

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Проблема происхождения жизни и мышления с точки зрения современной физики

Д.С. Чернавский

При попытках физического описания возникновения живых существ из неживой материи возникают трудности, связанные с оценками маловероятных событий. Показано, что эти трудности — результат предвзятого понимания слова "кодирует". Они снимаются, если принять, что в первичных организмах (гиперциклах) полинуклеотид не "кодировал", а катализировал образование белка. Рассмотрен реалистический сценарий такого процесса, включая возникновение единого кода. Обсуждается проблема мышления и образование соответствующего аппарата в эволюции. Для этой цели приведен анализ понятий: информация, ценная информация и генерация информации. Показано, что мышление в значительной мере сводится к распознаванию образа. Рассмотрен возможный молекулярный механизм процесса распознавания. Показано, что возникновение подобного механизма в эволюции вполне вероятно.

PACS numbers: 87.10.+e, 87.15.-v, 87.90.+y, 89.70.+c

Содержание

1. Введение (157).
 2. Проблема возникновения жизни (158).
 - 2.1. Ранние стадии биологической эволюции. 2.2. Молекулярные аспекты механизма авторепродукции. 2.3. Варианты первичного биосинтеза. 2.4. Выбор единого кода.
 3. Проблема биологической асимметрии (164).
 4. Проблема темпов биологической эволюции (166).
 5. Информация и информатика (167).
 - 5.1. Информация и ее свойства. 5.2. Ценность информации. 5.3. Информатика, ее предмет и фундаментальные задачи.
 6. Проблема возникновения мышления (174).
 - 6.1. Основные свойства процесса мышления. 6.2 Экскурс в теорию распознавания. 6.3. Нейрокомпьютинг. 6.4. Мышление и распознавание образа.
- Список литературы (183).

1. Введение

Проблема происхождения жизни является предметом специального направления биофизики (Life origin), и пока остается дискуссионной. Существующие точки зрения отражены в монографиях [1–3], сборниках статей [4, 5] и трудах конференций [6, 7]. Среди прочих распространено мнение о том, что, с точки зрения современной физики, невозможно ни понять, ни опи-

сать, как возникла жизнь на земле. В качестве аргументов приводятся оценки вероятности этого события (их мы обсудим ниже).

На наш взгляд, это мнение неверно. В чем суть проблемы и каковы пути ее решения — это и есть предмет предлагаемой публикации (точнее, первой ее части).

Другой вопрос касается механизмов мышления, особенно интуитивного. Как человек мыслит, как принимает решения и как возник аппарат мышления у человека? Существует мнение о том, что современная физика бессильна ответить на эти вопросы. В отличие от предыдущего вопроса здесь это мнение ничем не аргументируется (никакие оценки не приводятся), что не мешает ему быть достаточно распространенным.

На наш взгляд, проблема здесь не в решении вопроса, а в его постановке. Сейчас еще четко не сформулировано, какое именно явление (или какой процесс), которое мы называем мышлением, нужно понять (и/или описать) на основе физики. По существу, речь идет о механизмах генерации новой ценной информации и ее обработки.

Информация — сравнительно новое понятие, которое, на наш взгляд, еще четко не определено. В еще большей степени это относится к понятию "ценная информация".

В физике неживой природы эти понятия практически не используются, поскольку они там не нужны.

В биологии, напротив, понятие "информация" и особенно "ценная информация" являются основными, и без них ни понять, ни описать явления в живой природе невозможно. В этом собственно и заключается специфика "живого". Поэтому в статье помещен специальный раздел, посвященный информации и информатике. В нем обсуждаются вопросы о возникновении информации и эволюции ее ценности. Там же дается ответ на вопрос:

Д.С. Чернавский. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 117924 Москва, Ленинский просп. 53, Российская Федерация
Тел. (095) 132-62-96
E-mail: chernav@lpi.ru

Статья поступила 3 ноября 1999 г.

почему в живой природе (и в объектах, созданных живыми существами) понятие "ценная информация" столь существенно, в то время как для описания неживой природы без него можно обойтись?

Вопросы о возникновении жизни и мышления выйдут за рамки биологии и представляют общенаучный интерес. В последнее время они привлекают внимание физиков, особенно занимающихся нелинейными задачами и проблемами самоорганизации, т.е. синергетики. Эти вопросы обсуждаются в монографиях крупных ученых [8–11] и обзорах *УФН* [12, 13]. В статье В.Л. Гинзбурга [14] упомянутые в заглавии проблемы отнесены к разряду "великих". Они являются частью более общей проблемы — физического редукционизма. Последнее означает стремление свести сложные явления природы (в частности, живой) к последовательности элементарных событий, описываемых фундаментальными законами физики. Возможно ли это, и если да, то в какой мере, — сейчас вопрос открытый. Наиболее остро этот вопрос встает в случае, когда процесс, описываемый фундаментальными законами физики, теряет устойчивость. В развивающихся системах (в частности, биологических) потеря устойчивости — необходимое условие развития. Поэтому явление устойчивости (неустойчивости) в таких системах играет фундаментальную роль. Однако решение этих глобальных вопросов уже выходит за рамки нашего сообщения, хотя обсуждаемые в нем проблемы тесно связаны с ними.

2. Проблема возникновения жизни

Сделаем несколько предварительных замечаний. При этом будем полагать, что основные сведения о биологических макромолекулах (белках и полинуклеотидах) читателю известны.

В нашей биосфере носителями информации являются полинуклеотиды: ДНК и РНК. Как правило, ДНК выполняют функции хранения информации и передачи ее потомкам, РНК участвует в биосинтезе белков (в трансляции и транскрипции). Вопрос о том, какие полинуклеотиды ДНК или РНК участвовали в первичных процессах возникновения жизни, до сих пор считается дискуссионным [3].

Преимущество ДНК состоит в том, что эти полинуклеотиды более приспособлены к хранению генетической информации и к комплементарной авторепродукции. Преимущество РНК состоит в том, что эти молекулы могут выполнять некоторые каталитические функции (хотя функции хранения и авторепродукции выполняют несколько хуже).

Однако функция хранения информации и функция ее реализации существенно различны и даже дополнительны. Чем лучше обеспечено хранение информации, тем труднее заставить ту же систему выполнить работу, предусмотренную в этой информации. Поэтому эти функции выполняются двумя различными подсистемами. Первая функция выполняется ДНК, вторая — белками, РНК выступает в роли посредника и не несет ни первой, ни второй функции. В принципе роль посредника могут выполнять белки, соединенные с подсистемами (т.е. адаптеры).

Поясним сказанное на примере из техники. Информация о производстве какого-либо продукта содержится в чертежах или на дискетах и хранится в архивах. Использо-

вание этой информации производится в цехах. Можно попытаться представить такую конструкцию, которая бы хранила в себе информацию и одновременно реализовывала ее. Любой инженер скажет, что это, во-первых, трудно и, во-вторых (и это главное), не нужно.

Поэтому ниже мы будем предполагать, что первичным полинуклеотидом была молекула ДНК, а первичным "рабочим телом" — молекула белка.

2.1. Ранние стадии биологической эволюции

В этом процессе можно выделить три этапа:

— образование биологически важных молекул (сахаров, липидов, аминокислот и нуклеотидов) в предбиологический период;

— самопроизвольное скопление этих молекул в пространстве и их конденсация с образованием полимеров (полипептидов и полинуклеотидов со случайными последовательностями);

— возникновение биологической информационной системы и ценной информации в ней.

На третьем этапе происходит выбор единого для всего живого на Земле генетического кода и возникновение простейших "сущест", способных к комплементарной авторепродукции с использованием этого кода. Слово "существа" взято в кавычки. Дело в том, что первые два этапа не имеют отношения к генетической информации. Процессы, протекающие на этих этапах, соответствуют законам физики и химии открытых систем. На втором этапе происходит самоорганизация материи, но еще недостаточная для возникновения кода. И только в конце третьего этапа можно говорить о возникновении "живой материи", т.е. "сущест". Пока что эти термины мы употребляем без определения понятия "жизнь". Такое определение целесообразно рассмотреть после обсуждения третьего этапа. Однако перед этим необходимо кратко рассмотреть первые два.

Первый этап — возникновение биологически важных молекул и их самоорганизация. Такие органические вещества, как сахара, липиды, аминокислоты и нуклеотиды, обладают избытком свободной энергии. Поэтому в термодинамически равновесной системе концентрация их ничтожно мала. Однако в открытой системе при наличии источников энергии такие вещества могут синтезироваться в достаточно больших количествах.

В настоящее время показано, что наиболее эффективно синтез таких веществ может протекать при извержении вулканов [15], а также при электрических разрядах (молнии), под воздействием ультрафиолетового излучения и космических лучей. Синтез некоторых полимеров, например, сахаров, путем полимеризации формальдегида возможен даже в космическом пространстве [16, 17].

Однако в этих условиях соотношение скоростей образования и распада биологически важных веществ таково, что концентрация их в первичном океане очень мала. Иными словами, если бы вещества были распределены в пространстве равномерно, то дальнейшая их полимеризация была бы практически невозможной. Поэтому необходим был второй этап — их самоорганизация.

Второй этап — самопроизвольное скопление молекул. Впервые (еще в 1924 г.) на эту возможность обратил внимание А.И. Опарин [18]. Было показано, что биологически важные молекулы могут самопроизвольно концентрироваться, образуя капли, названные *коацерва-*

тами. Сам по себе такой процесс удивления не вызывает и вполне объясним с позиций физической химии. По ряду свойств коацерваты напоминали клетки простейших. Позднее аналогичные структуры наблюдал В. Фокс [1] и назвал их *микросферами*. Было показано также, что при определенных условиях (высокая температура, наличие активных фосфатов и т.д.) в микросферах образуются полипептиды со случайной последовательностью аминокислот. Подобные полипептиды обладают иногда слабой гидролитической активностью, но в остальном функционально инертны.

Ф. Эгами [2] показал, что капли, подобные коацерватам и микросферам, могут образовываться в морской пене. Он назвал их *маригранами*. В маригранах образование полипептидов из фосфорилированных аминокислот возможно в сравнительно мягких условиях.

Небиологический синтез полинуклеотидов также вполне возможен. При этом одностранные полинуклеотиды неустойчивы и подвергаются гидролизу. Стабильный полимер типа двойной спирали ДНК образуется, если наряду с полимеризацией (замыканием эфирных связей) происходит образование аденин-тимидиновых (АТ) и гуанин-цитозиновых (ГЦ) пар [1]. Для этого необходима достаточно высокая концентрация активированных (фосфорилированных) нуклеотидов. Последовательность полинуклеотидов при спонтанной полимеризации, разумеется, случайна.

Важность второго этапа состоит в том, что благодаря самоорганизации в каплях, подобных клетке (коацерватах, микросферах и маригранах), создаются условия для спонтанного образования биополимеров.

Третий этап — образование информационной системы. Информационная система должна обладать рядом особых свойств [19]. Для того чтобы система содержала информацию, необходимо, чтобы она была мультистационарной, т.е. могла существовать в нескольких стационарных состояниях. Для запоминания необходимо, чтобы ряд стационарных состояний были устойчивы (т.е. информационная система должна быть диссипативной).

Каплеподобные образования, состоящие из случайно связанных полинуклеотидов и полипептидов, обладают этими свойствами. Число N_n стационарных состояний полинуклеотида, состоящего из n звеньев, в каждом из которых содержится один из четырех нуклеотидов, равно $N = 4^n$. Число состояний полипептида из m звеньев равно $N_p = 20^m$. Поэтому число возможных состояний "капли" достаточно велико. Система диссипативна, поскольку при образовании полимеров затрачивается энергия, значительная часть которой переходит в тепло.

Запоминание информации в этой системе заслуживает специального обсуждения; при этом основным становится вопрос о времени запоминания.

В биологической эволюции характерное время запоминания выбранного варианта (например, кода) имеет величину порядка времени существования биосферы, т.е. порядка $\tau \sim 10^9$ лет. Любой гетерополимер, в том числе ДНК, запоминает выбранный вариант на время своего существования τ_i , т.е. на время от своего образования до гидролиза. Последнее зависит от условий, но в любом случае оно много меньше τ . Для того чтобы обеспечить запоминание на время τ , необходимо (и достаточно) периодически со временем $\tau_0 \leq \tau_i$ перезаписывать информацию в нескольких экземплярах (размножать). Послед-

нее условие важно, поскольку при перезаписи информации в единственном экземпляре и хранении в течение долгого времени вероятность ее потери велика. В биологии "перезапись" означает комплементарную авторедупликацию полинуклеотида.

Проведем аналогию. В настоящее время существует несколько способов долговременного запоминания информации: запись на бумаге (книга), магнитной ленте, твердом диске и т.д. Во всех случаях время запоминания ограничено временем существования устройства (так, бумага со временем истлевает, ленты стареют, компьютеры портятся). Для сохранения информации используются приемы перезаписи с увеличенным тиражом. В противном случае эта информация, как правило, пропадает.

Таким образом, возникновение механизма комплементарной авторепродукции необходимо для обеспечения долговременного запоминания информации.

2.2. Молекулярные аспекты механизма авторепродукции

Основным этапом авторепродукции является репликация. При этом происходит разрыв водородных связей между комплементарными нуклеотидами, образование новых (тоже комплементарных) пар со свободными нуклеотидами из окружения и последующее замыкание фосфоэфирных связей между соседними нуклеотидами.

Для ускорения репликации и предохранения ДНК от гидролиза необходим белок-фермент, называемый *репликазой*.

Ясно, что первичный процесс репликации был проще современного. Тем не менее для того, чтобы представить молекулярный механизм первичной репликации, целесообразно рассмотреть современную картину, включая свойства белка-репликазы и его биосинтез.

В современной биосфере комплементарная авторепродукция ДНК осуществляется с помощью специальных белков — *репликаз*. Основная функция репликазы — облегчение разрыва водородных связей между пуриновыми и пиримидиновыми основаниями. Репликазы имеют форму подковы, которая связывается с ДНК (в месте инициации) и затем может продвигаться вдоль по двойной спирали.

Механизм каталитического акта удобно пояснить в рамках концепции "Белок – машина" [20, 21]. На рисунке 1а представлен комплекс ДНК – репликаза в разрезе.

Связи между нуклеотидами изображены жирными сплошными линиями, связи между репликазой и субстратом представлены тонкими линиями. Прямоугольниками изображены нуклеотиды, связывающиеся со свободными участками ДНК, что и обеспечивает образование комплементарной реплики каждой из нитей ДНК. Для образования комплекса репликаза должна быть комплементарна к внешней поверхности биспирали ДНК. Слово "комплементарность" означает здесь не только геометрическое соответствие, но и наличие химических групп, взаимодействующих с ДНК. Однако комплементарность может быть полной и неполной. В последнем случае свободная энергия связывания F меньше, чем максимально возможная F_{\max} , которая реализуется при полной комплементарности. Разность энергий $F_{\text{ex}} = F_{\max} - F$ представляется в форме напряжений, преимущественно сосредоточенных на водородных

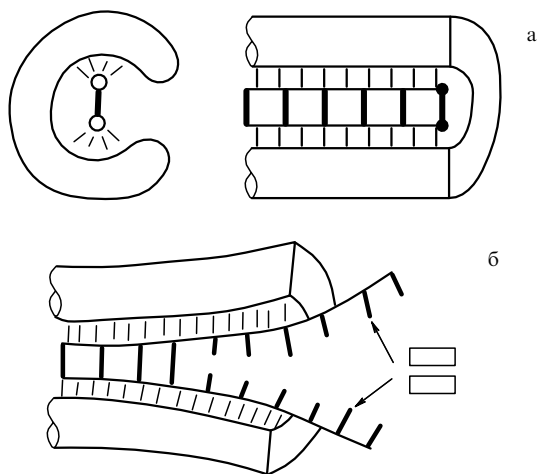


Рис. 1. Схема структуры комплекса белка-репликазы с ДНК (а), схема функционирования комплекса (б).

связях между нуклеотидами. Последнее облегчает разрыв водородных связей, т.е. акт инициации.

Насыщение образовавшихся свободных связей нуклеотидами из раствора вызывает "расталкивание" нитей и возникновение механических сил, способствующих перемещению репликасы.

Аналогичный механизм катализа может иметь место также в случае, когда внешние условия (температура, кислотность и т.д.) периодически меняются и вызывают конформационный переход белка-репликазы. На рисунке 1 представлены две возможные конформации белка. В первой конформации имеет место полная комплементарность и энергия связывания велика, $F = F_{\max}$. Однако при переходе во вторую конформацию (не полностью комплементарную) происходит напряжение комплекса и, следовательно, водородных связей. Энергия напряжения в этом случае черпается из внешней среды (точнее, из энергии внешнего источника, вызывающего изменение условий). Конформационный переход может быть вызван также химическим макроэргическим агентом в результате его гидролиза. В этом случае весь процесс является энергозависимым. Таким образом, главными факторами катализа в данном случае являются форма белка (комплементарная, но не полностью, к ДНК) и его способность к конформационным переходам.

Мы столь детально остановились на вопросе о механизме катализа репликации, поскольку в дальнейшем он будет важен при обсуждении возможности спонтанного образования белка-репликазы.

В современной биосфере белок-репликаса образуется, как и все остальные белки, в результате биосинтеза. При этом форма его определяется первичной последовательностью, которая в свою очередь определяется последовательностью нуклеотидов в соответствующем участке ДНК (структурном гене). Весь процесс можно проиллюстрировать с помощью рис. 2. Здесь последняя (замыкающая) стрелка относится к случаю, когда белок является репликазой и способствует синтезу ДНК.

Напомним кратко, в чем заключается современный механизм биосинтеза белка (подробнее см. [22]). Он состоит из следующих этапов.

1. Образование комплементарной реплики промежуточной (*mesenger*) РНК (*m*-РНК, ее называют также

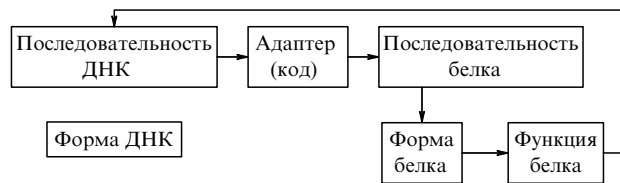


Рис. 2. Схема биосинтеза белка в современной биосфере.

информационной) с соответствующего структурного гена. Этот процесс называется *транскрипцией*.

