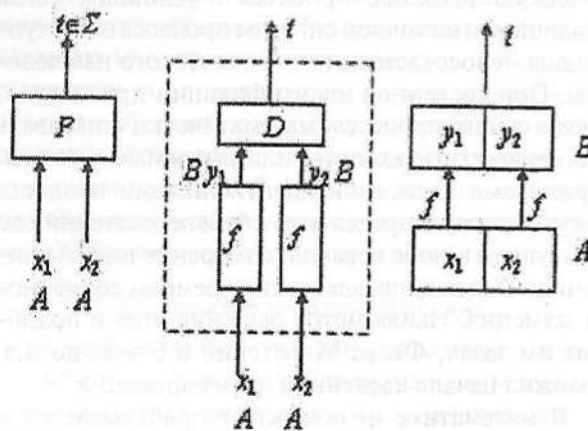


Рис. 11

Своим поведением испытуемый (если верить его субъективному свидетельству) реализует предикат

$$P(x_1, x_2) = D(f(x_1), f(x_2)),$$

называемый цветовым. $D(y_1, y_2)$ — это предикат равенства цветов:

$$D(y_1, y_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } y_1 = y_2 \\ 0, & \text{если } y_1 \neq y_2 \end{cases}$$

Предикат $D(y_1, y_2)$ характеризует собой действие механизма сознания испытуемого, анализирующего ощущения цвета y_1, y_2 и устанавливающего их равенство или неравенство. Функция $f(x) = y$ характеризует собой преобразование объективного светового излучения x в субъективный цвет y , осуществляемое зрительной системой человека. Компаратор, реализующий предикат равенства, называется нулевым прибором.

Чисто объективные опыты на испытуемом с высокой точностью демонстрируют, что предикат P рефлексивен $\forall x \in A P(x, x)$, симметричен $\forall x_1, x_2 \in A (P(x_1, x_2) \supset P(x_2, x_1))$ и транзитивен $\forall x_1, x_2, x_3 \in A (P(x_1, x_2) \wedge P(x_2, x_3) \supset P(x_1, x_3))$. Любой двуместный предикат, обладающий свойствами рефлексивности, симметричности и транзитивности, называется предикатом эквивалентности. Рефлексивность цветового предиката означает, что одинаковые излучения порождают одинаковые цвета. Симметричность цветового предиката означает, что при перестановке излучений местами равенство цветов не нарушается. Транзитивность цветового предиката означает, что если цвета первого и второго излучений равны, а также равны цвета второго и третьего излучений, то цвета первого и третьего излучений также будут равны.

Теорема об общем виде предиката эквивалентности. Любой предикат эквивалентности и только предикаты эквивалентности можно представить в виде $P(x_1, x_2) = D(f(x_1), f(x_2))$ при подходящем выборе множества B и функции $f: A \rightarrow B$ ($x_1, x_2 \in A$).

Функция f называется характеристической функцией эквивалентности. Характеристическая функция цветового предиката математически выражает процесс преобразования зрительной системы человека светового излучения в цвет. В теории цветового зрения существование (в логическом смысле этого слова) цвета $у$ и функции $f(x) = у$, преобразующей световое излучение в цвет, выводится с помощью только что приведенной теоремы лишь из характера двоичных ответов испытуемого, иначе говоря, только из объективно наблюдаемых свойств цветового предиката. Таким образом, опираясь лишь на факты наблюдаемого извне поведения испытуемого и не прибегая к интроспективному свидетельству испытуемого, мы установили существование цвета $у$ светового излучения x и наличие преобразования $f(x) = у$. Однако, что собой конкретно представляет цвет $у$ и преобразование f , мы пока не знаем.