2. Ковалентное связывание транспортных РНК (*t*-РНК) с соответствующими аминокислотами. Это происходит в соответствии с генетическим кодом (под *кодом* понимается таблица соответствий нуклеотидов (кодона) и аминокислот). В процессе участвуют молекулы *t*-РНК и белки-адаптеры (именуемые *аминоацил-денилат-синтезазами*). Каждая из *t*-РНК имеет триплет нуклеотидов (*кодон*). Каждый адаптер имеет, с одной стороны, соответствующий антикодон (комплементарный к кодону) и, с другой стороны, центр, комплементарный к соответствующей аминокислоте. Антикодоны и центр связывания расположены достаточно далеко друг от друга. Антикодоны связаны с адаптером ковалентно. Связь адаптера с соответствующей аминокислотой не ковалентна. Это обычная адсорбционная связь субстрата с ферментом, обусловленная ионными, ван-дер-ваальсовыми и т.п. силами. Транспортная аминокислота имеет кодон и группу, способную образовывать ацильную связь с любой аминокислотой. В процессе связывания кодон *t*-РНК взаимодействует с антикодоном адаптера и затем образуется ацильная связь аминокислоты с *t*-РНК. В результате последующей десорбции высвобождается *t*-РНК, нагруженная "своей" аминокислотой.

Подчеркнем, *t*-РНК не имеет участка, комплементарного к аминокислоте, аминокислота удерживается на *t*-РНК только за счет одной ковалентной (ацильной) связи.

3. Синтез белковой последовательности происходит в рибосоме. В нем участвуют: *m*-РНК и нагруженные аминокислотами *t*-РНК. При этом антикодоны и *m*-РНК последовательно взаимодействуют с кодонами *t*-РНК, что и обеспечивает образование *определенной первичной последовательности аминокислот в синтезируемом белке*.

Перевод информации, содержащейся в структурном гене в форме последовательности нуклеотидов, в информацию, содержащуюся в белке, именуется *трансляцией*. Из вышеизложенного ясно, что акты трансляции осуществляются в системе адаптеров. Главную роль при трансляции играет генетический код. Под *кодом* понимается соответствие между тройками нуклеотидов (кодонами) и аминокислотами.

В современной биосфере во всех живых организмах работает единый универсальный код, представленный в таблице.

Перечислим наиболее важные особенности современного кода.

а) Генетический код вырожден. Это означает, что несколько различных комбинаций (кодонов) кодирует одну и ту же аминокислоту (что и указано в таблице). Три кодона (УАА, УАГ и УГА) не соответствуют

Таблица. Соответствие между аминокислотами и кодонами (генетический код) *

| № | Аминокислота | Кодоны | № | Аминокислота | Кодоны |
|----|--------------|------------------------------|----|--------------|------------------------------|
| 1 | Ала | ГЦА, ГЦЦ, ГЦГ, ГЦУ | 11 | Лей | ЦУА, ЦУЦ, ЦУГ, ЦУУ, УУА, УУГ |
| 2 | Арг | АГА, АГГ, ЦГА, ЦГЦ, ЦГГ, ЦГУ | 12 | Лиз | ААА, ААГ |
| 3 | Асп | ААЦ, ААУ | 13 | Мет | АУГ |
| 4 | Асп | ГАЦ, ГАУ | 14 | Про | ЦЦА, ЦЦЦ, ЦЦГ, ЦЦУ |
| 5 | Вал | ГУА, ГУЦ, ГУГ, ГУУ | 15 | Сер | АГЦ, АГУ, УЦА, УЦЦ, УЦГ, УАУ |
| 6 | Гис | ЦАЦ, ЦАУ | 16 | Тир | УАЦ, УАУ |
| 7 | Глн | ГГА, ГГЦ, ГГГ, ГГУ | 17 | Тре | АЦА, АЦЦ, АЦГ, АЦУ |
| 8 | Гли | ЦАА, ЦАГ | 18 | Три | УГГ |
| 9 | Глу | АУА, АУЦ, АУУ | 19 | Фен | УУЦ, УУУ |
| 10 | Иле | АУА, АУЦ, АУУ | 20 | Цис | УГЦ, УГУ |

* Условные обозначения аминокислот: Ала — аланин; Арг — аргинин; Асп — аспарагиновая кислота; Асп — аспарагин; Вал — валин; Гис — гистидин; Глн — глутамин; Гли — глицин; Глу — глутаминовая кислота; Иле — изолейцин; Лей — лейцин; Мет — метионин; Про — пролин; Сер — серин; Тир — тирозин; Тре — треонин; Три — триптофан; Фен — фенилаланин; Цис — цистеин.

никакой аминокислоте (нефункциональные кодоны), но играют роль знаков препинания, т.е. определяют начало и конец считывания. В связи с вырождением кода число различных *t*-РНК равно числу функциональных кодонов, т.е. 61.

б) Обратное вырождение, т.е. ситуация, в которой один кодон соответствует нескольким аминокислотам, практически отсутствует (наблюдаются лишь редкие исключения, см. [3]). Это важно, поскольку в противном случае трансляция не была бы однозначной и биосинтез белка содержал бы элемент случайности.

Для живого объекта неоднозначность трансляции была бы губительной, поскольку вместо белков с определенной последовательностью, формой и функцией синтезировались бы случайные и нефункциональные белки. Иными словами, обратно вырожденный адаптер, в котором, например, антикодону ГСА соответствует не аланин, а гистидин, был бы для современных организмов ядом.

в) Код един во всей биосфере от простейших (*E.coli*) до высших растений и животных.

г) Современный код содержит условную информацию, поскольку любой другой код, полученный, например, перестановкой аминокислот в таблице, в современных условиях работал бы почти столь же успешно, как и существующий. Число различных и почти равноправных вариантов кода равно числу перестановок аминокислот, т.е. 20!.

2.3. Варианты первичного биосинтеза

Обсудим главный вопрос: как мог возникнуть первичный организм, способный к комплементарной авторепродукции, т.е. содержащий ДНК и белки, обеспечивающие синтез белка-репликазы? По существу, речь идет о спонтанном возникновении необходимой для этого информации.

Существует специальный термин — гиперцикл, — введенный М. Эйгеном [23]. Он соответствует циклу биохимических процессов, в которых белки (P_i) катализируют образование полинуклеотидов (I_i), а последние "кодируют" биосинтез белков ($i = 1, 2, \dots, n$). Схема гиперцикла по Эйгену приведена на рис. 3а. Тонкие стрелки соответствуют катализу, жирные — "кодированию". Простейший гиперцикл содержит всего один белок (репликазу) и один нуклеотид ($i = 1$); схема его представлена на рис. 3б. Современный биосинтез является гиперциклом, причем достаточно сложным. Он содержит белок-репликазу, информационную РНК, набор

адаптеров, набор транспортных РНК (61 штуку) и рибосому, т.е. количество белков и нуклеотидов в нем достаточно велико.

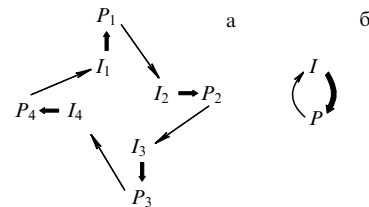


Рис. 3. Схема гиперцикла: сложного (а), простейшего (б).

Центральный вопрос: каков был первичный гиперцикл и какова вероятность его спонтанного (случайного) возникновения?

При оценках вероятности делаются (явно или не явно) определенные предположения, суть которых сводится к расшифровке понятия "кодируют".

I. Предположим, что в первичном гиперцикле механизм кодирования был такой же, как и в современной биосфере, т.е. содержал более 100 белков. Каждый из них содержит порядка 100 аминокислот. Для их кодирования необходима ДНК, содержащая 60000 нуклеотидов. Если принять, что вся эта информация является ценной (т.е. необходимой для обеспечения синтеза), то вероятность случайного возникновения такой ДНК равна

$$W_1 = 4^{-60000} = 10^{-40000} \tag{1}$$

Разумеется, это абсурдно малая величина.

II. Предположим, что первичный механизм кодирования отличался от современного, а именно: адаптеры, транспортные РНК и т.п. участники отсутствовали, а кодирование осуществлялось за счет прямого узнавания кодов и соответствующих им аминокислот. Эти соображения высказывались в ряде работ [24, 25]. Кроме того, было показано экспериментально, что сродство некоторых кодонов к "своим" аминокислотам действительно больше, чем к "чужим" [26]. В этом случае первичный гиперцикл был максимально прост и состоял из одного полинуклеотида и одного белка-репликазы. Последний, однако, должен был содержать не менее 200 аминокислот (в противном случае он не мог бы выполнять свою функцию). "Кодирующая" его ДНК должна была содержать 600 нуклеотидов в определенной последовательности. Вероятность случай-

ного синтеза такой ДНК равна

$$W_{II} = 4^{-600} = 10^{-400}. \quad (2)$$

Она больше предыдущей, но тоже абсурдно мала.

Эти величины — вероятности синтеза нужной последовательности за один акт. Их следует сравнить с числом попыток синтеза во всем возможном пространстве за все время существования Земли. Принимая, что V — объем обитаемой акватории (лагуны, лужи и т.д.) равен $(5-10) \times 10^{10}$ см³; объем, необходимый для синтеза одной ДНК, — $v \cong 10^{-6}$ см³; время существования биосферы — $T_{\text{био}} = 10^9$ лет и время одной попытки порядка суток — $t \approx 10^{-2}$ лет; получаем, что число попыток равно

$$N = \frac{V T}{v t} = 10^{29}. \quad (3)$$

Аналогичные оценки проводились в [27–30]. Точность этих оценок такова, что ошибка в показателе может достигнуть нескольких единиц, но все же много меньше самого показателя.

Вероятность возникновения жизни в первом варианте равна $w_I = N W_I = 10^{-39970}$, а во втором — $w_{II} = N W_{II} = 10^{-370}$. Ясно, что обе абсурдно малы.

Величины порядка W_I и W_{II} являются основным камнем преткновения в вопросе происхождения жизни. Именно эти абсурдно малые величины вероятности лежат в основе утверждения о невозможности понять и описать возникновение жизни в рамках современной науки.

Эти цифры можно "тянуть". Например, можно принять, что часть аминокислот в белке можно заменить на другие (и это действительно так). Тогда кодирование может выполнять не единственная последовательность, а несколько (и даже много). Таким образом, можно повысить вероятности на много порядков. Однако "дотянуть" вероятность до разумной величины порядка 10^{-30} не удастся.

Суть трудности заключена в слове "кодирует", точнее, в предположении о том, что последовательность в первичной ДНК должна быть не любой, а особой. При этом сталкиваемся с комбинаторной малостью: при большом числе элементов число выделенных комбинаций из них всегда мало по сравнению с полным числом вариантов.

Число попыток N тоже велико, но не комбинаторно. Оно состоит из физически реализуемых величин и не может быть больше, чем "гугол" (т.е. величина порядка 10^{100}), реально оно меньше и конкурировать с комбинаторно большими числами не может.

Для преодоления трудности достаточно отказаться от буквального понимания слова "кодирует" и принять, что молекула ДНК в первичном гиперцикле способствовала образованию белка-репликазы (катализовала его синтез) без участия кода. Такой сценарий был рассмотрен в [28–30], обсудим его детальнее.

Напомним: функция белка-репликазы определяется его формой, комплементарной (хотя и не полностью) к молекуле ДНК. В самом каталитическом акте последовательность ДНК роли не играет. Белок нужной формы, вообще говоря, может образовываться и без участия кода (т.е. последовательности ДНК) в результате следующих процессов.

1. Адсорбция аминокислот на молекуле ДНК (любой последовательности).

2. Конденсация аминокислот, т.е. образование пептидных связей между их атомами N и C.

Образующийся белок является слепком с молекулы ДНК. В химии такой процесс известен, и к нему часто прибегают, когда нужно получить полимер заданной формы. В данном случае белок, являясь слепком с ДНК, способен катализировать репликацию ДНК подобно современной репликазе. Процесс можно иллюстрировать схемой на рис. 4, в которой форма белка определяется формой ДНК, а их последовательности не важны (хотя и указаны на схеме).

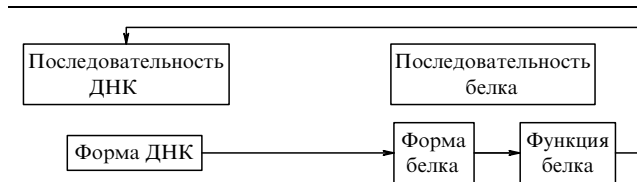


Рис. 4. Схема первичного синтеза белка-репликазы (без участия кода).

Следующий этап — возникновение белков-адаптеров — тоже можно представить как результат естественных физико-химических процессов (подробнее это рассмотрено в [28–30]). В бороздках спирали ДНК могут присутствовать короткие полинуклеотиды (олигомеры), в частности, триплеты-кодоны, которые образуют участки тройной спирали. При образовании адсорбата и последующей конденсации эти кодоны могут связываться с блоками аминокислот ковалентно. Таким образом, среди олигомеров будут присутствовать полипептиды, содержащие кодоны, с одной стороны, и участки, комплементарные к аминокислоте (или блоку аминокислот), — с другой. Такие олигомеры обладают свойством адаптеров.

Соответствие между кодоном и аминокислотой в данном адаптере уже зависит от последовательности нуклеотидов в данной ДНК и положения аминокислоты в данном белковом чехле. Иными словами, адаптеры будут одинаковыми в случае, если их образование происходит на одинаковых ДНК (с одинаковой последовательностью), и различны в противном случае. Далее мы будем употреблять такие термины: "свой" набор адаптеров для ДНК с данной последовательностью; "своя" ДНК для данного набора адаптеров.

В [29, 30] была оценена максимальная длина случайной ДНК, при которой образование адаптеров не приводит к обратному вырождению. Число нуклеотидов в ней должно было быть меньше $n_{\text{max}} < 96$. Ясно, что такая короткая ДНК не могла "кодировать" (в современном смысле слова) белок-репликазу нужной величины. С другой стороны, первичная ДНК и не могла быть слишком короткой, иначе она не могла бы катализировать образование белка-репликазы нужной формы. С этой точки зрения длина ДНК не могла быть меньше размеров белка (50–100 Å), т.е. должна была содержать порядка 30 нуклеотидов.

Присутствие "своего" набора адаптеров существенно ускоряет синтез белка-репликазы, поскольку при образовании адсорбата адаптеры подносят нужную аминокислоту на нужные места, т.е. обеспечивают в адсорбате

первичную последовательность, совместимую с функциональной формой. Однако такой набор будет затруднять синтез белка на любой другой, "чужой" для него ДНК. По существу, речь идет о деструктивной роли обратного вырождения.

Гиперцикл, содержащий полинуклеотид (ДНК), белок-репликазу и набор адаптеров, можно представить с помощью рис. 5. Здесь представлены те же блоки, что и на рис. 4, и, кроме того, блок адаптеров. По схеме на рис. 5 могут протекать те же процессы, что и по схеме на рис. 4 (они изображены стрелками 1 и 2), но возникают, благодаря адаптерам, новые возможности. Так, стрелки 3, 4 и 5 означают, что появляется возможность прямого пути от последовательности ДНК к первичной последовательности белка. Иными словами, первичная последовательность ДНК начинает играть существенную роль в определении первичной последовательности белка. Именно благодаря адаптерам ускоряется формирование той белковой последовательности, которая соответствует функциональной форме белка. Таким образом, рис. 5 описывает переходную стадию, в которой совмещены процессы синтеза белка без кода и процессы кодирования, сходные с современным биосинтезом. Последнее позволяет при изменении (мутации) последовательности ДНК (но без изменения набора адаптеров) синтезировать белки с измененной последовательностью аминокислот и, следовательно, с измененной формой и функцией. Иными словами, появляется возможность дальнейшей биологической эволюции.

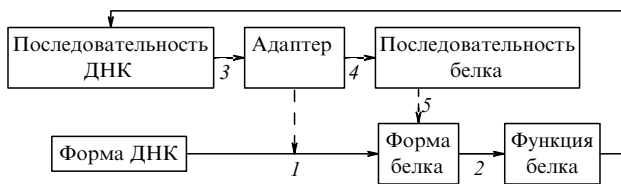


Рис. 5. Схема промежуточного варианта биосинтеза белка-репликазы.

В рамках данного варианта проблема малой вероятности образования первичного гиперцикла не возникает. Однако возникает другой вопрос: почему в современной биосфере господствует один вариант кода и отсутствуют другие?

Обсуждаются два ответа на этот вопрос.

Первая гипотеза сводится к тому, что среди разных вариантов кода имелся наилучший, который и был отобран в последующей эволюции [23].

Во второй гипотезе [28–30] принимается, что все варианты кода были равноправны, но в результате взаимодействия между разными популяциями был выбран (а не отобран) единый код. Этот вариант мы детальнее обсудим ниже.

Скажем несколько слов о возможностях экспериментальной проверки некоторых из обсуждавшихся гипотез.

Проверка утверждения о том, что среди возможных кодов имелся наилучший (наиболее устойчивый к мутациям), требует больших усилий и длительного времени. Действительно, для этого нужно создать систему, в которой работает иной код, и сравнить ее с существующей. Этого не сделано.

Для проверки гипотезы о прямом избирательном взаимодействии кодонов (или антикодонов) с аминокислотами необходимо определить энергии этих взаимодействий. Это вполне возможно, но не сделано.

Для проверки гипотезы гетерогенного катализа необходимо: во-первых, найти условия, при которых на биспирали ДНК (любой последовательности) образуется плотный адсорбат аминокислот; во-вторых, провести конденсацию аминокислот на полученном комплексе; в-третьих, проверить репликационную активность полученного полипептида. Эти эксперименты в современных условиях вполне реальны, но пока не сделаны.

2.4. Выбор единого кода

Этот этап имел место уже после образования нескольких различных популяций гиперциклов с различными вариантами кода. Для описания этого этапа удобно использовать математическую модель следующего вида:

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{1}{\tau_i} u_i - b_i \sum_{j \neq i} u_i u_j - a_i u_i^2, \quad a_i < b_i. \quad (4)$$

Здесь u_i — концентрация гиперциклов, в которых набор адаптеров соответствует i -му варианту кода.

Член $(1/\tau_i)u_i$ описывает автокаталитическое воспроизводство со временем τ_i .

Член $b_i u_i u_j$ описывает взаимодействие гиперциклов с различными вариантами кода. Он отрицателен, поскольку взаимодействие носит антагонистический (или конкурентный) характер.

Член $a_i u_i^2$ описывает эффект "тесноты", т.е. разрушение (гибель) при встрече двух одинаковых гиперциклов; этот член существен, если концентрация их становится большой. Член "тесноты" в данном случае соответствует конкуренции между одинаковыми гиперциклами за первичный субстрат. Такая конкуренция имеет место и между различными гиперциклами. Однако, кроме этого, между ними имеется дополнительное чисто антагонистическое взаимодействие. В данном случае оно имеет простой смысл: при встрече двух различных гиперциклов их адаптеры перемешиваются, и возникает обратное вырождение. Последнее губительно для обоих.

Примем, что параметры τ_i , b_i и a_i одинаковы и, следовательно, не зависят от индекса i , и обозначим их просто τ , b и a . Это условие обеспечивает равновесие элементов разных типов.

Обсудим свойства системы (4). Удобно представить ее в безразмерном виде, введя переменные

$$t' = \frac{t}{\tau}, \quad u'_i = b\tau u_i, \quad a' = \frac{a}{b}. \quad (5)$$

Тогда система (5) примет вид

$$\frac{du'_i}{dt'} = u'_i - \sum_{j \neq i} u'_i u'_j - a' u_i'^2. \quad (6)$$

Далее мы будем работать с системой (6); при этом будем полагать, что $a \ll 1$, и штрихи опустим.

Безразмерная система (6) содержит единственный параметр a , который отражает относительную роль антагонизма: чем меньше a , тем сильнее антагонистическое взаимодействие. В данном случае оно заведомо сильнее, чем не антагонистическое, т.е. параметр a в (6) существенно меньше единицы.

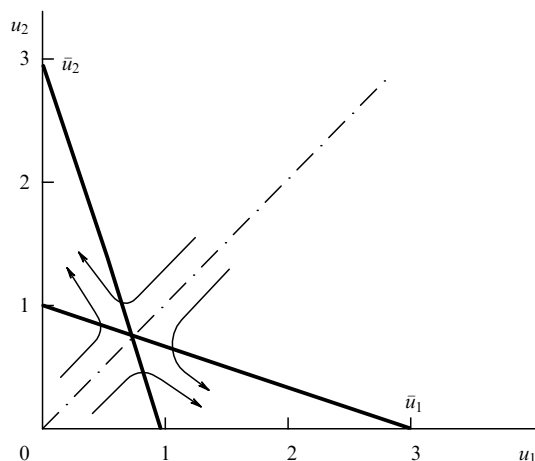


Рис. 6. Фазовый портрет симметричной системы (6) при $a = 1/3$. Изоклины представлены жирными линиями, сепаратриса (она же биссектриса) — штрихпунктирной.

В системе (6) имеются N устойчивых стационарных состояний. В них присутствуют только элементы определенного типа; например, в j -м состоянии $u_j = a^{-1}$ и все остальные $u_{j \neq i}$ равны нулю. Кроме того, имеется нулевое стационарное состояние (все $u_i = 0$); оно неустойчиво, поскольку все числа Ляпунова положительны (и равны единице). Симметричное состояние, в котором все u_i одинаковы и равны $\bar{u} = (N - 1 + a)^{-1}$, тоже неустойчиво (типа седла); в нем одно из чисел Ляпунова отрицательно, но остальные λ положительны и равны $\lambda = (1 - a)/(N - 1 + a)$.

Фазовый портрет системы (6) при $N = 2$ и $a = 1/3 < 1$ приведен на рис. 6.

В конце всего процесса образуется "чистое" состояние, т.е. выбирается один вариант кода. Это имеет место и в несимметричной модели, т.е. в случае, когда варианты не одинаковы. При этом побеждает вовсе не "наилучшая" популяция, а та, которая в силу случая оказалась вначале более многочисленной. Иными словами, происходит не отбор наилучшего варианта (в традиционном, дарвиновском понимании), а выбор одного из практически равноправных, который вытесняет остальные.

Можно сказать, что этот результат иллюстрирует известную фразу из Дж. Орвела: "Все животные равны, но некоторые из них более равны, чем другие"¹.

В заключение этого раздела уместно сделать ряд замечаний.

Эволюцию биосинтеза белка можно сравнить с эволюцией письменности. Древняя форма письма — иероглифы. В древности каждый иероглиф представлял собой рисунок объекта, можно сказать, "слепок" с него. Так, дом изображался в виде шалаша-треугольника Δ , а бык — в виде морды с рогами Υ (алеф). При этом не было необходимости использовать алфавит (т.е. код). Иероглифическому этапу соответствует схема (4) первичного синтеза адаптеров.

Затем некоторые иероглифы потеряли свойство прямого соответствия целому объекту (при этом существенно упростились), но приобрели новую функцию — буквы. Буква является частью слова — ее осколком

(можно сказать, "олигомером"), и сама по себе ничего не значит. Она приобретает смысл в сочетании с другими буквами в соответствии с алфавитом (кодом). Алфавитная письменность появилась с увеличением количества передаваемой информации. Смысл этого прост: число сочетаний даже небольшого числа символов факториально велико по сравнению с числом символов. Переход от иероглифической письменности к алфавитной был постепенным. Сначала к иероглифу, соответствующему предмету (или действию), добавляли более простой символ, уточняющий смысл первого. Такая смешанная письменность, не нарушая функций иероглифов, расширила возможности письменной передачи информации. При этом иероглифы постепенно вытеснялись буквами. Подчеркнем: это происходило именно постепенно, поскольку превращение каждого иероглифа в букву не препятствовало восприятию всего текста. При этом каждый из участников (как создатели знака, так и реципиенты) постепенно, путем взаимного обучения, выработывали условия кода, т.е. алфавит. Упрощенные символы — буквы — появились как части более сложного иероглифа. Буква α (альфа) — как часть "быка", при этом сначала "рога" легли на бок. Схема промежуточного биосинтеза белка на рис. 5 соответствует смешанной письменности, где адаптеры, с одной стороны, являются осколками "чехла" (иероглифа), а с другой — уже буквами.

Отметим особенность биологической эволюции. В рассматриваемый период гиперцикл включал только один белок-репликазу с единственной функцией. Даже в таких простейших популяциях был выработан (выбран) единый код. Можно сказать, что "в начале было слово", оно имело один смысл — комплиментарная репродукция, т.е. жизнь.

3. Проблема биологической асимметрии

Этой проблеме посвящен обзор [31], в котором приведена необходимая библиография. Из него следует, что вопрос остается открытым. Поэтому мы ограничимся кратким изложением сути дела и обсудим возможные пути решения проблемы.

Большинство органических молекул обладают киральностью (спиральностью) и существуют в двух формах: правой (D) и левой (L). Растворы и кристаллы D-соединений вращают плоскость поляризации света по часовой стрелке (вправо), L-соединений — против часовой стрелки (влево).

Более сложные органические соединения могут состоять из фрагментов различной спиральности. При этом знак угла вращения зависит от оптических свойств фрагментов.

В неживой природе киральные молекулы находятся в рацемической смеси, где обе формы представлены одинаково. В живой природе симметрия нарушена.

Все аминокислоты (за исключением глицина, который не кирален) представлены L-формой. Это значит, что их основной фрагмент совпадает с левой формой глицеральдегида, из которого все они могут быть получены путем замещения групп. Другие фрагменты могут обладать и другой спиральностью.

Пятичленные сахара-рибозы, составляющие основную цепь рибонуклеиновых кислот (ДНК и РНК), имеют правую спиральность.

¹ "All animals are equal, but some of them are more equal than others".

Нуклеотиды, составляющие боковые группы рибополимера, находятся преимущественно в левой форме (гош-форме).

Таким образом, в живых объектах встречаются как правые, так и левые формы различных соединений, но каждое из них не находится в рацемической смеси.

Возникают следующие вопросы.

— Почему в живой природе преобладают определенные формы, а не их рацемическая смесь?

— Почему природой выбран именно этот вариант и отсутствуют его антиподы?

— Могли ли возникнуть несимметричные живые объекты в условиях, когда в окружающей (неживой) среде все необходимые для этого вещества находились в рацемической смеси?

— Могла ли зеркальная симметрия нарушиться еще в предбиологический период?

Ответ на первый вопрос прост. В организме химические реакции катализируются белками-ферментами. В каждом белке имеется область (активный центр), комплементарная к субстрату. Для катализа двух оптических изомеров необходимы два белка. Для работы с рацемической смесью необходим удвоенный набор белков. Такие организмы были бы громоздки и менее приспособлены к борьбе за выживание. Не удивительно, что "рацемические организмы" не выжили.

Кроме того, для белка, катализирующего реакцию с субстратом определенной киральности, антипод последнего часто оказывается конкурентным ингибитором (т.е. ядом). Применительно к репродукции ДНК эффект ингибирования теоретически рассмотрен в [31]. Показано, что в рацемической смеси моноклеотидов могут образовываться кирально чистые ДНК, но только сравнительно небольшой длины ($N \approx 50-100$ звеньев). С увеличением длины вероятность встраивания антиподов возрастает факториально.

Напомним, что в современной биосфере участок ДНК, кодирующий один функциональный белок (порядка 200 аминокислотных остатков), должен содержать не менее 600 нуклеотидов. Поэтому в [31] введены уровни сложности: биологический ($N > 600$) и химический ($N < 50$). Кирально чистые ДНК биологического уровня сложности не могут редуцироваться в рацемической смеси, но химического уровня — могут.

Второй вопрос касается причины нарушения киральной симметрии. Обсуждаются два варианта.

Первый вариант связан с внешними несимметричными воздействиями. Таковые имеются, хотя и очень слабой интенсивности, среди них: участие в синтезе ДНК киральных минералов (например, кварца), влияние циркулярно поляризованного света и возможная роль потоков нейтрино. Последнее особенно "популярно", поскольку оказывается, что поляризованные нейтрино способствуют синтезу именно D-сахаров и L-аминокислот (см. [31]). Анализ потоков нейтрино проведен в работах [32, 33]. Показано, что наибольший вклад могли бы внести нейтрино, возникающие при взрыве сверхновых. Однако и в этом случае влияние потока нейтрино на биохимические процессы очень мало, так что в равновесных условиях этот фактор не может привести к существенному преобладанию одного из антиподов.

Вторая точка зрения заключается в том, что в неравновесных условиях (в частности, в биологических

или предбиологических) возможно спонтанное нарушение симметрии за счет неустойчивости рацемического состояния. По существу, речь идет о том же эффекте, что и при выборе единого кода. Для описания процесса можно использовать модель типа (6), полагая, что число вариантов равно двум ($i = 1, 2$). Такая модель может описывать и чисто химическую реакцию синтеза молекул одной киральности из не кирального предшественника, если эта реакция обладает следующими свойствами:

а) образующиеся киральные молекулы способствуют синтезу молекул той же киральности, т.е. имеет место автокатализ;

б) при встрече двух антиподов оба удаляются из сферы реакции, т.е. имеет место антагонистическое взаимодействие.

Впервые на такую возможность обратил внимание Фишер, более подробно она обсуждается в [31]. В зависимости от параметров реакции рацемическое состояние может быть либо устойчивым, либо неустойчивым. В последнем случае должны образовываться преимущественно молекулы одной киральности. Какой именно — зависит от случайной флуктуации. Вблизи точки бифуркации кинетику реакции можно описать моделью, содержащей лишь одно уравнение

$$\frac{d\eta}{dt} = \varepsilon\eta - \eta^3, \quad (7)$$

где η — параметр киральности:

$$\eta = \frac{C_+ - C_-}{C_+ + C_-};$$

C_+ и C_- — концентрации D- и L-энантиомеров; $\varepsilon \ll 1$ — бифуркационный параметр такой, что при $\varepsilon < 0$ рацемическое состояние ($\eta = 0$) устойчиво, а при $\varepsilon > 0$ неустойчиво, но устойчивы состояния $\eta = \pm\sqrt{\varepsilon}$.

Однако кирально чистый продукт ($\eta = \pm 1$) может образоваться лишь при большом значении параметра $\varepsilon \approx 1$. Реально это означает, что не автокаталитический канал реакции, дающий рацемическую смесь, должен быть исключен. Такая ситуация характерна для биологических систем. Химическую реакцию с такими свойствами представить трудно даже теоретически.

В этом и заключается суть проблемы.

Вопрос о том, когда произошло нарушение киральной симметрии (в предбиологический период или позже), остается сейчас наиболее острым. На наш взгляд, ответ прост: киральная симметрия могла (и должна) быть нарушена во время образования первичных гиперциклов, но не до и не после этого.

Действительно, молекулы ДНК в первичных гиперциклах были недлинными (как упоминалось, по оценкам, они были порядка $N \approx 30-50$). Они не выполняли биологической функции (кодирование), но выполняли химическую функцию (гетерогенный катализ). Такие молекулы вполне могли быть гомакиральными. Присутствие белка-репликазы создавало стерические препятствия для внедрения антиподов, что уменьшало вероятность ошибок при копировании. Этот этап мог протекать в рацемической смеси нуклеотидов, наличие кирально чистой внешней среды для этого не требовалось. С другой стороны, не автокаталитический синтез ДНК такой длины практически исключен.

Таким образом, приведенный выше сценарий образования первичных гиперциклов можно рассматривать как пример химической реакции, обладающей свойствами биологической специфичности (в смысле [31]). Процесс протекал на промежуточном уровне сложности между биологическим и химическим. При этом с равной вероятностью могли образовываться кирально чистые гиперциклы обеих форм (антиподы). В сценарии, где вероятность образования гиперциклов близка к единице, антиподы должны были образоваться с необходимостью.

В дальнейшем один из вариантов (антипод) был полностью вытеснен по тем же причинам, что и другие варианты кода. В данном случае антагонистическое взаимодействие между антиподами было даже сильнее, чем между представителями различных кодов. При встрече двух антиподов один из них погибал, потому что его съели, а другой — потому, что съел отраву.

В современной биосфере питательными субстратами живых существ являются продукты их жизнедеятельности. Естественно, они не находятся в рацемической смеси, зеркальная симметрия в них нарушена в той же степени, как и в самих живых объектах. Существование полных антиподов в такой ситуации невозможно. Однако существование отдельных видов, продуцирующих отдельные киральные изомеры, возможно, что и используется ими в защитных целях.

Таким образом, причиной биологической асимметрии служит неустойчивость симметричного состояния. В такой ситуации искать внешнюю причину, с нашей точки зрения, бессмысленно.

Тем не менее такие поиски возможных внешних причин продолжают.

Обсуждается смешанный вариант, в котором учитывается как спонтанное нарушение, так и влияние нейтрино [34]. Таковое возможно, если система эволюционирует так, что параметр ε увеличивается медленно от отрицательных значений до положительных и при этом концентрации антиподов не малы. Тогда вблизи точки бифуркации (при $\varepsilon = 0$) даже малые внешние воздействия могут повлиять на выбор конечного состояния.

В этих условиях числа Ляпунова малы, процесс развивается медленно даже после бифуркации (когда $\varepsilon > 0$) и быстрые флуктуации успевают усредниться. Тогда малый, но постоянно действующий фактор, нарушающий киральную симметрию, может играть роль. Для учета этого фактора нужно в уравнении (7) добавить постоянный член $\delta \ll 1$ в правую часть, после чего получим

$$\frac{d\eta}{dt} = \delta + \varepsilon\eta - \eta^3. \quad (8)$$

Решение уравнения (8) содержит устойчивую ветвь, в которой бифуркация при $\varepsilon = 0$ отсутствует. Кроме нее при $\varepsilon > 0$ появляются еще два решения: одно устойчивое и другое неустойчивое (сепаратриса). При $\varepsilon = 0$ они расположены очень близко (в меру $\sqrt[3]{\delta}$) к устойчивой ветви.

В этих условиях формально внешний фактор можно считать причиной явления.

Однако применительно к рассматриваемому процессу этот вариант представляется нереалистичным.

Более реальна другая ситуация, в которой концентрации гиперциклов малы, их относительные флуктуации, напротив, велики и антагонистическое взаимодействие достаточно сильно ($a \ll 1$). При этом симметричное состояние сильно неустойчиво, числа Ляпунова велики, процесс развивается быстро и флуктуации концентраций не успевают усредниться. Внешние факторы типа нейтрино здесь уже роли играть не могут, выбор варианта определяется начальной флуктуацией, т.е. случайно.

4. Проблема темпов биологической эволюции

За несколько миллиардов лет биосфера прошла эволюцию от простейших до человека. Существует мнение о том, что темпы слишком высоки и даже необъяснимы с позиций современной науки. Существует и противоположное мнение, так что вопрос остается дискуссионным (см. [35, 36]). Поясним суть вопроса.

Согласно традиционной точке зрения (так называемой дарвинистской), эволюция происходит за счет точечных мутаций и последующего отбора наиболее приспособленных особей. При этом лишняя генетическая информация, не дающая эволюционных преимуществ, должна элиминироваться. Эта теория удовлетворительно описывает этапы эволюции, когда уже возникшие виды осваивают экологические ниши и приспосабливаются к ним. Однако в реальной эволюции были и другие этапы, когда возникали новые виды, обладающие принципиально новыми функциями. Такие этапы называются *большими скачками* или *ароморфозами*.

Приведем наиболее яркие примеры таких скачков эволюции.

На ранних стадиях эволюции живые существа питались органическими веществами, накопленными в предбиологический период (или друг другом). Атмосфера Земли в те времена не содержала кислорода, и основным процессом энергообеспечения (синтеза АТФ) был гликолиз. Однако со временем накопления истощились, и наступил "продовольственный кризис". Выход из него был найден: возникли существа, способные усваивать энергию света и разлагать воду, т.е. фотосинтетики. Это давало колоссальные эволюционные преимущества, и вскоре фотосинтетики заселили мировой океан, а затем и сушу. Тут возникла экологическая катастрофа. Фотосинтетики, разлагая воду, выделяли кислород, который для анаэробов был ядом. Атмосфера оказалась "отравленной" кислородом. Природа снова нашла выход: возникли организмы, способные синтезировать АТФ за счет окисления сахаров кислородом. Так появились дышащие.

Каждый акт возникновения принципиально новых организмов представлял собой "большой скачок", и таких скачков в эволюции было много.

Проблема состоит в том, что объяснить появление скачков с позиций традиционного дарвинизма действительно невозможно. Поясним это на примере фотосинтетиков.

Процесс утилизации света состоит из ряда стадий: поглощение света, преобразование его энергии в иную форму и, наконец, синтез АТФ. Каждая стадия осуществляется специальным белком, а весь процесс — белковой системой. Возникновение каждого отдельного белка не дает эволюционных преимуществ и является для

организма лишней нагрузкой. Преимущества (и большие) возникают лишь при создании всей системы в целом.

Проблема, по существу, та же, что и при возникновении жизни, но есть и отличия.

В рассматриваемый период аппарат биосинтеза уже существовал. Поэтому заново создавался не новый белок, а кодирующий его участок ДНК, т.е. новая информация. Количество новой информации определяется размерами новых белков, а последние — их функциями. Фотосинтетическая система должна содержать, как минимум, два белка (хромофор и АТФ-синтазу), каждый размером не меньше 200 аминокислот. Кодирующий систему участок ДНК должен содержать 1200 нуклеотидов. Количество информации в таком участке — $J = \log_2 4^{1200} = 2400$ бит. Вероятность возникновения такого участка за счет точечных мутаций в одном акте равна $W_{\min} = 2^{-J} = 2^{-2400}$, т.е. абсурдно мала. Эта оценка вероятности приведена для иллюстрации и сильно занижена. Более реалистическая оценка количества ценной информации в белке-хромофоре (бактериородопсине) была проведена в работе [37]: $J_b = 100$ бит. Тогда количество ценной информации в фотосистеме должно быть порядка 200 бит и вероятность возникновения системы за счет точечных мутаций равна $W_{\max} = 2^{-200}$. Эта оценка наверняка завышена, но и она абсурдно мала по сравнению с числом попыток $N = 10^{30}$.