Для отыскания конкретного описания цвета $у$ и функции f привлекаем дополнительные свойства предиката P : его аддитивность, однородность, трехмерность и непрерывность, которые проверяются в чисто объективных, хотя и непростых, экспериментах на испытуемом. Аддитивность формулируется следующим образом: $\forall x_1, x_2, x'_1, x'_2 \in A$ ($f(x_1) = f(x_2) \wedge f(x'_1) = f(x'_2) \supset f(x_1 + x'_1) = f(x_2 + x'_2)$). Записывая аддитивность цветового предиката P , с целью придания ей более удобочитаемого вида, мы использовали выражение $f(x'_1) = f(x_2)$ вместо равносильного ему выражения $P(x_1, x_2) = 1$. Теперь это можно делать, поскольку существование функции f и ее значений уже доказано. В формулировке же свойств рефлексивности, симметричности и транзитивности такая замена была бы невозможна. Сложение $x_1 + x_2$ световых излучений x_1, x_2 достигается их совмещением в пространстве (для этого используется специальная оптическая аппаратура). Аддитивность цветового предиката означает, что суммы равноцветных излучений равноцветны.

Однородность формально записывается в виде $\forall x_1, x_2 \in A \forall \alpha \in R$ ($f(x_1) = f(x_2) \supset f(\alpha x_1) = f(\alpha x_2)$). Здесь α — любое действительное число, $\alpha \in R$, R — множество всех действительных чисел. Умножение αx излучения $x = x(\lambda)$ на неотрицательное число α достигается изменением его мощности в α раз при сохранении его спектрального состава (это можно сделать, к примеру, с помощью дифрагмирования). Пример умножения спектра $x(\lambda)$ светового излучения x на число 2 показан на рис. 12.

Здесь λ — длина волны световых колебаний; $x(\lambda)$ — спектр светового излучения (зависимость его мощности x от длины волны λ); $[\lambda_1, \lambda_2]$ — диапазон длин волн световых колебаний; $\lambda_1 = 0,4$ мкм

(фиолетовые световые колебания); $\lambda_2 = 0,8$ мкм (красные световые колебания). Умножение излучения на отрицательное число означает его перемещение на противоположное поле сравнения. Однородность цветового предиката означает, что равноцветные излучения после умножения их на одно и то же число снова будут равноцветными.

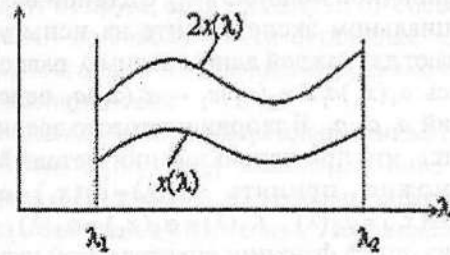


Рис. 12

Трехмерность формально описывается следующим образом: $\exists a_1, a_2, a_3 \in A \forall x \in A \exists! \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \in R$ ($f(x) = f(\alpha_1 a_1 + \alpha_2 a_2 + \alpha_3 a_3)$) при единственном наборе чисел $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \in R$. Световые излучения a_1, a_2, a_3 и их цвета называются основными. Их можно выбирать по-разному. В роли основных цветов обычно используют красный, зеленый и синий. Трехмерность цветового предиката означает, что смесь $\alpha_1 a_1 + \alpha_2 a_2 + \alpha_3 a_3$ основных излучений можно подравнять по цвету к цвету любого излучения x , причем при единственном варианте пропорций $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$. Набор чисел $\alpha_1(x), \alpha_2(x), \alpha_3(x)$ однозначно определяет цвет светового излучения x . Числа $\alpha_1(x), \alpha_2(x), \alpha_3(x)$ называются координатами цвета светового излучения x в цветовом пространстве с базисом a_1, a_2, a_3 . Для формулировки непрерывности принимаем в роли A гильбертово пространство $L_2[\lambda_1, \lambda_2]$ всех спектров $x(\lambda)$ световых излучений. При непрерывном изменении светового излучения $x \in L_2[\lambda_1, \lambda_2]$ числа $\alpha_1(x), \alpha_2(x), \alpha_3(x)$ изменяются непрерывно. Любой аддитивный, однородный и непрерывный предикат называется линейным предикатом.

Теорема об общем виде трехмерного линейного предиката эквивалентности. Характеристическая функция $f: L_2[\lambda_1, \lambda_2] \rightarrow R^3$ любого трехмерного линейного предиката эквивалентности может быть представлена в виде:

$$y = f(x) = (\alpha_1(x), \alpha_2(x), \alpha_3(x)),$$

где

$$\alpha_1(x) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} x_1(\lambda) K_1(\lambda) d\lambda;$$

$$\alpha_2(x) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} x_2(\lambda) K_2(\lambda) d\lambda;$$

$$\alpha_3(x) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} x_3(\lambda) K_3(\lambda) d\lambda$$

при подходящем выборе функций $K_1(\lambda), K_2(\lambda), K_3(\lambda)$.

$P(x_1, x_2)$, называемый цветовым. Первый этаж рассмотренной нами ранее теории цветового зрения — теория эквивалентности. Она основывается на трех аксиомах: рефлексивности, симметричности и транзитивности. Вторым этажом теории цветового зрения служит линейная интегральная теория. Она базируется на аксиомах аддитивности, однородности, трехмерности и непрерывности. В конечномерном варианте цветовой теории достаточно иметь в ней аксиомы аддитивности, однородности и трехмерности, а в бесконечномерном — аддитивности, трехмерности и непрерывности. 2) Теория натурального ряда. В ней фигурируют два объекта — предикат $N(x)$, выражающий понятие множества всех натуральных чисел, и предикат $Q(x, y)$, представляющий собой понятие счета. Предикат $Q(x, y)$ выражает связь произвольно выбранного числа x в натуральном ряду с числом y , непосредственно следующим за ним. Теория натурального ряда основывается на аксиомах всюду определенности $\forall x \in N \exists y \in N Q(x, y)$, однозначности $\forall x, y, z \in N (Q(x, y) \wedge Q(x, z) \supset D(y, z))$, инъективности $\forall x, y, z \in N (Q(x, z) \wedge Q(y, z) \supset D(x, y))$, единицы $\exists! y \in N \forall x \in N \neg Q(x, y)$ (единица y , определяемая этой аксиомой обозначается символом 1) и математической индукции $\forall M \subseteq N (M(1) \wedge \forall x, y \in N (M(x) \wedge Q(x, y) \supset M(y)) \supset \forall x \in N M(x))$. Аксиома всюду определенности означает, что для каждого натурального числа существует хотя бы одно непосредственно следующее за ним в натуральном ряду натуральное число. Смысл аксиомы однозначности состоит в том, что за каждым натуральным числом не может непосредственно следовать более одного натурального числа. Вместе взятые, эти две аксиомы постулируют существование функции счета $q(x) = y$. Аксиома единицы гласит, что в натуральном ряду имеется единственное число 1, которому непосредственно не предшествует ни одно натуральное число. Аксиома математической индукции выражает следующую мысль. Если некоторым свойством обладает число 1, и из предположения, что этим свойством обладает произвольно выбранное натуральное число, логически вытекает, что тем же свойством обладает и число, непосредственно следующее за ним, тогда таким свойством обладают все натуральные числа.

Совокупность истинных высказываний об объектах P_1, P_2, \dots, P_n называется теорией T этих объектов. Совокупность каких-либо высказываний теории T , из которых можно логически вывести любое истинное высказывание теории T (и только истинные высказывания), называется системой аксиом теории T . Для создания аксиоматических теорий нужно уметь выполнять многие виды работ. К примеру, необходимы опытная проверка аксиом, поиск и формулировка аксиом, разработка ал-

гебро-логического языка для записи аксиом, разработка теории построения аксиоматических теорий, упрощение формулировки отдельных аксиом, разработка методов упрощения аксиом и их совокупности, проверка на полноту и несократимость системы аксиом, сокращение до минимума числа аксиом в системе. Аксиомы называются независимыми друг от друга, если ни одну из них невозможно вывести из совокупности остальных. Система аксиом, состоящая из независимых аксиом, называется несократимой.

Интеллект человека формально рассматривают как систему $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ взаимосвязанных объектов P_1, P_2, \dots, P_n , каждый из которых характеризует один из механизмов интеллекта. Теория интеллекта представляет собой теорию системы объектов. В своем нынешнем состоянии теория интеллекта еще не может формально представить человеческий интеллект как единую, полную и завершенную систему взаимосвязанных механизмов. Дело осложняется еще и тем, что человеческий интеллект — система развивающаяся. Пока что осуществляется изолированное изучение отдельных, причем наиболее простых, механизмов интеллекта. Укажем примеры механизмов интеллекта: зрение, слух, осязание, узнавание, понимание, язык, мышление, сознание, эмоции, воля, критика, воображение, оценивание, творчество, интуиция, подсознание, умения, знания, потребности, совесть, привычки, внимание, идеалы, способности, обучение, развитие.