Именно эти оценки лежат в основе утверждения о том, что наблюдаемые темпы эволюции нельзя объяснить рационально.

Для решения проблемы достаточно, как и в предыдущем случае, выйти за рамки традиционного подхода и представить себе иной механизм возникновения больших скачков и иной тип мутаций, обладающих следующими свойствами.

а) Количество новой (генерируемой) информации должно быть минимальным, большая часть необходимой информации должна черпаться из резерва. Информация, необходимая для жизнеобеспечения в прежних условиях, должна сохраняться, а мутациям должна подвергаться лишь резервная информация. Для этого должен существовать "архив" нейтральной (не используемой и не дающей эволюционных преимуществ) информации. Это противоречит догме об элиминации лишней генетической информации, но, как увидим, согласуется с действительностью.

б) Наряду с точечными должны существовать блочные мутации, при которых новая информация сочетается с резервной.

Поясним сказанное на примере из эволюции техники. При создании новой машины с принципиально новой функцией (например, паровой машины) Дж. Уатт не изобретал заново все детали (рычаги, цилиндр, поршень и т.п.), а использовал уже существовавшую информацию о них, которая содержалась в описании уже существовавших до этого машин (мельницы, насосы и т.п.), т.е. в архивах. Принципиально новым было лишь соединение деталей старых машин в новой конструкции. Число вариантов сочетания деталей невелико, и подбор нужной комбинации занимает разумное время.

В биологии аналог архива — запас нейтральной генетической информации. Аналог перебора вариантов — блочные мутации. В них, в отличие от точечных, происходит не замена отдельных нуклеотидов другими,

а разрыв генома на части (блоки) и соединение их в иной последовательности. Оценки показали [38], что время, необходимое для подбора белковой системы с принципиально новыми функциями, вполне укладывается в разумные пределы.

Наличие резерва нейтральной генетической информации было обнаружено экспериментально и легло в основу "нейтралистской" теории эволюции [39]. Механизмы разрезания генома на блоки и последующего сшивания их в иной последовательности также обнаружены и сейчас активно исследуются [40]. Таким образом, возможность блочных мутаций (обладающих свойствами а) и б)) сейчас не вызывает сомнения.

Подчеркнем, что при больших скачках новая функция, дающая большие эволюционные преимущества, возникает отнюдь не в наиболее приспособленных особях, а напротив, в маргиналах, содержащих большее количество нейтральной информации. Сам акт ароморфоза отнюдь не отбор наилучшего, а выбор подходящего варианта. Отбор вступает в силу на следующей стадии приспособления новых организмов к внешним условиям.

Подведем итог: упомянутые выше проблемы еще не решены окончательно, для этого необходимы экспериментальные и теоретические исследования. Однако возможные варианты их решения существуют. Во всяком случае, утверждения о том, что эти проблемы нельзя решить в рамках современной науки, не имеют под собой почвы.

Для решения этих проблем необходимо (и достаточно) отказаться от догм и предрассудков, принятых в узкой области, и взглянуть на проблему открытыми глазами. Так, в проблеме происхождения жизни достаточно отказаться от буквального понимания слов "ДНК кодирует белок-репликазу" и допустить более широкое их понимание в смысле "ДНК катализирует образование белка-репликазы".

В проблеме темпов эволюции достаточно отказаться от догмы "точечные мутации плюс отбор" и допустить, что кроме этого происходят блочные мутации и выбор.

5. Информация и информатика

5.1. Информация и ее свойства

Термин *информация* сейчас употребляется весьма часто и в разных смыслах, а еще чаще — всуе, т.е. без всякого смысла.

Для иллюстрации приведем коллекцию определений (заимствованную из [41] и [42]; см. там же библиографию).

В гуманитарных науках этот термин употребляется в смысле "сведения о ...". (Тот факт, что такое определение представляет собой тавтологию, в данном случае не смущает.)

- Информация есть знания, переданные кем-то другим или приобретенные путем собственного исследования или изучения.

- Информация — это сведения, содержащиеся в данном сообщении и рассматриваемые как объект передачи, хранения и обработки.

- Информация в обыденном смысле — это сведения, известия, в научно-технических приложениях — то, что имеет на себе сигнал.

• Информация — это обозначение содержания, полученного из внешнего мира в процессе нашего приспособления к нему и приспособления к нему наших чувств.

• Информация — одно из свойств предметов, явлений, процессов объективной действительности, созданных человеком управляющих машин, заключающееся в способности воспринимать внутреннее состояние и воздействие окружающей среды и сохранять определенное время результаты его, передавать сведения о внутреннем состоянии и накопленные данные другим предметам, явлениям и процессам.

• Информация — объективное содержание связи между взаимодействующими материальными объектами, проявляющееся в изменении состояний этих объектов.

Наряду с этими и подобными им определениями заметна тенденция связывать информацию со степенью упорядоченности той системы, которая получает информацию.

• Информация означает порядок, коммуникация есть создание порядка из беспорядка или по крайней мере увеличение степени той упорядоченности, которая существовала до получения сообщения.

Приводимые ниже определения в известной мере повторяются.

• Информация есть текущие данные о переменных величинах в некоей области деятельности, систематизированные сведения относительно основных причинных связей, которые содержатся в знании как понятия более общего класса, по отношению к которому информация является подчиненной.

• Информация есть знание о каком-то особом событии, случае или о чем-либо подобном.

• Информацией являются все те данные о внешнем мире, которые мы получаем как путем непосредственного воздействия на наши органы чувств окружающих предметов и явлений, так и опосредованным путем через книги, газеты, рассказы других людей.

• В проблемах передачи "информацией" называется всякое сообщение или передача сведений о чем-либо, что заранее не было известно.

В философии популярны дефиниции, содержащие метафорический термин "отражение".

• Информация в самом общем случае — это разнообразие, которое один объект содержит о другом, это взаимное, относительное разнообразие. С позиций теории отражения информация может быть представлена как отраженное разнообразие, как разнообразие, которое отражающий объект содержит об отраженном.

• Информация есть отражение в сознании людей объективных причинно-следственных связей в окружающем нас реальном мире.

• Информация — это содержание процессов отражения.

• Информация не тождественна отражению, а есть лишь его инвариантная часть, поддающаяся определению, объективированию, передаче.

• Информация — это философская категория, рассматриваемая наряду с такими понятиями, как пространство, время, материя. В самом общем виде информацию можно представить как сообщение, т.е. форму связи "между источником, передающим сообщение, и приемником, его принимающим".

Особое место в коллекции определений занимают утверждения о том, что информация — это алгоритм.

• Информация... есть план строения клетки и, следовательно, всего организма.

В других модификациях этого определения слово "план" заменяется словом "инструкция" или "алгоритм" или "оператор".

• Совокупность приемов, правил или сведений, необходимых для построения оператора, будем называть информацией.

Обилие определений означает, что общепринятой дефиниции еще нет. Это не удивительно, поскольку наука об информации (информатика) появилась недавно и сейчас бурно развивается.

Выше мы упоминали о том, что понятие "информация" конструктивно и содержательно в науках о живой природе. В этой области используется следующее определение, данное Г. Кастлером [27].

• Информация есть *запомненный* выбор одного варианта из нескольких возможных и равноправных.

Далее мы будем использовать его и ссылаться на него как на определение (Q).

Слово "запомненный" здесь выделено, поскольку в дальнейшем будет играть важную роль. Оно относится к фиксации информации. Вообще говоря, выбор может и не запоминаться (т.е. тут же забываться). Такой выбор называется *микроинформацией*. Запомненный выбор (в отличие от незапомняемого) называется *макроинформацией*.

Слова "возможных и равноправных" означают, что варианты выбора принадлежат одному множеству и априорные различия между ними невелики. В идеале варианты могут быть полностью равноправны и равновероятны (например, "орел" или "решка"), но могут и отличаться. В этом случае слово "равноправные" означает, что априорные вероятности различных выборов — величины одного порядка.

Определение (Q) отличается от предыдущих следующим.

Во-первых, оно четко, понятно и широко используется в естественных науках [19, 27, 43, 44]. Конструктивность его проверена на многих реальных примерах. Это определение не противоречит предыдущим, когда речь идет о конкретных задачах. Так, определение информации как инструкции или оператора в конкретных случаях сводится к указанию, какой именно вариант возможных действий следует выбрать в том или ином случае.

Во-вторых, согласно этому определению информация предстает как нечто конкретное и приземленное, ощущение чего-то сверхъестественного и романтического в нем отсутствует, исчезает ореол "божественного". Можно считать это недостатком определения, поскольку именно это ощущение привлекает многих людей и вдохновляет их на подвиги (научные, ненаучные и лженаучные). Тем не менее именно это определение позволяет понять такие тонкие явления, как возникновение жизни и механизмы мышления, с естественно-научной точки зрения, иными словами, построить мост между естественными науками и гуманитарными.

В-третьих, определение (Q) допускает введение меры — количества информации.

Подчеркнем еще одну особенность определения (Q).

Слово "выбор" — отглагольное существительное. Его можно понимать в двух смыслах: как процесс и как результат процесса. Разница примерно такая же, как между судопроизводством и приговором суда. В определении (Q) выбор понимается как результат процесса, но не как сам процесс. Именно в этом смысле (т.е. как "приговор") оно конструктивно, и именно в этом смысле оно используется в реальных задачах.

Однако информация как результат выбора нелегитимна без процесса выбора, как приговор нелегитимен без суда. Отнюдь не любой процесс заканчивается выбором. Последнее возможно лишь в процессах определенного класса. Поэтому целесообразно ввести понятие "информационный процесс", свойства которого мы обсудим позже.

Важную роль играет количество информации. В случае, когда выбор полностью равноправен, количество информации I определяется как

$$I = \log_2 n. \quad (9)$$

Логарифмическая мера выбрана для удобства, поскольку число различных вариантов n , как правило, комбинаторно велико, т.е. может достигать значений $n \sim 10^{100} - 10^{1000}$. Например, в случае всего 20 различных элементов (аминокислотных остатков) число вариантов (перестановок) будет равно $20!$, что составляет 10^{27} .

Единицу информации называют *битом*; эта единица соответствует простейшему случаю, когда делается выбор одного варианта из двух. Отсюда видно, что выбор логарифма по основанию 2 является наиболее удобной мерой.

Если априорные вероятности выбора i -го варианта P_i не равны ($p_1 \neq p_2 \neq \dots \neq p_i$), хотя и сопоставимы, то

$$I = \sum_i p_i \log_2 p_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

(при $p_1 = p_2 = \dots = p_n = 1/n$ формула (10) переходит в (9)). Если один из вариантов существенно предпочтительнее остальных ($p_i \gg p_{i \neq j}, p_i \approx 1, p_j \ll 1$), то

$$I = \log_2 1 + O(p_j) = 0. \quad (11)$$

Отметим, что понятие количества информации было введено К. Шенноном [45] задолго до определения самой информации; последнее, как упоминалось, до сих пор не общепринятое. Поэтому часто понятие "информация" заменяется ее количественной мерой. Это приводит к недоразумениям, поскольку информация бывает разная, т.е. она имеет ряд важных качеств, которые количественной мерой не отражаются.

О таких свойствах, как макроинформация и микроинформация, мы уже упоминали. Кроме того, важны такие ее качества, как условная (безусловная), новая (не новая), ценная (не ценная), кодовая и смысловая информация (пока мы употребляем эти термины, апеллируя к интуиции читателя). Часто это упускают из внимания, полагая, например, что не ценная информация вообще не является информацией. Последнее ведет к недоразумениям.

Обсудим эти свойства информации.

i) *Макроинформация* — запомненный выбор одного варианта из нескольких возможных; *запоминание* озна-

чает, что сделанный выбор сохраняется в течение времени, которое больше, чем характерное время использования данной информации. Последнее может колебаться от нескольких лет (если информация записана в книге, компьютере, на дискете и т.д.) до нескольких секунд.

ii) *Микроинформация* — незапомненный выбор одного варианта из нескольких возможных. Это означает, что данный выбор существует в течение не более пикосекунд, а далее забывается. Примером микроинформации может служить выбор определенного набора координат и скоростей молекул идеального газа в данный момент. Этот выбор в силу неустойчивости движения молекул разрушается (забывается) в течение времени нескольких соударений, т.е. в реальных условиях за время

$$\tau_{\text{micro}} \sim \frac{h}{kT} \sim 10^{-13} \text{ с} \quad \text{при } T = 300 \text{ К.}$$

В течение такого времени ни обработать микроинформацию, ни сделать прогноз на ее основе невозможно. Отметим, что микроинформация связана с физической энтропией. Эта связь основана на том, что понятие физической энтропии имеет смысл только тогда, когда система эргодична, т.е. быстро забывает о своем моментальном состоянии и с равной вероятностью пребывает во всех возможных состояниях.

Макроинформация с физической энтропией, вообще говоря, не связана. Изменение макроинформации (увеличение или уменьшение ее) в каком-либо процессе всегда сопровождается увеличением физической энтропии, которое существенно больше изменения макроинформации.

Формулы (9), (10) равно справедливы как для макро-, так и для микроинформации. Однако количественная разница между микро- и макроинформацией оказывается очень большой.

В случае макроинформации число n — число устойчивых состояний системы. В случае микроинформации n — полное число состояний, не обязательно устойчивых, т.е. понятие микроскопическое. Приведем пример. Энтропия одного моля идеального газа в состоянии термодинамического равновесия равна

$$S = \frac{3}{2} kN,$$

где $N_A = 6,02 \times 10^{23}$ — число Авагадро и $k = 1,38 \times 10^{-16}$ эрг/град — постоянная Больцмана. Энтропия связана с числом микросостояний n соотношением Больцмана

$$S = k \ln n.$$

Отсюда

$$n = \exp\left(\frac{S}{k}\right) = \exp\left(\frac{3}{2} N\right),$$

т.е. очень велико.

Если известны в данный момент времени скорость и координаты всех частиц газа (т.е. выбрано одно определенное микросостояние), то количество микроинформа-

ции равно

$$I = \log_2 a = \frac{S}{k} \log_2 e = 1,44 \frac{S}{k}. \quad (12)$$

Формула (12) известна как соотношение между микроинформацией и энтропией.

Оценим теперь количество макроинформации в сосуде с газом. Рассматриваемая система имеет единственное устойчивое стационарное состояние — термодинамически равновесное ($n = 1$). Поэтому количество макроинформации в ней равно $I_{\text{макро}} = \log_2 n = 0$. Отсюда видно, насколько макро- и микроинформация отличаются друг от друга не только количественно, но и качественно.

Во всех реальных информационных процессах используется макроинформация (запоминаемая). Микроинформация используется главным образом в теоретических спекуляциях по поводу "демона Максвелла".

Поэтому далее под информацией мы будем понимать только запоминаемую информацию и приставку "макро" опустим.

iii) *Условная и безусловная* (объективная) информация. Примером условной информации является информация о языке, в частности, алфавит, словарь, грамматика и т.д. Действительно, эта информация, нужная для общения в данной соции, использующей данный язык, возникла в результате условной договоренности. Условность этой информации подчеркивается тем, что в другой языковой соции принят другой язык, который, в принципе, может быть не хуже и не лучше первого.

Научная терминология также является условной информацией. Допустим, астроном открыл новую звезду, определил ее расстояние до Земли, светимость и т.д., но не предложил название. Эта информация объективна (безусловна). Другой астроном ничего не открыл, но предложил название новой звезды (информация условная). Название было принято, закрепилось и при этом честь открытия была приписана предложившему названию. Из сказанного следует, что даже в точных науках роль условной информации не мала.

Отделить условную информацию от безусловной не всегда просто. Здесь играют роль следующие обстоятельства.

Во-первых, условная информация имеет тенденцию к унификации, что естественно, поскольку при этом возрастает ее ценность.

Во-вторых, унифицированная условная информация часто воспринимается как безусловная. Так, унифицированная на нижнем уровне математика, включающая арифметику, создает мнение о том, что "иначе не может быть". Однако унификация математического аппарата произошла в результате эволюции. При этом были в употреблении варианты символики, отличающиеся от современной.

На более высоких уровнях существует несколько различных вариантов описания одних и тех же объектов: континуальное описание, динамические уравнения, вероятностные модели, клеточные автоматы и т.д. Во многих случаях вопрос о предпочтении того или иного варианта остается открытым. Поэтому выбор математического аппарата — акт генерации ценной условной информации.

В-третьих, наиболее интересным и острым остается вопрос об условности (или безусловности) информации в

естественных науках. Принято думать, что, изучая природу, мы рецептируем безусловную, вполне объективную информацию. Это действительно так, если речь идет об экспериментальных качественных результатах. Например, факт, что одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются, объективен. Однако интерпретация этого факта и даже представление его в виде закона Кулона содержит элемент условности. Действительно, здесь уже использован определенный математический язык (алгебра). Тот же закон мог быть изложен на другом языке (алгоритмическом или в виде компьютерной программы и т.д.). Разумеется, результаты должны совпадать так же, как и изложение одного и того же утверждения на разных языках.

iv) Часто выделяют *кодovou* и *смысловую* информацию. Так, для составления предложения, имеющего смысл, необходимо использовать алфавит, словарь, грамматику и т.д. (т.е. использовать код), хотя сам по себе код никакого смысла не несет. Иными словами, кодовая информация необходима для рецепции, генерации и передачи смысловой, т.е. является базой для смысловой информации. Существует специальный термин — *тезаурус*, — означающий базовую информацию, без которой смысловая не может быть воспринята.

В биологии смысловая информация означает, например, способность белка избирательно каталилизировать ту или иную реакцию. Эта способность определяется первичной последовательностью, которая, в частности, определяет способность взаимодействовать с кофактором, ингибитором и т.п.

Ясно, однако, что без кода и системы биосинтеза белка построение современной системы функциональных (имеющих смысл) белков было бы невозможно, даже при наличии соответствующей информации в ДНК.

v) *Новая* информация — выбор из многих вариантов, который ранее не был сделан. Она может быть как безусловной, так и условной. В обоих случаях термин "новая" воспринимается интуитивно. Существует утверждение о том, что новое — хорошо забытое старое, и оно имеет под собой почву. Точнее, новое, как правило, возникает на стыке наук, которые пользуются разными языками (кодами).