Набор конкретных предикатов $(P_1^*, P_2^*, \dots, P_n^*)$, удовлетворяющий аксиомам теории T , называется моделью теории T . В системе (1) символы P_1, P_2, \dots, P_n обозначают переменные предикаты. Полагаем $P_1 = P_1^*, P_2 = P_2^*, \dots, P_n = P_n^*$. Возможны случаи, когда аксиомам теории удовлетворяет единственная модель, много моделей или им не удовлетворяет никакая модель. Система аксиом, для которой не существует ни одной модели, называется противоречивой. Для практических применений противоречивые теории бесполезны. Противоречивая теория называется полной, если добавление к ее аксиомам любой независимой от них аксиомы делает ее противоречивой. Теория, основанная на аксиомах рефлексивности, симметричности и транзитивности, неполна. Это следует из того, что добавление к ним аксиом аддитивности, трехмерности, однородности и непрерывности не сделало эту теорию противоречивой.

Теория называется однозначной, если ей удовлетворяет единственная модель. Приведем примеры однозначных теорий: теория сложения и умножения натуральных чисел, теория равенства на произвольно выбранном множестве предметов, которая основывается на единственной аксиоме (законе Лейбница):

$$\forall x, y \in A (D(x, y) \sim \forall P \subseteq A (P(x) \sim P(y)))$$

Примеры неоднозначных теорий: теория эквивалентности, интегральная теория цвета. Если теория неоднозначна, то, вообще говоря, возможна её конкретизация, что мы и видим на примере теории цветового зрения. Отыскивая функции спектральной чувствительности зрения, мы тем самым осуществляем конкретизацию интегральной теории цвета. Теория называется категоричной, если все её модели изоморфны друг другу. В категоричной теории любые ее две модели могут различаться только терминологически, по существу же они идентичны. Приводим примеры категоричных теорий: евклидова геометрия, арифметика натуральных, рациональных и действительных чисел, теория арифметического пространства фиксированной размерности. Примеры некатегоричных теорий: теория эквивалентности, теории групп и полугрупп, теория множеств.

Запись семейства всех моделей теории T в виде некоторой формулы называется общим видом модели теории T . Примерами общего вида модели теорий могут служить: общий вид эквивалентности $P(x_1, x_2) = D(f(x_1), f(x_2))$, выражения (1) для цветовых интегралов в интегральной теории цвета. Общий вид модели получаем в результате решения системы логических уравнений. Структурной идентификацией объектов называется такое их экспериментальное и теоретическое изучение, которое завершается формулированием аксиом теории и отысканием общего вида моделей этих объектов. Параметрической идентификацией объектов называется такое их экспериментальное и теоретическое изучение, которое завершается отысканием конкретных значений параметров общего вида модели этих объектов. Аксиоматические теории классической математики и теории интеллекта имеют разную направленность: первые направлены на вывод теорем из аксиом; вторые — на отыскание общего вида и параметров модели объектов со свойствами, выраженными аксиомами теории. Приведем примеры возможной области практического применения моделей информационных объектов: эргономика, инженерная психология, автоматическая обработка текстов, робототехника, телевидение, поиск научной и деловой информации в Интернете, машинная графика, экспертные системы, базы знаний, объектное моделирование.

5. Мозгоподобные ЭВМ

Напрашивается вопрос: может ли бионика интеллекта указать магистральное направление для дальнейшего развития компьютеризации и информатизации? Представляется, что такое направление существует и оно состоит в создании мозгоподобных ЭВМ, основанных на принципе параллельного действия. Известный авторитет в области компьютеризации и информатизации, один из бога-

тейших и влиятельнейших людей в мире Билл Гейтс называет систему машинной обработки информации, основанную на принципах работы мозга, *электронной нервной системой* [3, с. 16]. Он прочит ей большое будущее. Настоятельная потребность в ней возникла в связи с развитием Интернета — всемирной информационной сети, охватившей сегодня все сферы жизни. Гейтс даже переключил на ее создание и совершенствование все силы возглавляемой им корпорации.