Так, например, слово *мать* в русском языке имеет вполне определенный смысл и новым не является. Напротив, слово *mutter* (на немецком означающее то же, что слово *мать* на русском) для большинства русских является новым.

Можно привести аналогичные примеры и в точных науках. Так, метод стационарных концентраций был известен в химии достаточно давно (и широко в ней использовался). Однако в математике идея этого метода была воспринята как новая, поскольку излагалась на химическом, а не на математическом языке. В математике этот метод был признан лишь после доказательства теорем (А.Н. Тихоновым и Л.С. Понтрягиным) и известен теперь как теорема Тихонова.

5.2. Ценность информации

Ценность информации зависит от *цели*, с которой эта информация используется. Слово "цель" здесь выделено, поскольку оно заслуживает специального обсуждения.

Существует несколько предложений количественного определения ценности информации. Первое принадлежит М.М. Бонгарту и А.А. Харкевичу [46, 47]. Оно

удобно в случае, когда априорная вероятность достижения цели P^{in} , т.е. вероятность достичь цель без получения (и/или генерации) информации, очень мала ($P^{\text{in}} \ll 1$). Тогда ценность информации i -го типа равна

$$V_i = \log_2 \frac{P_i^{\text{fin}}}{P^{\text{in}}}, \quad (13)$$

где P^{fin} — вероятность достижения цели после получения (и/или генерации) информации i -го типа. Логарифмическая мера ценности здесь также удобна, поскольку $P^{\text{in}} \ll 1$, в то время как P^{fin} может достигать значений порядка единицы.

Ценность информации может быть как положительной, если $P^{\text{fin}} > P^{\text{in}}$, так и отрицательной, если $P^{\text{fin}} < P^{\text{in}}$. В последнем случае она называется *дезинформацией*.

Наконец, каждый человек получает информацию, вообще не имеющую отношения к данной цели и, следовательно, имеющую нулевую ценность. Количество такой информации не мало.

Существует информация, которая, на первый взгляд, ни для кого и никогда не может стать ценной. Пример: в тексте наборщик переставил буквы так, что текст потерял всякий смысл. Количество информации сохранилось, но ценность его для кого бы то ни было, стала равна нулю.

Так появляется понятие *осмысленность*. В отличие от *ценности* это понятие претендует на объективность, что основано на следующем положении: можно выделить определенное количество информации, которая никогда ни для кого ни для какой цели не понадобится. Тогда эту информацию называют *лишенной смысла*. Объективность критерия основана на словах "ни для кого", "никогда", "ни для какой цели".

Утверждение сильное, абсолютное и как таковое, конечно, неверное. Так, в приведенном примере можно сказать, что абракадабра, которую сотворил наборщик, содержит ценную информацию для психиатра, цель которого — поставить наборщику диагноз. Поэтому утверждение "ни для кого" следует понимать: ни для кого среди людей, которых интересует смысл текста и ничего более. Однако и в этом случае осмысленность текста зависит от тезауруса. Так, например, наборщик набрал слово "трах-тибидох-тах-тах". На первый взгляд, это — бессмыслица, однако люди сведущие знают, что смысл в этих словах есть, поскольку именно с их помощью старик Хаттабыч творил чудеса.

Другой метод определения ценности информации был предложен Р.Л. Стратановичем [48]. Ценность информации измеряется величиной "штрафов" (или затрат), необходимых для достижения цели на выбранном пути. Этот метод удобен, если цель наверняка достижима даже без получения (рецепции и генерации) информации, но временные трудовые или денежные затраты зависят от выбора пути достижения цели.

В биологии наибольший интерес представляют случаи, априорная реализация которых очень мала. Такова, например, ситуация в проблеме происхождения жизни, биологической эволюции и т.п. Поэтому мы в дальнейшем будем пользоваться для оценок ценности информации выражением (13).

Цель — понятие привычное применительно к человеческому обществу. В упомянутых работах [46, 47] цель

считалась заданной извне, и происхождение ее не обсуждалось. Такая ситуация встречается довольно часто. Например, инженер, создающий новую машину, выбирает варианты конструкции. При этом цель — выполнение машиной заданной функции, и ценность выбора определяется этой целью. Если имеется несколько равноприемлемых вариантов, то выбор одного из них является нейтральной (не ценной) информацией. То же относится и к информации, заключенной в участке ДНК, кодирующей белковую последовательность. Здесь цель — выполнение белком его функции. Если замена части аминокислотных остатков на другие не препятствует выполнению функции, то выбор варианта представляет собой не ценную информацию. Именно в этом смысле слова "ценная информация" употреблялись выше в разделах 2 и 4.

В действительности человек может сам ставить перед собой цель. Как правило, для достижения главной цели ставятся промежуточные. Иными словами, существует система иерархических уровней, на каждом из которых ставится своя цель.

Поясним это на следующем примере. Учась говорить, ребенок рецептирует информацию о языке от своего окружения. Овладев языком, молодой человек оказывается перед выбором своей будущей специальности. Сделав свой выбор и овладев специальностью, человек в дальнейшем может неоднократно выбирать, в каком направлении приложить усилия. При этом новые выборы возможны только на основе прежних, более ранних. Можно сказать, что каждый раз человек ставит перед собой новую цель. Однако все они подчинены главной цели — выжить самому и обеспечить жизнь своим потомкам. Поведенческие реакции человека (условные и безусловные рефлексy) и связанные с ними желания подчинены той же цели. Исключения, когда человек ставит перед собой неблагоприятные и неестественные цели, мы обсуждать не будем, хотя таких исключений, к сожалению, немало.

Возникает вопрос: могут ли другие живые существа (включая простейших) ставить перед собой цель? Ответ известен: главная цель — выживание — имеется у всех живых существ. У человека она, как правило, осознана, у простейших — не осознана, но это не значит, что она отсутствует.

Поэтому ясно, что ценность информации — понятие содержательное и даже необходимое для описания живой природы. Оно связано с важным свойством живой природы — способностью живых существ к целеполаганию.

Есть ли цель у неживой природы? По этому поводу существует несколько точек зрения.

Первая точка зрения: у неживой природы цели нет, она развивалась в соответствии с законами природы, и этого достаточно для описания процессов.

Вторая точка зрения: у неживой природы и даже у каждой ее части (подсистемы) цель есть, и эта цель — достижение своего аттрактора, т.е. устойчивого конечного состояния.

Первая точка зрения достаточно распространена среди представителей естественных наук. Согласно ей информация в процессах эволюции неживой природы возникла и накапливалась, но ценность ее была равна нулю, поскольку цель отсутствовала. Иными словами, ценная информация в неживой природе отсутствует.

Именно поэтому понятие "информация" практически не использовалось (да и сейчас редко используется) при описании процессов в неживой природе. Это понятие просто не нужно, и использование его не конструктивно.

Вторая точка зрения, на первый взгляд, тоже имеет основание. Более того, на заре современной науки люди предпочитали формулировать законы природы теленомически, как стремление к некоторой цели. Так, в механике появился принцип наименьшего действия, эквивалентный законам динамики гамильтоновых систем. В термодинамике второе начало формулировалось как стремление энтропии замкнутых систем к максимуму. В более общем случае обсуждалось стремление динамической системы к аттрактору как ее цель.

Эти подходы были (и остаются) конструктивными в случае, когда решение динамической системы единственно (при заданных условиях), т.е. аттрактор один и заранее предопределен.

Если движение неустойчиво и конечных состояний (аттракторов) может быть несколько, то утверждение "целью является свой аттрактор" лишено смысла (поскольку не известно, который из них "свой").

Приведем пример: можно сказать, что целью тунгусского метеорита была тунгусская тайга (и действительно, какую же еще цель мог преследовать метеорит, будучи тунгусским?). Можно сказать также, что если шарик в рулетке попал в красную лунку, то это и была его, шарика, цель. Ясно, однако, что и то, и другое не более чем забавная игра слов.

Таким образом, сформулировать динамическую задачу в форме достижения цели для всей рассматриваемой системы можно, но только в случае, если аттрактор один и попадание в него заранее предопределено. Однако именно в этом случае информация не возникает. Иными словами, в неживой природе, если есть цель, то нет информации, если возникнет информация, то нет цели.

Возникает вопрос: была ли цель (и какая) у объектов, промежуточных между живыми и неживыми (т.е. у гиперциклов, о которых шла речь в разделе 2), и как возникла способность к целеполаганию? Ответ ясен из предыдущего: в неживой природе могут возникнуть системы, удовлетворяющие специальным условиям. В этих системах понятия "информация", "цель" и "ценная информация" становятся конструктивными и содержательными. Примером такой системы является ансамбль гиперциклов. Однако как только такая система возникает, она становится живой.

Каковы эти условия в общем случае, мы обсудим в следующем разделе.

5.3. Информатика, ее предмет и фундаментальные задачи

Информатика — наука о процессах передачи, возникновения (исчезновения), рецепции, хранения и обработки информации. В информатике можно условно выделить три направления.

В техническом аспекте информатика включает задачу, кодирование и прием информации.

В прикладном аспекте информатика включает разработку компьютеров, создание программ и т.п., т.е. то, что называют Computer Science.

В фундаментальном аспекте информатика включает разделы: возникновение (генерацию) ценной информации; эволюцию ценной информации; извлечение ценной

информации (обработку информации); реализацию ценной информации.

Мы обсудим фундаментальные проблемы информатики. Напомним основные понятия.

Выбор, сделанный кем-то и навязанный системе (продиктованный извне), называется *рецепцией* информации.

Выбор, сделанный случайно (или содержащий элемент случайности), называется *генерацией* информации. В жизни мы часто сталкиваемся с необходимостью принимать решения в условиях недостаточной определенности. То же происходит в азартных играх типа рулетки. Вопрос о случайном выборе важен и в фундаментальных проблемах таких, как происхождение жизни (возникновение генетической информации), биологическая эволюция и т.д. Наконец, каждый акт творчества — пример непредсказуемого выбора.

Генерация информации возможна отнюдь не в любой физической системе. Для этого система должна обладать определенными свойствами. Перечислим их, используя термины и понятия теории динамических систем.

1. Система должна быть *мультистабильной* (по крайней мере бистабильной). Это означает, что у системы должно быть $n \geq 2$ устойчивых состояний и может быть осуществлен выбор одного из них.

2. Выбранное состояние может считаться *запомненным*, если оно сохраняется достаточно долго. Для этого необходимо, чтобы оно было абсолютно устойчивым (т.е. действительные части всех его чисел Ляпунова отрицательны). Такие системы являются диссипативными.

3. Система должна содержать *перемешивающий слой*.

В динамической системе перемешивающий слой определяется как область фазового пространства, обладающая следующими свойствами [19, 49]:

1) все траектории, выходящие из заданной области начальных условий, попадают в перемешивающий слой;

2) внутри перемешивающего слоя поведение траектории хаотично, т.е. энтропия Колмогорова достаточно велика, система глобально неустойчива;

3) все траектории, попавшие в перемешивающий слой, выходят из него и попадают в динамический мультистабионарный слой, в котором существуют по меньшей мере два устойчивых стационарных состояния.

От странного аттрактора перемешивающий слой отличается свойством 3).

В системах с перемешивающим слоем можно ввести два понятия: временной и пространственный горизонты прогнозирования. Временной горизонт прогнозирования широко используется в стохастических процессах и представляет собой интервал времени Δt , в течение которого можно с вероятностью, близкой к единице, предсказать состояние системы в момент времени $t + \Delta t$, если оно известно в момент t . По порядку величины Δt равно $1/\lambda$, где λ — максимальное число Ляпунова.

Пространственный горизонт прогнозирования δx имеет смысл только в перемешивающем слое; величина δx — интервал начальных условий, которые приводят (с высокой вероятностью) к одному и тому же конечному состоянию.

Если перемешивающий слой достаточно широк и энтропия Колмогорова в нем достаточно велика, то пространственный горизонт прогнозирования очень

мал. Отсюда следует, что, зная начальные условия с точностью Δx (такой, что $\Delta x \gg \delta x$), практически невозможно предсказать, в какое именно конечное состояние попадает система.

Примером системы с перемешивающим слоем может служить китайский бильярд. Он представляет собой шарик, движущийся по плоскости, усеянной штырьками и имеющей две лунки ("красная" и "черная"; рис. 7). Движение шарика описывается законами Ньютона с учетом трения. Вначале (до первого соударения со штырьком — область *a*) поведение шарика динамично (входной динамический слой). Когда шарик отражается от штырьков, играющих роль выпуклой отражающей стенки в бильярде Синая (область *b*), движение шарика хаотично — это и есть перемешивающий слой. Когда движение шарика замедляется, он попадает в область притяжения одной из лунок (область *c*) и скатывается в нее. В этой области поведение шарика снова динамично и предсказуемо (выходной динамический слой). Теми же свойствами обладает рулетка, используемая в азартной игре.

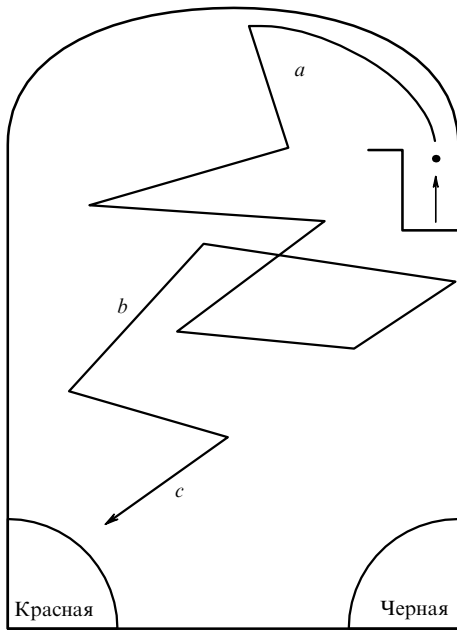


Рис. 7. Схема китайского бильярда (простейшая рулетка): *a* — входной динамический слой, *b* — перемешивающий слой, *c* — выходной динамический режим.

Проследим процесс генерации информации на примере игры в рулетку и покажем, что ценность генерируемой информации изменяется со временем.

Допустим, что игрок делает ставку (т.е. выбор), например, на *красное* (т.е. генерирует информацию) в начальный момент, а затем с волнением следит за движением шарика. Допустим, что игроку известны уравнения движения, и он может определить положение и скорость шарика с конечной точностью в любой промежуточный момент t . Тогда он может в каждый момент времени оценить вероятность достижения цели $P_{кр}^{fin}(t)$, сравнить ее с априорной вероятностью $P^{in} = 1/2$ и определить ценность своей информации. В начальный момент $t = 0$ предсказать результат невозможно, и поэтому $P_{кр}^{fin}(t = 0) = P_{чеп}^{fin}(t = 0) = 1/2$. Ценность лю-

бой информации в этот момент равна нулю:

$$V_{кр}(t = 0) = V_{чеп}(t = 0) = \log_2 \frac{P^{fin}}{P^{in}} = 0,$$

т.е. в начальный момент генерируется лишь не ценная информация.

В конечный момент $t > t_d$, когда шарик уже попал в область притяжения лунки (например, красной),

$$P_{кр}^{fin}(t) = 1, \quad P_{чеп}^{fin}(t) = 0.$$

При этом

$$V_{кр}(t > t_d) = \log_2 2 = 1 = V_{max},$$

$$V_{чеп}(t > t_d) = \log 0 = -\infty.$$

В промежуточный момент $t < t_d$, близкий к выходу из перемешивающего слоя, можно предсказать результат с вероятностью, которая отличается от нуля, единицы и половины. Например,

$$\frac{1}{2} < P_{кр}^{fin}(t) < 1, \quad 0 < P_{чеп}^{fin}(t) < \frac{1}{2}.$$

Тогда ценности будут равны

$$V_{кр}(t \leq t_d) = \log_2 2 \cdot P_{кр}^{fin}(t \leq t_d) > 0,$$

$$V_{чеп}(t \leq t_d) = \log_2 2 \cdot P_{чеп}^{fin}(t \leq t_d) < 0.$$

Отсюда следует, что ценность информации зависит от времени. Вначале она равна нулю, затем повышается (или понижается) вплоть до момента выхода из перемешивающего слоя.

В игре допускается делать ставки (генерировать информацию) не только вначале, но и в промежуточные моменты времени, когда шарик уже запущен, но до момента t_{cr} , когда крупье объявляет, что игра окончена. Опытный крупье выбирает момент t_{cr} в конце перемешивающего слоя, т.е. при $t_{cr} \leq t_d$. Однако если крупье ленив (или пьян), то он может опоздать и произнести роковые слова, когда шарик уже почти в лунке (т.е. при $t_{cr} > t_d$). Видя это, игрок может сделать ставку и выиграть наверняка. Однако это уже не генерация ценной информации, а рецепция ее из игровой системы.

Если игрок имеет возможность быстро определять координаты и скорость шарика и быстро вычислять траекторию, то он может сделать ставку в момент $t \leq t_{cr}$ и с большой вероятностью выиграть. В этом случае можно сказать, что ценная информация частично рецептируется и частично генерируется.

Реально проводить определение координат и вычисление с необходимой скоростью и точностью невозможно. Тем не менее, имея определенный опыт и интуицию, сделать это в принципе возможно (выражение "внутренний голос говорит" в данном случае имеет под собой некоторую почву). Именно это обстоятельство делает азартную игру столь притягательной.

Можно даже сказать, что игра в рулетку это не только игра, но и упражнение в генерации ценной информации. Это упражнение содержит два важных элемента: выбор оптимального момента генерации; сбор и обработку (хотя бы на интуитивном уровне) необходимой информации (последнее уменьшает количество генерируемой информации, но увеличивает ее ценность).

Мы остановились на примерах перемешивания и перемешивающего слоя, заимствованных из механики, потому что там они наглядны и хорошо изучены.

В живой природе "игра в рулетку" происходит достаточно часто. Более того, можно сказать, что наличие перемешивающего слоя — необходимое свойство любой живой системы, способной генерировать ценную информацию.

В приведенном примере цель ставилась извне, т.е. игроком, но не возникала сама собой в системе (т.е. в рулетке). Последнее возможно в динамических системах, удовлетворяющих следующим условиям.

i) Система должна состоять из элементов, каждый из которых обладает свойствами 1)–3), упомянутыми выше. Это значит, что каждый элемент находится в одном определенном состоянии (из числа возможных), которое выбрано случайно и запомнено в нем. Иными словами, в каждом элементе содержится присущая ему (т.е. "своя") информация.

ii) Элементы должны обладать свойством самовоспроизведения (автокатализа). Это свойство необходимо для запоминания сделанного выбора на времена, существенно большие по сравнению со временем жизни каждого элемента.

iii) Взаимодействие между элементами с разной информацией должно быть антагонистическим.