Нынешние ЭВМ массового применения (в том числе и персональные компьютеры) имеют по сравнению с мозгом человека серьезный недостаток. Это — машины последовательного действия, тогда как мозг человека — система параллельного действия. Резервы увеличения быстродействия решающих элементов ЭВМ исчерпываются. Остается путь наращивания числа одновременно работающих элементов в процессоре компьютера. Уже сейчас имеется практическая возможность, опираясь на успехи микроминиатюризации и удешевления электронных элементов и на достижения в области автоматизации проектирования и изготовления ЭВМ, строить компьютеры с числом элементов до 10^{15} . Однако применительно к нынешним ЭВМ последовательного действия, работающим по принципу программного управления Джона фон Неймана, делать это не имеет смысла, поскольку в них в каждый момент времени одновременно находится в работе лишь небольшое число элементов. Попытки же перехода к машинам параллельного действия пока не дают ожидаемого роста их производительности. Так, например, производительность многопроцессорных ЭВМ растет не пропорционально числу имеющихся в ней процессоров, как, казалось бы, должно быть, а гораздо медленнее. Возникают существенные трудности также и при попытках создания высокопроизводительных нейрокомпьютеров, которые строятся в виде сетей из формальных нейронов. Между тем, существует «вычислительная машина», созданная Природой, а именно — мозг человека, для которой проблема полноценного распараллеливания обработки информации полностью решена.

Мозг человека по сравнению с современной ЭВМ — тихход. О его «тактовой частоте» можно судить по пропускной способности нервных волокон. Известно, что каждое нервное волокно может пропускать не более 10^3 импульсов в секунду. По проводникам же нынешних ЭВМ передается порядка 10^9 импульсов в секунду. Следовательно, ЭВМ превосходит мозг человека в смысле скорости работы решающих элементов в $10^9 : 10^3 = 10^6$ раз. Тем не менее, по своей производительности мозг превосходит любую ЭВМ. Это обусловлено тем, что мозг человека имеет в своем составе около 10^{15} решающих элементов (в роли которых выступают си-

напсы — стыки между окончаниями нервных волокон), и все они, как свидетельствуют нейрофизиологические данные, работают одновременно. В ЭВМ же последовательного действия в любой момент времени одновременно работает в среднем не более 10^3 элементов. Таким образом, в смысле числа параллельно работающих элементов мозг превосходит машину в $10^{15} : 10^3 = 10^{12}$ раз. В итоге, по своей производительности мозг превосходит современную вычислительную машину последовательного действия в $10^{12} : 10^6 = 10^6$ раз.

Если бы удалось создать ЭВМ параллельного действия, работающую по принципам мозга, которая имеет 10^{15} элементов (последнее, как говорилось выше, возможно уже сейчас), то в результате была бы получена машина, превосходящая по производительности мозг человека в $10^9 : 10^3 = 10^6$ раз. Итак, ЭВМ параллельного действия, работающая по принципам мозга и построенная на современной элементной базе (она называется *мозгоподобной ЭВМ*, по-английски — *brainlike computer*), согласно вышеприведенным оценкам, в случае ее создания будет превосходить нынешние ЭВМ последовательного действия в 10^{12} раз, а мозг человека — в 10^6 раз. Если мозгоподобные ЭВМ удастся создать, то это приведет к значительному повышению темпов компьютеризации и информатизации. Пионеры искусственного интеллекта А. Ньюэлл, Дж. Шоу и Г. Саймон еще в конце 50-х годов XX столетия провозгласили, что глубинный смысл компьютеризации и информатизации заключается в том, чтобы побудить людей заняться познанием самих себя и снабдить их достаточными для этого средствами [4]. Представляется, что в результате создания мозгоподобных ЭВМ появятся небывалые возможности для самопознания и самоусовершенствования самого человека.