В таких системах можно ввести понятие "цель" и сформулировать ее так [19]:

цель каждого элемента — сохранение своей информации.

Это утверждение является обобщением принципа борьбы за существование, но может быть распространено и на промежуточные системы, удовлетворяющие условиям i)–iii). Рассмотренная выше система из первичных гиперциклов обладает этими свойствами.

В неживой природе можно указать примеры систем, удовлетворяющих каждому из приведенных условий в отдельности, но не всем им вместе. Каждое из условий можно описать на физико-химическом языке, что и было сделано выше на примере возникновения гиперциклов.

Сформулировав цель, можно проследить эволюцию ценности возникающей в ней информации. Рассмотрим это на примере выбора единого кода.

Случайный синтез комплекса ДНК – репликаза и соответствующих этому комплексу адаптеров — реализация одного из вариантов кода, т.е. генерация информации. Каждый из таких комплексов — носитель своей информации. При взаимодействии каждая популяция стремится сохранить свою информацию, и это является ее целью (но не целью всей системы).

С одной стороны, это не более чем краткое описание физико-химических процессов, приводящих к антагонистическому взаимодействию. С другой стороны, это обобщение принципа борьбы за существование. Действительно, положение: *целью является сохранение своей информации*, можно распространить не только на живые существа, но и на неживые объекты, обладающие специальными свойствами и способные стать живыми (например, на гиперциклы).

Такое определение цели можно распространить и на поведение человека в обществе. При этом под "своей информацией" следует понимать не только унаследованную, но и информацию, приобретенную и созданную человеком в течение его жизни. Тогда эта цель

охватывает не только желание человека выжить и дать потомство, но и стремление его к познанию и творчеству.

Проследим на примере взаимодействия гиперциклов эволюцию ценности информации. Вначале, когда все популяции представлены одинаково, ценность любой информации равна нулю, поскольку апостериорная вероятность выжить (после образования популяции, т.е. после выбора варианта кода) P^{fin} равна априорной P^{in} .

По мере вытеснения других популяций какой-либо одной повышается вероятность сохранения информации, своей именно для этой популяции. Ее информация становится более ценной. В конце процесса, когда остается одно чистое состояние, соответствующая этой популяции информация становится наиболее ценной.

В этот момент можно сказать, что цель всей системы совпадает с целью ее элементов. Однако смысл этих слов таков же, как смысл утверждения, что целью тунгусского метеорита была тунгусская тайга.

6. Проблема возникновения мышления

Эта проблема отличается от предыдущих. Ранее шла речь о конкретных процессах и явлениях. Вопрос заключался в том, что, казалось бы, обоснованные оценки приводили к абсурдным результатам. Для решения проблемы достаточно было рассмотреть альтернативные пути и показать, что они приводят к разумным оценкам.

Центр тяжести проблемы мышления в другом: нужно сформулировать, что, собственно, мы хотим описать на физическом языке, какое именно явление представляется нам загадочным и необъяснимым. Именно этот вопрос обсуждается в упомянутых выше монографиях [8–11] и обзорных статьях [12, 13]. Задача еще не решена, и мы обсудим возможные пути ее решения. Вопрос о том, как возник аппарат мышления, целесообразно обсудить после этого.

Претендовать на определение "мышления" мы не будем, но перечислим основные его свойства и покажем, что каждое из них (и даже все вместе) может быть сведено к цепи физико-химических процессов. Более того, мы покажем, что математические модели таких процессов сейчас уже существуют и успешно работают. Для этого нам придется сделать экскурс в теорию распознавания и теорию нейросетей (нейрокомпьютинг).

6.1. Основные свойства процесса мышления

i) Процесс мышления протекает в нервных сетях высших животных и в первую очередь человека. В науках о реальных нейросетях — нейрофизиологии и нейрохимии — сделано очень много: известно, как формируются и распространяются нервные импульсы, известно, как они передаются от нейрона к нейрону и т.д. Все это описано в учебниках и специальных монографиях [50], однако вопрос, как человек мыслит (особенно интуитивно), в этих науках пока остается открытым.

ii) При мышлении происходит обработка информации (как уже имеющейся, так и поступающей извне). Результатом обработки является прогноз поведения окружающих объектов (как живых, так и неживых).

iii) Конечным результатом мышления является принятие решения, т.е. выбор одного из нескольких возможных вариантов дальнейших действий, иными словами,

информация. Ценность этой информации зависит от цели. Последняя может быть либо поставлена перед человеком, либо сформулирована им самим, т.е. мышление — свойство систем, способных к самополаганию цели.

iv) На каждом этапе мышления происходит как рецепция информации, так и генерация новой. Последнее связано с творчеством, поэтому творчество является частью мышления.

v) Принято различать мышление логическое и интуитивное. При логическом мышлении используется однозначный алгоритм, что возможно, когда исходной информации достаточно для принятия однозначного (единственно верного) решения. Творчество в этом случае сводится к выбору оптимального пути получения результата, но не к самому результату. Последний фактически уже содержится в алгоритме (т.е. в аксиоматике) и начальных условиях.

Интуитивное мышление основано на ассоциациях, аналогиях и прецедентах. К нему прибегают, когда исходной информации недостаточно для принятия решения или когда сам алгоритм допускает разветвления и, следовательно, неоднозначен. Это имеет место в случае неустойчивости процесса принятия решения.

Интуитивные прогнозы реализуются с высокой, но не стопроцентной вероятностью. Их достоверность (или убедительность) зависит от многих тонкостей (признаков), которые часто ускользают от внимания. Построение убедительного интуитивного вывода — искусство.

В реальной жизни интуитивное мышление преобладает, то же можно сказать и о гуманитарных науках, и об искусстве. Важно, что в естественных и точных науках роль интуитивного мышления не мала [51].

Принято думать, что к логическому мышлению способен только человек, но не животные. К интуитивному мышлению способны как люди, так и животные, поскольку им тоже приходится принимать решения. Поэтому часто логическое мышление ставят выше интуитивного, считая его более абстрактным и совершенным.

vi) Мышление, особенно интуитивное, индивидуально. Известно, что разные люди решают задачи распознавания и прогнозирования по-разному. При этом результаты могут (и должны) совпадать (что, правда, бывает не всегда), но пути достижения результата различны, что и отражает индивидуальность мышления.

При попытке описать эти свойства на физическом языке необходимо использовать теорию распознавания и нейрокомпьютеринг.

6.2. Экскурс в теорию распознавания

Основы теории распознавания были заложены в работах М.М. Бонгарта [46], А. Кронрода, П. Кунина и И.М. Гельфанда (см. [52, 53]). В них обсуждалась, казалось бы, далекая от науки проблема: как мышка узнает кошку? Далее теория распознавания нашла применение во многих прикладных областях, в частности, в военном деле, в распознавании текстов [54] и особенно в медицинской диагностике [53, 55].

Теория распознавания образа преследует те же цели, что и все другие теории — прогноз поведения наблюдаемого объекта. В остальном это теория особого типа. В ней отсутствует аксиоматика и логика, вместо этого

используются прецеденты. Основой теории служит следующее утверждение.

Если наблюдаемый объект похож на уже известный, то его поведение будет сходно с поведением прототипа.

Что такое "похож" и какова мера "похожести" — это и есть предмет теории.

Требование доказательства утверждения в этой теории тоже отсутствует. Оно заменяется критериями похожести, которые никогда не позволяют вынести совершенно однозначное суждение. Тем не менее теория распознавания рассматривается сейчас как раздел математики. В ней используются свои понятия и термины; обсудим их смысл.

Обучающее множество — набор уже известных прецедентов.

Экзаменуемое множество — набор объектов (или явлений), которые сравниваются с уже известными прецедентами.

Признаки — качественные и количественные характеристики объектов обучающего множества, которые могут принимать как непрерывные значения, так и дискретные. В последнем случае часто используется дихотомическая система, т.е. признак принимает всего два значения: "да" или "нет" (или 0, 1, или $-1, +1$).

Приведем примеры из медицинской диагностики. Признаками являются температура, биохимические анализы и т.п. (непрерывные признаки), а также группа крови, цвет глаз и т.п. (дискретные признаки).

Пространством признаков называется геометрическое построение, в котором величина каждого признака отложена по своей оси; эти оси, как правило (но не всегда), ортогональны друг другу. В пространстве признаков каждый элемент множества представлен точкой.

Кластеризация и классификация. Как правило, точки в пространстве признаков распределены не равномерно, но образуют группы (кластеры), отделенные друг от друга областями, где плотность точек мала.

Отделенные друг от друга группы называют *классами*; описанная выше процедура называется *графическим* (визуальным) *методом классификации*. Существуют другие методы (аналитические), которые по существу эквивалентны графическому.

Конъюнкции. Часто классы и разделы между ними в пространстве признаков располагаются не на осях, а в глубине. Тогда можно преобразовать пространство, т.е. ввести новые переменные, которые являются комбинациями (линейными или не линейными) прежних признаков. Такие комбинации называются конъюнкциями. В медицинской диагностике признакам соответствуют симптомы, а конъюнкциям — синдромы.

Решающее правило — алгоритм, позволяющий отнести экзаменуемый объект к одному из классов. Если оно сформулировано и при этом число конъюнкций невелико, то задача распознавания упрощается и решается быстро.

Обучение — процедура, приводящая к формулировке решающего правила.

Если пространство признаков заранее выбрано и обучающее множество составлено из элементов, принадлежащих разным классам, то процедура обучения упрощается. При этом остается проблема составления конъюнкций и формирования решающего правила. Именно так обстоит дело на практических занятиях по диагностике или по систематике (растений и/или живот-

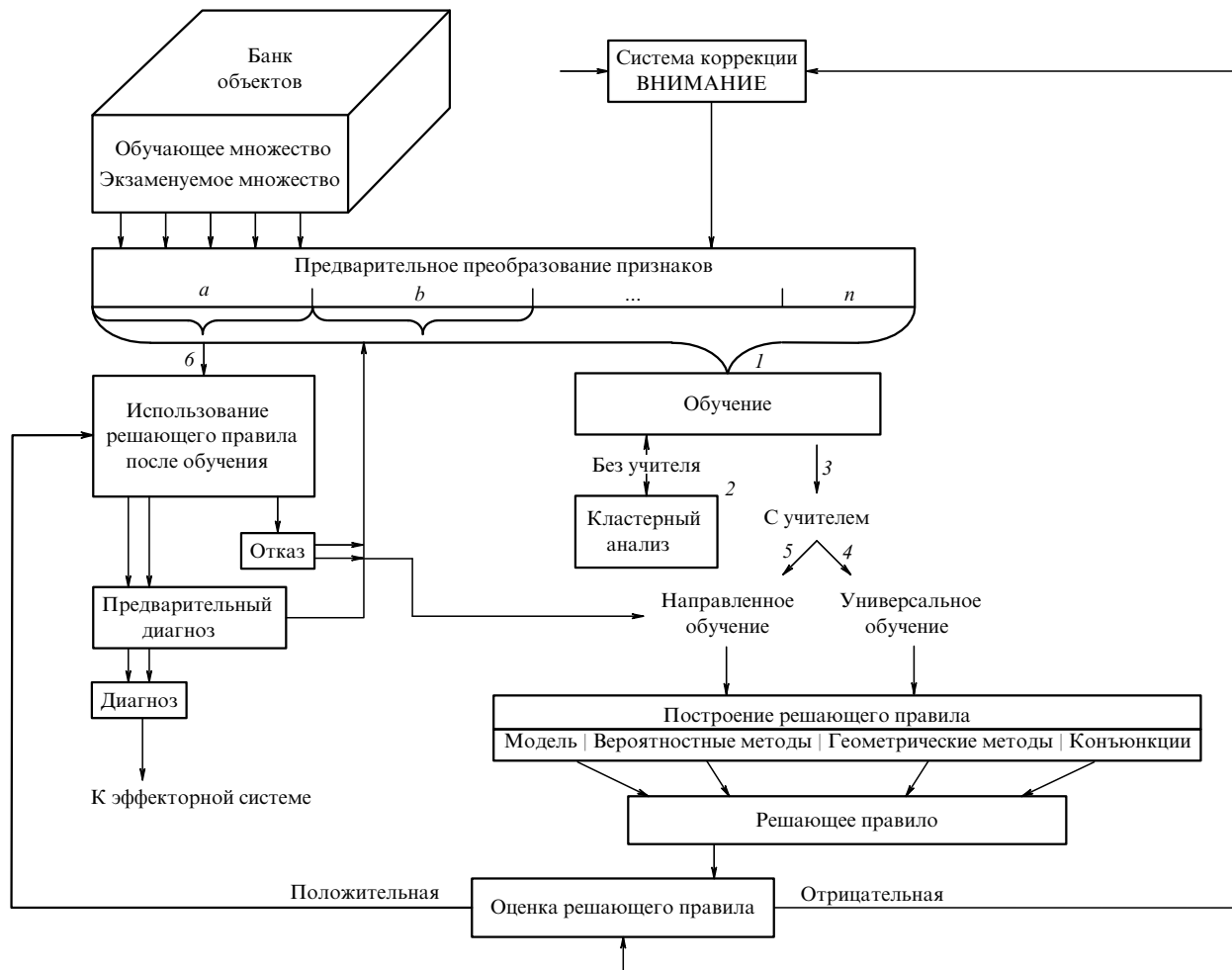


Рис. 8. Блок-схема процесса распознавания образа (диагностики).

ных) при обучении студентов. Такой способ называется обучением с учителем (*supervised*).

Если ничего не известно, то необходимо использовать всю процедуру; это называется *обучением без учителя*. Именно так обстоит дело в случае изучения новой флоры и/или фауны и при диагностике новых заболеваний.

Подтверждение используется в случае, когда результат распознавания ответственен. В этом случае процедура распознавания (при заданном решающем правиле) проводится несколько раз. Затем результаты сравниваются, и в случае совпадения выдаются как окончательные. В противном случае проводится процедура дообучения и формулируется новое (уточненное) решающее правило.

Внимание — сравнительно новый (в теории) термин, который, помимо житейского, приобретает сейчас математический смысл. Как упоминалось, выбор признаков, оценка их значимости и выбор конъюнкций и их весовых коэффициентов часто делаются наугад и затем эти величины уточняются методом проб и ошибок. При этом часто (осознанно или неосознанно) используется предшествующая информация или информация со стороны. *Вниманием* называется выбор упомянутых величин на основе сторонней (и/или предшествующей) информации (т.е. фактически рецепция этой информации).

Это определение не противоречит житейскому пониманию термина. Так, например, совет со стороны "обратить внимание на такой-то признак" означает, что его вес в конъюнкции должен быть повышен.

Благодаря вниманию процесс распознавания может быть существенно ускорен. Однако есть и обратная сторона: если внимание ориентировано ошибочно, то это может привести к ошибочному результату или к отказу узнающей системы.

Сказанное можно иллюстрировать схемой на рис. 8 (заимствовано из [55]). На примере рис. 8 уместно обсудить роль логического и интуитивного в распознавании образа. Правая сторона схемы основана на интуиции человека и без него неосуществима. Действительно, исходных признаков достаточно много и число их комбинаций (конъюнкций) факториально велико. При логическом подходе необходимо перебрать все конъюнкции, что недоступно ни человеку, ни компьютеру. Реально выбор значимых признаков и их конъюнкций берет на себя врач, используя свой опыт и интуицию, т.е. путем прямого усмотрения истины. Для формулировки решающего правила тоже необходимы интуиция врача и тезаурус программиста, т.е. знание языка, на котором построен конечный алгоритм.

Левая сторона схемы — распознавание на основе однозначного алгоритма — может считаться логической операцией.

Логическое распознавание имеет ряд преимуществ, но и ряд недостатков.

Во-первых, при этом нет необходимости делать переборы, что существенно ускоряет процесс.

Во-вторых, решающее правило позволяет провести интерполяцию внутри обучающего множества. При этом множество признаков, объектов и диагнозов из дискретного множества превращается в непрерывное.

В-третьих, появляется возможность экстраполировать решающее правило за пределы обучающего множества. Экстраполяция всегда содержит гипотетический элемент. Иногда он оказывается оправданным, и тогда логическое распознавание дает большие преимущества. Иногда он не оправдан, и тогда логическое распознавание ведет к ошибке. При интуитивном распознавании объектов вне данного множества человек обращается к другим обучающим множествам и проверяет, действует ли там то же решающее правило. Этот путь более длинный, но и более надежный.

В-четвертых, логическое распознавание допускает тиражирование, т.е. передачу решающего правила другим людям и использование его, минуя стадию обучения. Примером того являются учебники по медицинской диагностике.

В-пятых, при формулировке решающего правила происходит свертка информации, количество ее уменьшается (поскольку детали опускаются), но ценная информация сохраняется. Для запоминания ее нужен меньший объем памяти. Можно сказать, что решающее правило выглядит как абстракция по сравнению с интуитивным распознаванием. Это важно, когда человек имеет дело сразу с несколькими обучающими множествами. Запомнить процедуры распознавания во всех них практически невозможно, но запомнить решающие правила — задача реальная. Более того, в этом случае набор решающих правил можно рассматривать как некое супермножество и сформулировать решающее правило, которое будет играть роль единой теории, охватывающей все обучающие множества.

Подчеркнем, что при логическом распознавании новая ценная информация не возникает, происходит лишь обработка рецептируемой информации и выделение из нее ценной. Генерация ценной информации происходит в правой, интуитивной части схемы на рис. 8.

Распознавание, т.е. отнесение экзаменуемого объекта к определенному классу, имеет смысл, когда число классов дискретно, конечно и каждый класс отличается от других. Например, в медицинской диагностике классы — различные состояния организма.

На языке динамических систем объекты одного множества должны описываться одной мультистационарной моделью. Тогда пространство признаков соответствует фазовому пространству, а классы — разным стационарным состояниям. При этом сама динамическая модель играет роль решающего правила.

Поясним сказанное на примере из физики — формулировке закона Кулона. В этом случае обучающее множество — дискретный набор пар зарядов q_{i1} , q_{i2} на расстоянии \mathbf{R}_i друг от друга. Исходное пространство признаков включало величины зарядов, расстояние \mathbf{R} , размеры объектов, несущих заряды r , и т.п. Целью "диагноза" было определение силы \mathbf{F}_i , возникающей между зарядами.

В обучающем множестве было выделено два класса: $|\mathbf{R}_i| \gg r$ и $|\mathbf{R}_i| < r$. В первом классе уже на интуитивном уровне были выделены значимые признаки q_{i1} , q_{i2} и \mathbf{R}_i , основная конъюнкция $q_{i1}q_{i2}/|\mathbf{R}_i^2|$ и сформулировано решающее правило, т.е. закон Кулона

$$\mathbf{F}_i = \frac{q_{i1}q_{i2}}{|\mathbf{R}_i^2|} \frac{\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|}.$$

При этом был использован тезаурус — векторная алгебра. Далее была проведена интерполяция этого правила, и дискретное множество наблюдений превратилось в непрерывное множество решений. Была проведена экстраполяция этого правила на большие (астрономические) расстояния; она оправдалась. Была сформулирована гипотеза об аддитивности сил в системах из многих зарядов. Она позволила получить решающее правило для взаимодействия электрических мультиполей чисто логическим путем, оно тоже оправдалось.

Экстраполяция на малые (атомные) расстояния не оправдалась. Пришлось обращаться к другому обучающему множеству, пройти весь путь интуитивного распознавания и сформулировать новое решающее правило — уравнение Шрёдингера.

Мы остановились на этом столь детально, чтобы продемонстрировать, как в теории распознавания интуитивный и логический пути переплетаются и дополняют друг друга.

Процесс узнавания может быть автоматизирован с использованием современных универсальных компьютеров.

В последнее время появились специализированные компьютеры — так называемые нейрокомпьютеры, их следует обсудить отдельно.

6.3. Нейрокомпьютинг

Нейрокомпьютинг, или, что то же, теория нейросетей — новое, бурно развивающееся направление математики и вычислительной техники. Первоначально оно возникло как попытка математического моделирования реальных нейросетей. При этом в качестве модели нейрона был выбран простейший бистабильный элемент. Основное внимание было обращено на связи между элементами. Такая модель оказалась плодотворной в прикладном отношении и стала развиваться самостоятельно. О нейрофизиологии скоро забыли, хотя термины (нейропроцессор, нейрон) сохранились; сейчас они оправданы лишь исторически. С другой стороны, многие нейрофизиологи были возмущены подобным упрощением нейрона, ибо реальный нейрон гораздо сложнее бистабильного элемента. В результате сейчас нейрокомпьютинг и нейрофизиология — разные области науки, и достижения в одной области порой не используются в другой. Вместе с тем некоторые результаты, полученные в теории нейросетей, имеют принципиальное значение как для нейрофизиологии, так и для информатики в целом. В этом разделе мы кратко изложим основные положения нейрокомпьютинга. Представление о современном состоянии можно получить, например, из [56–61].

Простейший нейропроцессор представляет собой пластину, на которой расположены активные элементы (условно называемые нейронами). В простейшем случае это двухпозиционные автоматы, способные находиться в двух состояниях. В частности, это могут быть лампочки,

которые либо горят (первое состояние), либо не горят (второе состояние). Активные элементы соединены связями (проводами). Если связанные элементы находятся в одинаковом состоянии, то ток по связи не идет. Если связанные элементы различны, то каждый из них стремится переключить другой элемент в свое состояние. При этом по связи идет ток.

В предельном случае каждый элемент соединен со всеми другими. В действительности число связей может быть и меньше, но должно быть все же достаточно большим. Поэтому конечное состояние каждого элемента зависит от алгебраической суммы сигналов, поступающих на него от других элементов: если большинство из них возбуждены, то и он возбуждается, если же большинство из них не возбуждены, то и он затухает.

Схема такого процессора представлена на рис. 9.

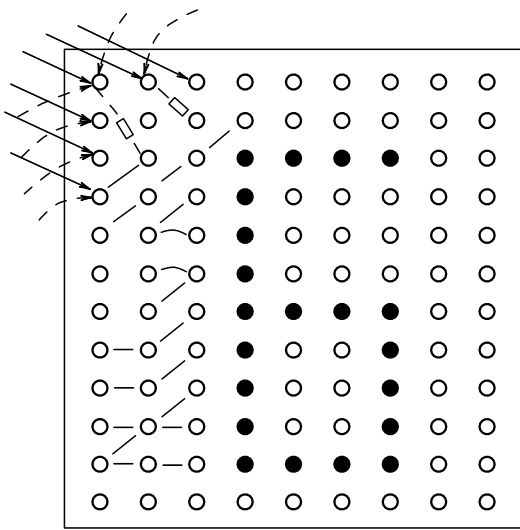


Рис. 9. Схема распознающего нейропроцессора Хопфилда.

Каждая связь обладает следующим важным свойством: сила связи необратимо меняется в зависимости от того, течет ли по ней ток. Это достигается за счет специальных устройств (на схеме они изображены прямоугольниками), которые увеличивают сопротивление проводника (т.е. уменьшают силу связи) в случае, когда по нему течет ток.

Предъявление образа, или, что то же, ввод первичного набора признаков, производится следующим образом. В начальный момент по внешним связям (на схеме они изображены сплошными стрелками) подаются сигналы, переводящие определенные элементы в активное состояние (например, некоторые лампочки зажигаются). Предъявленный образ поддерживается некоторое время, в течение которого связи "обучаются" (т.е. проводимость связей, по которым идет ток, уменьшается).

Если начальная совокупность признаков представлена в числовой форме, то необходимо условиться, какая картина горящих лампочек соответствует каждому из образов, т.е. необходимо закодировать таблицу признаков. Если вводимая информация представлена в визуальной форме (например, в виде картинки, схемы или портрета), то можно ту же картину представить в форме горящих лампочек.

Устроенный таким образом процессор обладает следующими свойствами.

Во-первых, он способен к обучению. Для этого достаточно предъявить процессору стандартный объект-образец (в форме зажженных лампочек), например, букву "Б" (см. рис. 9), и поддерживать эту картину достаточно долго. При этом связи между горящими и темными лампочками ослабевают, и после выключения внешнего сигнала уже не изменяются.

Процедуру нужно повторить, используя каждый раз объекты-образцы для разных классов (например, буквы "А", "Б" и т.д.).

После обучения процессор может распознавать предъявляемые (экзаменуемые) объекты, соотнося их с определенным классом (из тех, которым он был обучен). Например, при обучении можно использовать портреты различных людей. После обучения предъявляется портрет одного из них, но в неполной и зашумленной форме, т.е. в нем некоторые детали опущены (лампочки не горят) и прибавлены лишние (зажжены лишние). Тогда нейропроцессор после некоторой работы выдает полный и чистый портрет, т.е. узнает предъявленный образ.

Механизм явления прост, поясним его "на пальцах".

Пусть после обучения процессору предъявлен зашумленный образ "Б", в котором некоторые нейроны, входящие в образ, не возбуждены, и, напротив, возбуждены некоторые "лишние" нейроны. Тогда в результате работы процессора недостающие для образа "Б" нейроны будут возбуждены, поскольку их связи с возбужденными нейронами образа достаточно сильны, а связи с невозбужденными нейронами ослаблены. "Лишние" возбужденные нейроны будут "погашены", поскольку их связи с возбужденными нейронами образа "Б" ослаблены, а с другими (невозбужденными) нейронами достаточно сильны.

Проблема внимания в нейрокомпьютерах решается следующим образом. К каждому элементу подводится извне специальный проводник (на рис. 9 они представлены штриховыми стрелками). Подаваемые по нему сигналы поступают не на вход элемента, а в другое место, которое регулирует порог возбуждения элемента. Благодаря этому можно сделать систему более восприимчивой к какой-то части образов (или к одному из них) и ослабить внимание к другим.

Рассмотренный выше простейший вариант называется *процессором Хопфилда* [56]. Он обладает рядом недостатков: в нем трудно реализовать "подтверждение" и трудно организовать направленные потоки информации (поскольку связи симметричны, т.е. ток по проволокам может течь как в одну, так и в другую сторону). Сейчас в более совершенных процессорах используются направленные связи (по которым ток течет только в одном направлении) и несколько пластин.

Процедура обучения направленных связей несколько сложнее, чем в процессоре Хопфилда, но принцип остается тот же: связь изменяется, если по ней течет ток.

Подтверждение и повторение можно реализовать в процессоре, содержащем по крайней мере две пластины. Такой процессор получил название *back propagation*. В первой пластине образ распознается и передается на вторую. Там процесс распознавания повторяется с учетом дополнительной информации и возвращается на первую. Это повторяется несколько раз до тех пор, пока образы не совпадут.

Связи между пластинами должны быть достаточно сильны и направлены как в одну, так и в другую сторону.

Нейрокомпьютер Грассберга [57] содержит не менее двух пластин. Первая содержит обученные связи, и в ней происходит собственно распознавание. Информация передается на вторую пластину по межпластинчатым связям (не обязательно обученным). Во второй пластине элементы и связи между ними организованы следующим образом. Каждый элемент имеет связь, замкнутую на себя; она обеспечивает самоактивацию элемента. Кроме того, имеются обучаемые тормозящие связи, направленные к другим элементам. Благодаря этому распознанный образ предстает во второй пластине в форме одного элемента в активном состоянии (т.е. в виде одной горящей лампочки).

Иными словами, образ автолокализуется в пластине. Этим достигаются следующие преимущества. Во-первых, увеличивается число распознаваемых образов. Во-вторых, уменьшается вероятность ошибочного распознавания. В-третьих, упрощается задача акцентирования внимания на конкретном образе за счет локализации его в пространстве.

Упомянутые выше процессы можно описать математическими моделями.

Модель уже обученного нейропроцессора Хопфилда имеет вид

$$\frac{du_i}{dt} = f(u_i) + \sum_{j \neq i} w_{ij} u_j, \quad (14)$$

где $f(u)$ описывает свойства нейрона. В простейшем случае нейрон — бистабильный симметричный элемент, и тогда

$$f(u_i) = u_i - u_i^3. \quad (15)$$

В стационарных состояниях $u = \pm 1$ (значение $u = +1$ соответствует активному состоянию — горящей лампочке, $u = -1$ — пассивному). Внешние воздействия, необходимые для переключения из одного состояния в другое (т.е. пороги переключения), в этом случае одинаковы.

В случае когда пороги не одинаковы,

$$f_i(u_i) = u_i + b_i u_i^2 - u_i^3, \quad (16)$$

где параметр b_i регулирует порог переключения i -го элемента. Изменением величин b_i можно акцентировать "внимание" на том или ином образе. Для этого достаточно понизить пороги переключения в активное состояние тех нейронов, которые в данном образе должны быть активны.

Величины w_{ij} — силы связей между нейронами. В процессоре Хопфилда они симметричны, т.е. $w_{ij} = w_{ji}$. В простейшем случае все w_{ij} положительны, но различны по величине. При этом каждый нейрон стремится переключить другой, связанный с ним нейрон в "свое" состояние.

В целом модель (14) по структуре близка к модели выбора (6), которую мы рассматривали раньше. Отличие в том, что коэффициенты w_{ij} не одинаковы; они формируются в результате обучения.

Модель, описывающая процесс обучения, имеет вид

$$\frac{dw_{ij}}{dt} = w^0 \left(1 - \frac{1}{2} \int_0^\tau (1 - u_i u_j) \varphi(t) dt \right), \quad (17)$$

где $\varphi(t)$ — положительная, монотонно падающая функция такая, что

$$\int_0^\infty \varphi(t) dt \leq 1; \quad (18)$$

τ — время обучения, w_{ij}^0 — начальные значения коэффициентов связи, которые приняты одинаковыми.

Если во время обучения i -й и j -й нейроны находятся в одинаковом состоянии ($u_i u_j = +1$), связь w_{ij} не изменяется. Связи между нейронами, находящимися при обучении в разных состояниях ($u_i u_j = -1$), ослабляются.

Модель обученного процессора Хопфилда обладает важным свойством: в силу симметрии коэффициентов ($w_{ij} = w_{ji}$) она может быть представлена в потенциальной форме

$$\frac{du_i}{dt} = - \frac{\partial U(u_1, u_2, \dots, u_N)}{\partial u_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (19)$$

где N — число элементов и "потенциал" $U(u_1, u_2, \dots, u_N)$ равен

$$U = - \left[\sum_i \left(\frac{1}{2} u_i^2 - \frac{1}{4} u_i^4 \right) + \sum_{i,j \neq i} w_{ij} u_i u_j \right]. \quad (20)$$

Уравнение (19) имеет механическую аналогию; оно описывает движение шарика единичной массы в вязкой жидкости в потенциальном поле U . Эта аналогия позволяет использовать хорошо известные понятия и образы и применять их к процессу распознавания образа.

Поясним это на примере двумерного пространства ($i = 1, 2$). Имеется неровная поверхность с лунками и водоразделами — это потенциальная функция $U(u_1, u_2)$. Задание входного образа соответствует помещению шарика в определенную точку поверхности. Распознавание соответствует движению шарика в ближайшую лунку и остановке его на ее дне. Повышение внимания к образу означает углубление соответствующей лунки, ослабление внимания — уменьшение глубины лунки. Близко расположенные лунки образуют цепь или канал, по которому шарик может под влиянием слабых внешних возмущений переходить из одной лунки в другую. Это означает, что объекты, соответствующие лункам в одном канале, чем-то близки друг другу, или ассоциативно связаны.

Изменение внимания соответствует изменению глубины лунок и каналов и высоты водоразделов между ними. На языке механической аналогии можно сказать, что изменение внимания соответствует вливанию в лунки и/или каналы тяжелой жидкости (или удалению ее оттуда). При вливании уровень шарика в лунке повышается, а барьер перекока в соседнюю лунку понижается; внимание к образу, соответствующему этой лунке, понижается. При удалении жидкости из данной лунки внимание к ней повышается.

Подчеркнем: упомянутые образы, т.е. лунки, барьеры, каналы и водоразделы, в реальном процессоре отсутствуют (они присутствуют лишь в фазовом пространстве модели (14)). Тем не менее они адекватно описывают процесс распознавания, поскольку совпадают уравнения (и это уже объективная реальность).

Этот пример показывает, что математическая модель позволяет использовать для описания процесса привыч-

ные образы и понятия, которые в данном процессе реально не существуют.

В более сложных процессорах коэффициенты связи не симметричны ($w_{ij} \neq w_{ji}$) и модель не может быть представлена в форме (19). Тем не менее образы (каналы, водоразделы, лунки) продолжают использоваться и в этом случае; лунки в этом случае соответствуют устойчивым стационарным состояниям, а водоразделы соответствуют сепаратрисам. Эти понятия имеют смысл в любой модели, а не только в потенциальной.

Больцмановский процессор (см. [59]) можно рассматривать как модификацию процессора Хопфилда. Процесс распознавания происходит в шумовом поле. Математическая модель близка к (14), но содержит случайные флуктуации, т.е. имеет вид

$$\frac{du_i}{dt} = f(u_i) + \sum_{j \neq i} w_{ij} u_j + g(t)\xi(t), \quad (21)$$

где $\xi(t)$ — случайная функция времени (шум), g — амплитуда шума.

Введение шума преследует следующие цели.

i) В процессоре Хопфилда возможен ложный ответ, особенно, если лунки близки, а начальные условия заданы на водоразделе (сепаратрисе). Последнее означает, что исходной информации недостаточно для распознавания похожих образов. Необходимо либо затребовать дополнительную информацию, либо рецептировать, либо генерировать ее.

Наличие шума, амплитуда которого $g(t)$ выше барьера между лунками, позволяет поддерживать систему в неопределенном состоянии (оно называется *фрактрацией*) вплоть до получения (или генерации) дополнительной информации. Амплитуда шума $g(t)$ может меняться со временем (уменьшаться) так, что в конце процесс становится динамическим и шум уже более не мешает распознаванию.

ii) Если на траектории шарика имеются две близкие лунки, то шум способствует попаданию в более глубокую (без шума шарик может застрять в более мелкой). Глубина лунки зависит от обучения и распределения внимания, поэтому шум способствует реализации внимания.

Таким образом, больцмановский процессор ускоряет и облегчает распознавание более привычных образов (или явлений) и/или тех, на которые обращено внимание.

iii) Больцмановский шум играет роль перемешивающего слоя, который помогает генерировать ценную дополнительную информацию и/или рецептировать ее из потока, идущего извне. По существу, процесс близок к тому, который мы рассматривали при описании игры в рулетку.

Простейшая математическая модель автолокализации образа, соответствующая принципу Гроссберга, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{du_i}{dt} &= f(u_i) + \alpha v_i - \sum_{j \neq i} w_{ij} u_j, \\ \frac{dv_i}{dt} &= \frac{1}{\tau} (u_i - v_i). \end{aligned} \quad (22)$$

Последний член первого уравнения описывает взаимное подавление (аналогичное антагонистическому взаимодействию в модели взаимодействия видов, обсуждав-

шейся в предыдущих разделах). Коэффициенты w_{ij} изменяются в процессе обучения так же, как и в процессоре Хопфилда. Второе уравнение описывает самоактивацию.

Автолокализация образа имеет следующие преимущества.

В процессоре Хопфилда образ распределен. Например, образу буквы "Б" соответствует множество возбужденных нейронов. В процессоре Гроссберга образ собирается и предстает в виде одного возбужденного нейрона, т.е. происходит его автолокализация. Где именно локализуется данный образ, до обучения не известно. Однако после обучения место локализации фиксируется и далее не изменяется. Иными словами, исходное не обученное состояние процессоров Гроссберга неустойчиво, и выбор места локализации образа происходит случайно.

Состояние, в котором образ уже локализован, устойчиво, и это упрощает процесс модификации внимания к нему. Для этого достаточно изменить порог возбуждения одного нейрона (в то время как в процессоре Хопфилда необходимо модифицировать порог многих нейронов).

В распознающем нейрокompьютере используются все упомянутые принципы (парадигмы), и, следовательно, нейрокompьютер состоит из набора пластин с разными свойствами и функциями.

Подчеркнем: пластинчатая структура не случайна. Дело в том, что каждая из пластин выполняет определенную функцию. Сеть связей между элементами подчинена этой функции. В то же время почти каждый элемент должен быть доступен для связей с внешним миром и/или с другими пластинами. Двумерная (пластинчатая) организация удовлетворяет этим условиям, в то время как в трехмерном случае (например, вместо пластин — шары или цилиндры) эти условия выполнить практически невозможно.

В принципе, можно реализовать те же идеи не на физических элементах, а в биохимическом компьютере. Такие попытки делаются (пока на уровне идей и разработок). При этом в качестве "нейронов" используются иммобилизованные белки-ферменты, способные существовать в двух (и более) состояниях (см. [61]).

Используя модели (14)–(18) и (21), (22), можно реализовать принципы нейрокompьютинга на обычных (универсальных) компьютерах. Такой подход сейчас широко используется и называется *эмуляцией*. При этом преимущества параллельного счета сохраняются, но каждую обучаемую связь приходится представлять в форме специальной программы. В нейрокompьютере каждая связь представлена в виде аналогового элемента, что обеспечивает экономию материала и объема.

Сопоставим процессы в нейрокompьютере со схемой распознавания, представленной на рис. 8.