Почему же специалисты по нейрокомпьютерам до сих пор не смогли построить мозгоподобную ЭВМ с указанной выше производительностью, несмотря на то, что занимаются они этой проблемой уже около полувека? Попытку ответа на этот вопрос можно найти в книге Д. Хьюбела «Глаз, мозг, зрение» — Нобелевского лауреата, одного из крупнейших в мире специалистов в области анатомии и физиологии нейронных сетей головного мозга человека. Он пишет: «Иногда говорят, что нервная система содержит огромное число случайных межнейронных соединений. Хотя упорядоченность связей и в самом деле не всегда очевидна, я подозреваю, что те, кто говорит о случайных нейронных сетях, не утруждали себя ознакомлением с нейроанатомией. Даже беглый просмотр такой книги, как труд Кахала «Гистология нервной системы», достаточно убеждает кого угодно в том, что в чудовищной сложности нервной системы почти всегда можно усмотреть известную степень упорядочен-

ности. Когда мы видим правильные ряды клеток в мозгу, впечатление создается такое же, как если бы мы рассматривали телефонную станцию, печатный станок или внутренность телевизора, — становится несомненным, что упорядоченность служит какой-то цели. Столкнувшись с тем или иным человеческим изобретением, мы едва ли усомнимся в том, что агрегат в целом, так же как и его отдельные части, обладает вполне постижимыми функциями. Чтобы понять их, нам нужно только прочесть ряд инструкций. В биологии появляется аналогичная вера в функциональную обоснованность и в конечном итоге даже в постижимость структур, которые не были изобретены кем-то, а совершенствовались на протяжении миллионов лет эволюции. Задача нейробиолога ... состоит в том, чтобы выяснить связь порядка и сложности с функцией» [5, с. 14].

Высказывание Хьюбела можно понять в том смысле, что технические нейронные сети — это не совсем то, а вернее — совсем не то, чем являются их биологические прототипы. Можно не согласиться с Хьюбелом лишь в одном: к такому положению привело не нежелание инженеров знакомиться с биологическими нейронными сетями, а вынужденное незнание ими принципов их функционирования. В то время как анатомия (то есть строение) нейроструктур на микроскопическом уровне в настоящее время хорошо изучена (выявление и классификация их основных типов были в основном завершены в начале XX века), исследование физиологии (то есть функции) этих структур, несмотря на отдельные достижения, до сих пор буксует. Поэтому инженерам приходится на свой страх и риск самим строить произвольные гипотезы о принципах действия нейронных структур.

В нашем Университете на протяжении последних 40 лет разрабатывается упоминавшаяся ранее бионика интеллекта, в рамках которой предпринята попытка сдвинуть с мертвой точки решение обсуждаемой здесь проблемы. Суть подхода состоит в том, что интеллект человека рассматривается как логика в действии, как некоторое материальное воплощение механизма логики. Были выполнены работы по алгебраизации логики. В результате разработана специальная алгебра для формульного представления отношений и действий над ними. Отношения интерпретируются как мысли интеллекта, а действия над ними — как мышление. Схемная реализация формул этой алгебры приводит к характерным инженерным сетям, которые называются *логическими сетями*.

Каждый тип отношений и операций над ними (а таких типов сравнительно немного) приводит к своему типу логических сетей с легко узнаваемой на глаз архитектурой. При сопоставлении этих типов сетей с основными типами нейроструктур обнаруживается поразительное сходство архитекту-

ры технических и биологических конструкций. Опираясь на это сходство, можно определить функции различных типов нейронных структур и описать в точных математических и технических терминах принципы функционирования мозга. Главное в данном методе — это движение сверху вниз: от общих системных соображений к алгебро-логическим конструкциям, а от них — к логическим сетям, которые затем отождествляются с биологическими нейронными структурами. Специалисты же по нейрокомпьютерам сегодня пытаются идти иным путем: от архитектуры биологических нейронных сетей к угадыванию принципов их действия. По этим гипотетическим принципам строятся формальные нейроны и сети из них. Из-за серьезного дефицита знаний о функциях биологических нейронных структур трудно ожидать, что результат такого «угадывания» приведет к эффективно действующим схемам мозгоподобных ЭВМ. Двигаясь же по пути алгебраизации логики, мы принудительно приходим к естественным принципам построения мозгоподобных ЭВМ. Свернуть в сторону на этом пути нет никакой возможности. В результате вырисовываются простые и ясные способы построения мозгоподобных ЭВМ. Насколько нам известно, они существенно отличаются от всего того, что до сих пор предлагалось для параллельной обработки информации, в частности — при создании ЭВМ параллельного действия.