Процессы в правой (интуитивной) части схемы, т.е. обучение, выделение значимых признаков и выбор конъюнкций в нейрокompьютере, совершаются быстро за счет следующих обстоятельств. Во-первых, они совершаются параллельно и, во-вторых, перебор конъюнкций практически отсутствует. Подходящую конъюнкцию процессор (как и врач-диагност) выбирает путем прямого усмотрения истины.

Может ли процессор сам (без участия человека) формулировать решающее правило?

Ответ не однозначен. С одной стороны, в каждом нейрокомпьютере в результате обучения решающее правило возникает, поскольку после этого распознавание совершается быстро. С другой стороны, это решающее правило не сформулировано и в каждом компьютере свое. Последнее неизбежно, поскольку процессы обучения и локализации неустойчивы, место локализации выбирается случайно и в каждом процессоре индивидуально. Проблема передачи своего решающего правила другим процессорам остается открытой, хотя исследования в этом направлении ведутся (Ю. Сандлер, частное сообщение).

В эмуляционных программах математическая модель (14) (с фиксированными связями w_{ij}) является, по существу, решающим правилом. Однако при его формулировке используется тезис — язык дифференциальных уравнений, что уже требует участия человека. Можно тиражировать программу обученного компьютера. Она будет работать на заданном множестве, но к обучению и распознаванию других объектов будет неспособна.

Реальные нейросети отличаются от описанных выше нейропроцессоров.

Во-первых, реальная нервная клетка — нейрон — сложнее бистабильных элементов. Они могут находиться в нескольких стационарных состояниях, в том числе автоколебательных и даже псевдохаотических [13].

Во-вторых, роль проводников играют отростки нервной клетки: дендриты (через которые нервные импульсы попадают в нейрон) и аксоны (через которые нейрон посылает импульсы в другие клетки). Связи осуществляются через щелевые контакты — синапсы. Импульс в синапсах может передаваться непосредственно (за счет диффузии ионов) и опосредовано (за счет образования и диффузии специальных веществ — нейромедиаторов). Передача сигнала в синапсах происходит преимущественно в одну сторону — от аксона к дендриту.

В-третьих, аксоны не пассивные проводники, а активные среды, и сигналы в них передаются в форме автоволн.

В-четвертых, сама нейросеть в целом имеет свойства активной среды. В ней могут распространяться автоволны, которые сопровождаются синхронным возбуждением сразу многих нейронов [12]. Ритмические процессы и автоволны в мозге действительно наблюдаются и интенсивно изучаются (см. [12, 13]). Какова их роль в процессе мышления — пока вопрос открытый.

Тем не менее основные свойства — суммирование входящих импульсов и генерация выходящего — в условном нейроне и в реальном одинаковы. Реальная нервная сеть способна к обучению и вниманию. Более того, возможности реализации этих свойств существенно расширены. Так, обучение может происходить за счет переориентации аксон-дендритных контактов. Акцент внимания может быть смещен за счет изменения состава нейромедиаторов. Контрастирование образа может происходить за счет автоволн и т.д.

Однако, с нашей точки зрения, эти особенности реальной нейросети, хотя и важны, но принципиальной роли не играют. В ней используются упомянутые выше принципы распознавания, но на более естественном для биологических объектов материале.

В пользу этого положения можно привести пример. В работах [62, 63] исследовался вопрос о свойствах авто-

диагностической системы человека. Оказалось, что структура и функции так называемых пластинок Рекседа, составляющих серое вещество спинного мозга, удивительно точно (насколько это возможно в нейрофизиологии) соответствуют конструкции оптимального нейрокомпьютера. Имеется распознающая пластина (типа процессора Хопфилда), две пластины типа back propagation, пластина, где образ локализуется (типа процессора Гроссберга) и т.д.

Таким образом, каждый этап процесса распознавания в нейросетях живых существ (в том числе человека) можно понять и описать в рамках естественно-научных представлений, используя достижения нейрокомпьютинга. Более того, имеются уже математические модели типа (14)–(22), демонстрирующие эту возможность.

6.4. Мышление и распознавание образа

Аналогия между этими процессами обсуждалась в [60]. Из изложенного выше также следует, что процесс распознавания образа в нейрокомпьютерах обладает почти всеми свойствами мышления.

Действительно:

- он происходит в нейросетях, у человека — в реальных, в компьютере — в искусственных. Основные принципы функционирования тех и других можно считать одинаковыми;

- в нем происходит обработка информации;

- принятие решения в данном случае сводится к выбору класса (из числа обученных), к которому принадлежит данный объект;

- при недостатке информации принятие решения — акт творчества. Для этого в нейрокомпьютере есть все необходимое, включая аппарат рецепции информации, перемешивающий слой (больцмановский шум) и запоминание результата. Момент принятия решения нейропроцессор умеет выбирать сам. В нейрокомпьютере решение принимается интуитивно;

- каждый нейрокомпьютер индивидуален. Это проявляется на разных стадиях обучения. Так, локализация образа в процессоре Гроссберга происходит в элементе, выбранном случайно. В исходно одинаковых процессорах эти элементы, как правило, не совпадают. Это не мешает работе процессора, но определяет его индивидуальность.

Тем не менее остается вопрос: в какой мере мышление может быть сведено к распознаванию?

Общепризнанного ответа на этот вопрос пока нет. Поэтому приведем некоторые соображения.

Если цель человека — прогноз поведения окружающих объектов, то мышление может быть сведено к распознаванию. Даже если человек встречается с незнакомым ранее объектом, он стремится отнести его к одному из известных классов обучающего множества (к одному из известных ему образов). В случае удачи это воспринимается как акт научного творчества.

Если свойства незнакомого объекта не позволяют отнести его к одному из известных классов, но содержат признаки сразу двух классов, то возникает "прострация". В теории распознавания в этом случае делается вывод: необходимо расширить обучающее множество, пополнить его другими, тоже знакомыми объектами и выделить в нем соответствующий класс (с принципиально неизвестными объектами теория распознавания не работает).

Поясним это на примере научного творчества. В каждой научной дисциплине существует свой набор образов, т.е. свое обучающее множество. При распознавании незнакомого объекта специалист в первую очередь обращается именно к этому множеству. Расширение этого множества означает включение в него образов из другой (смежной) дисциплины и классификацию расширенного множества. Как правило, после этого удается отнести "экзаменуемый" объект к одному определенному классу. В современной науке можно привести много успешных примеров такого творчества, особенно в смежных науках.

Однако часто узкий специалист поступает по-другому, а именно остается в рамках своего обучающего множества, относит объект сразу к двум классам и констатирует наличие дуализма. "Прострация" при этом остается, но люди к ней привыкают.

Таким образом, мышление человека в значительной части можно свести к распознаванию образа.

Возникает вопрос: можно ли построить нейрокompьютер, способный к научному и, возможно, художественному творчеству? Вопрос можно поставить и по-другому: есть ли разница между мышлением человека и мышлением нейрокompьютера, и может ли последний заменить человека?

Разница, конечно, есть, она количественная, но очень существенная.

Нейрокompьютеры специализированы, т.е. в каждом из них обучающее множество одно и соответствует его назначению. Нейрокompьютер не может сам расширить свое обучающее множество, даже если столкнется с "прострацией". В принципе, можно нейропроцессор обучить на двух разных множествах, например, на множестве рукописных текстов и множестве желудочных заболеваний. Тогда, столкнувшись с трудностью диагностики, такой процессор может выдать результат: экзаменуемый объект равно похож на понос и запор, но более всего похож на почерк шизофреника. Ответ, конечно, абсурдный, но, согласитесь, что-то интуитивное и человеческое в нем уже есть.

Любой человек в силу необходимости обучается на многих разных множествах. По существу обучающим множеством является вся окружающая действительность в течение всей его жизни. Наиболее содержательное обучение происходит в детстве и юности и основано на наблюдениях самого человека, т.е. оно индивидуально и происходит "без учителя".

Профессиональное обучение происходит в вузе (где обучающие множества специализированы), "с учителем", который формулирует решающие правила распознавания (по возможности однозначные). При этом само распознавание (мышление) переходит в разряд логического. Последнее ускоряет и облегчает процесс распознавания, если экзаменуемый объект содержится в профессиональном обучающем множестве. Однако если он в нем не содержится, то необходимо обратиться к более широкому обучающему множеству (выходящему за рамки профессионального) и найти там образ, соответствующий экзаменуемому. Это уже относится к интуитивному мышлению и воспринимается как акт творчества.

Таким образом, искусственный нейропроцессор профессионала (профессора, доктора наук и т.д.) заменить может. Однако ученого — не может.

Мы не касались здесь таких явлений, как эмоции и желания, и проблем художественного творчества. Разумеется, они тоже связаны с мышлением и распознаванием образа. На наш взгляд, и эти явления могут быть поняты в рамках естественно-научного подхода. Однако эти проблемы уже выходят за рамки предлагаемой публикации.

Итак, модель интуитивного мышления (в оговоренном выше смысле) сейчас уже есть, мы знаем, как она устроена и как работает. Осталось разобраться в деталях, которые могут оказаться важнее и интереснее, чем мы сейчас думаем.

В заключение обсудим вопрос о возникновении аппарата мышления в эволюции. Первые клетки есть даже у червей и низших животных. Образование их не было ароморфозом, поскольку способность генерировать электрические сигналы есть у всех клеток и одноклеточных организмов. У нервных клеток эта способность выражена ярче (скорее всего, за счет градуальной эволюции). Образование нервной сети можно считать ароморфозом, но не высокой сложности и вполне вероятным.

Увеличение размеров мозга у высших животных позволило включить в процесс распознавания большее число обучающих множеств. Каждое из них давало эволюционные преимущества. Этот этап эволюции следует рассматривать скорее как градуальный, и проблем с его описанием не возникает. На этом этапе уже можно сказать, что живые существа обрели способность к интуитивному мышлению. Четко датировать появление этого качества невозможно, поскольку оно возникло градуально.

Резкое увеличение размеров головы (и мозга) у человека можно рассматривать как ароморфоз, но тоже не очень сложный и вполне вероятный. Первые особи такого типа появились не среди наиболее приспособленных, а среди маргиналов. Непропорционально большая голова в тех условиях была скорее недостатком. Поэтому такие "уроды" вряд ли сразу имели большие эволюционные преимущества, хотя и обладали повышенной способностью к интуитивному распознаванию. Тем не менее они выжили благодаря способности образовывать коллектив. В книге [64] показано, что скорость роста населения Земли пропорциональна квадрату (а не первой степени) числа людей. Такой закон роста можно объяснить коллективным поведением человеческой популяции.

Способность к логическому мышлению и связанные с ним преимущества появились в результате образования коллектива и выработки единого для данной соции языка. Только после этого появилась возможность формулировать решающие правила и оперировать с ними.

Таким образом, способность человека к логическому мышлению появилась не в результате биологического ароморфоза, а в результате развития социальных отношений.

В заключение автор выносит благодарность В.Л. Гинзбургу, Г.Р. Иваницкому, В.И. Гольданскому, Н.М. Чернавской, Н.Г. Рамбиди, В.П. Карп, Н.И. Старкову, К.Г. Гуревичу и И.В. Мелик-Гайказян за плодотворные обсуждения.

Список литературы

1. Fox S *The Emergence of Life: Darwinian Evolution from the Inside* (New York: Basic Books, 1988)
2. Egami F *New Horizons in Biological Chemistry* (Tokyo: Scientific Societies Press, 1978)
3. de Duve C *Origin of Life. Blueprint for a Cell* (Burlington: Neil Patterson Publ., 1991)
4. *Журнал Всесоюзного химического общества XXV* (4) (1980)
5. *Molecular Evolution and Protobiology* (Eds K Matsuno et al.) (New York: Plenum Press, 1984)
6. *Frontiers of Life* (Eds Tran Thanh Van et al.) (Singapore: Fong & Sons Printers, 1991)
7. *Evolutionary Biochemistry and Related Areas of Physicochemical Biology* (Eds V F Poglazov et al.) (Moscow: Bach Institute of Biochemistry ANKO, 1995)
8. Пригожин И Р *От существующего к возникающему* (М.: Наука, 1985)
9. Хакен Г *Синергетика* (М.: Мир, 1980)
10. Курдюмов С П, Князева Е Н *У истоков синергетического видения мира* (М.: Самоорганизация и наука, 1994); Князева Е Н, Курдюмов С П *Законы эволюции и самоорганизация сложных систем* (М.: Наука, 1994)
11. Кадомцев Б Б *Динамика и информация* (М.: Редакция журнала УФН, 1997)
12. Иваницкий Г Р, Медвинский А Б, Цыганов М А *УФН* **164** 1041 (1994)
13. Абарбанель Г Д И и др. *УФН* **166** 363 (1996)
14. Гинзбург В Л *УФН* **169** 419 (1999)
15. Мухин Л М, см. [4] с. 412
16. Kabayashi K et al., in *Biological Science in Space* **12** (2) 102 (1998)
17. Гольданский В И *Успехи химии* **44** 2121 (1975)
18. Опарин А И *Жизнь, ее природа, происхождение и развитие* (М.: Моск. рабочий, 1924)
19. Чернавский Д С *Синергетика и информация* (М.: Знание, 1990)
20. Чернавский Д С, Хургин Ю И, Шноль С Э *Биофизика* **32** 775 (1987)
21. Чернавский Д С, Чернавская Н М *Белок – машина* (М.: Изд-во МГУ, 1999)
22. Спирин А С *Соросовский образовательный журнал* (11) 65 (1998); (4) 2 (1999); (5) 2 (1999); (6) 2 (1999)
23. Эйген М *Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул* (М.: Мир, 1973)
24. Альтштейн А Д, Каверин Н В, см. [4] с. 383
25. Меклер Л Б, см. [4] с. 460
26. Отрошенко В А и др. *ДАН СССР* **494** 241 (1987)
27. Кастлер Г *Возникновение биологической организации* (М.: Мир, 1967)
28. Chernavskaya N M, Chernavskii D S *J. Theor. Biol.* **53** 13 (1975); см. также [5] р. 365; [7] р. 239
29. Романовский Ю М, Степанова Н В, Чернавский Д С *Матем. биофизика* (М.: Наука, 1984)
30. Романовский Ю М, Степанова Н В, Чернавский Д С *Матем. моделирование в биофизике* (М.: Наука, 1975)
31. Аветисов В А, Гольданский В И *УФН* **166** 873 (1996)
32. Царев В А *Краткие сообщения по физике* (2) 22 (1999)
33. Царев В А *Краткие сообщения по физике* (2) 33 (1999)
34. Kandapudi D K, Nelson G W *Physica A* **125** 465 (1985)
35. Иваницкий Г Р и др. *Биофизика* **30** 418 (1985)
36. Заварзин Г А *Природа* (1) 3 (1999)
37. Птицин М О, Чернавская Н М, Чернавский Д С, в сб. *Матем. биофизика* Т. 1 (Ред. А К Приц) (Красноярск: КГУ, 1985) с. 60
38. Chernavskaya N M, Chernavskii D S, in *Thermodynamics and Regulation of Biological Processes* (Eds I Lamprecht, A I Zotin) (Berlin: Walter de Gruyter, 1985) p. 415; in *Viva Origino* **24** (4) 307 (1996)
39. Kimura M *Nature* (London) **5285** 467 (1971); Кимура М *Молекулярная эволюция: теория нейтральности* (М.: Мир, 1985)
40. Sharp F E *Cell* **77** 805 (1994)
41. Мелик-Гайказян И В *Информационные процессы и реальность* (М.: Наука, 1997)
42. Махлуп Ф *Производство и распространение знаний в США* (М.: Прогресс, 1966)
43. Блюменфельд Л А *Проблемы биологической физики* (М.: Наука, 1977)
44. Волькенштейн М В *Общая биофизика* (М.: Наука, 1978)
45. Шеннон К *Работы по теории информации и кибернетике* (М.: ИЛ, 1963)
46. Бонгарт М М *Проблемы узнавания* (М.: Наука, 1967)
47. Харкевич А А *Теория информации. Распознавание образов* (М.: Наука, 1973)
48. Стратонович Р Л *Теория информации* (М.: Сов. радио, 1975)
49. Колупаев А Г, Чернавский Д С *Краткие сообщения по физике* **1–2** 83 (1997)
50. Блум Ф, Лейзерсон А, Хофстедтер Л *Мозг, разум и поведение* (М.: Мир, 1988)
51. Фейнберг Е Л *Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке* (М.: Наука, 1992); *Вопросы философии* **7** 54 (1997)
52. Вайнцвиг М Н *Моделирование обучения и поведения* (М.: Наука, 1975)
53. Гельфанд И М, Розенфельд Б И, Шифрин М А *Очерки о совместной работе математиков и врачей* (М.: Наука, 1989)
54. Губерман Ш А *Неформальный анализ данных* (М.: Наука, 1986)
55. Карп В П, Дисс. ... д-ра тех. наук (М.: МИРЭА, 1999); см. также [63]
56. Hopfield J J *PNAS* **79** 2554 (1982)
57. Grossberg S *Studies of Mind and Brain* (Boston: D. Riedel Publ. Co., 1982)
58. Kohonen T *Self-Organization and Associative Memory* 2nd ed. (Berlin: Springer-Verlag, 1988)
59. Hinton G E, Seinovsky T J, in *Learning and Remining in Boltzman Machines, Parallel Distributed Processing* Vol. 1 (Cambridge, MA: MIT Press, 1986) p. 282
60. Веденов А А *Моделирование элементов мышления* (М.: Наука, 1988)
61. Rambidi N G *BioSystems* **44** 1 (1997)
62. Чернавский Д С, Карп В П, Родштат И В *Радиофизика* **37** (1) 57 (1994)
63. Родштат И В, Чернавский Д С, Карп В П *Биомедицинская радиоэлектроника* (2) 27 (1999)
64. Капица С П *Общая теория роста человечества* (М.: Наука, 1999)

The origin of life and thinking from the modern physics point of view

D.S. Chernavskii

P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,
 Leninskii prosp. 53, 117924 Moscow, Russian Federation
 Tel. (7-095) 132-6296
 E-mail: chernav@lpi.ru

Attempts at a physical picture of how living beings develop from unliving matter are beset with difficulties due to the low probability of some of the stages of the process. It is shown that these difficulties arise from the misconstruction of the term 'coding' and that they are overcome by assuming that the polynucleotide catalised rather than 'coded' the formation of protein in primary organisms (hypercycles). A realistic scenario including the emergence of a unified code is considered for such a process. A physical mechanism of thinking and the development of a necessary evolutionary mechanism are discussed, for which purpose the concepts of information, valuable information, and information generation are analyzed. It is shown that thinking reduces largely to image recognition. A possible molecular mechanism of recognition is considered which is shown to be quite likely to have appeared in the course of evolution.

PACS numbers: **87.10.+e**, **87.15.-v**, **87.90.+y**, **89.70.+c**
 Bibliography — 64 references

Received 3 November 1999