Важное направление исследований состоит в том, чтобы проводить детальное сравнение структуры логических сетей со структурой биологических нейронных сетей. Эта работа содействует познанию принципов функционирования мозга человека. Если в результате такой работы аналогия между логическими и естественными нейронными сетями будет все более подтверждаться и углубляться, это будет вселять все большую уверенность в том, что алгебраизация логики — правильный путь развития, и что она является главным методом познания интеллекта. Кроме этого обстоятельства, алгебраизация логики и создание прогрессивных ЭВМ не зависят от изучения естественных структур мозга. Впрочем, всегда полезно свериться с решениями природы, поскольку изучение нейронных структур мозга может привести к новым идеям и в области алгебраизации логики.

6. Заключение

Что же ожидает людей в свете перспективы создания мозгоподобных ЭВМ? Не загонит ли технический прогресс человечество в безысходный тупик? На этот вопрос лучше всех, на наш взгляд, ответил еще в 1968 году известный московский математик Г.Н. Поваров в предисловии к русскому изданию книги «Кибернетика» основателя кибер-

нетики Норберта Винера: «Действительно, научно-технический прогресс ставит перед человечеством серьезные проблемы. Стремительное развитие науки и техники возлагает на нас колоссальную ответственность за разумное использование полученного нами могущества. «Кто живет в стеклянном доме, тот не должен бросать камней», — гласит старинная поговорка. Человек стал настолько могущественным, что любое его нерассчитанное движение: с роботами, с атомной энергией, с химией — может иметь тяжелые непредвиденные последствия. Это парадокс могущества. Нельзя забывать, однако, что наука и техника не только возлагают новую ответственность на человека, но и доставляют ему новые средства справиться с нею. Это относится и к роботам. Альтернатива «человек или робот», «опасное развитие искусственного разума или своевременный отказ от него», чем ограничивается большинство авторов, имеет третье, более необычайное и, пожалуй, более вероятное решение, если только искусственный разум и искусственная жизнь вообще возможны. Человек, научившийся создавать искусственный разум и искусственную жизнь, не остановится перед коренной переделкой самого себя. Не роботы вместо людей, а новый человек вместо старого! Человек будущего вряд ли останется таким же «натуральным» существом, таким же теплокровным позвоночным, каким он вышел из горнила естественного отбора. Почти наверное, он будет искусственно развивать свой мозг и свое тело, будет по воле лепить и изменять свою физическую оболочку. Ему по силам быть впереди любого возможного робота. Это будет биологическая революция, и если смелые гипотезы оправдаются, она будет означать преобразование всего человеческого существования. Быть может, далекий смысл «безумной» винеровской идеи о передаче человека по телеграфу и есть достижение человеком перевоплощаемости? Позволим себе минуту фантазии: не станет ли тогда человек новым космическим существом, свободным от земных ограничений? Есть ли абсолютная граница могущества и сложности для человека и его творений, абсолютная граница могущества и сложности для саморазвивающихся систем вообще?... Впрочем, это вопросы для науки будущего, на которые она сумеет ответить лучше нас» [6, с. 26–27].

Список литературы: 1. Шенк Р., Хантер Л. Познать механизмы мышления // Реальность и прогнозы искусственного интеллекта. М.: Мир, 1987. 287 с. 2. Кендью Д. Нить жизни. М.: Мир, 1968. 123 с. 3. Гейтс Б. Бизнес со скоростью мысли. 2-е изд. М.: ЭКСМО, 2004. 478 с. 4. Newell A., Shaw I.C., Simon H.A. Empirical explorations with the logic theory machine. Proceedings of the Western Joint Computer Conference. 1957. P. 218–239. 5. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. М.: Мир, 1990. 239 с. 6. Винер Н. Кибернетика. 2-е изд. М.: Сов. радио, 1968. 326 с.

Поступила в редколлегию 24. 11. 2004