

## ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

## XXI век: что такое жизнь с точки зрения физики

Г.Р. Иваницкий

*Рассмотрена эволюция биофизической парадигмы в течение 65-ти лет после выхода книги Э. Шрёдингера "Что такое жизнь с точки зрения физики?" (1944 г.). На основе успехов молекулярной генетики показано, что все признаки, которыми характеризуются живые системы, встречаются в системах неживой природы. Рассмотрены десять логико-физических парадоксов, которые позволяют дать определение жизни в терминах пространственно-временной иерархии структур и комбинаторной вероятностной логики. Жизнь с точки зрения физики можно определить как результат процесса игры взаимодействий материи, в которой одна её часть приобрела свойство запоминать вероятности появления удач и неудач в предыдущих раундах этой игры, повышая тем самым свой шанс на существование в последующих раундах. Эту часть материи сегодня называют живой материей.*

PACS numbers: 01.65. + g, 01.70. + w, 87.23. – w

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004a.0337

## Содержание

1. Введение (337).
  2. Проблема определения живого (338).
    - 2.1. Смена парадигмы. 2.2. Появление новых биофизических наук (геномика, протеомика, метаболитика). 2.3. Эволюционная история живых организмов на молекулярном уровне. 2.4. Обнаружение факторов, ускоряющих эволюцию живых систем. 2.5. На границе живого и неживого.
  3. Игра живой и неживой материи (десять парадоксов) (340).
    - 3.1. Парадокс Платона и Сократа. 3.2. Парадокс Зенона. 3.3. Парадокс демона Максвелла. 3.4. Парадокс кота Шрёдингера. 3.5. Парадокс стохастического храповика. 3.6. Парадокс дефицита времени. 3.7. Парадокс гомохирального строения. 3.8. Парадокс конфликта части и целого. 3.9. Санкт-Петербургский парадокс. 3.10. Парадокс буриданова осла.
  4. Обсуждение (365).
  5. Заключение (367).
- Список литературы (367).

## 1. Введение

65 лет тому назад Эрвин Шрёдингер прочитал лекцию, в которой выдвинул идею атомно-молекулярного подхода к изучению живого, изложив её затем в книге *What is Life?*

Г.Р. Иваницкий. Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, ул. Институтская 3, 142290 Пущино, Московская обл., Российская Федерация  
Тел. (4967) 73-24-81  
Факс (4967) 79-05-53  
E-mail: ivanitsky@iteb.ru

Статья поступила 2 декабря 2009 г.,  
после доработки 15 января 2010 г.

*The Physical Aspects of a Living Cell* (Что такое жизнь? Физические аспекты живой клетки) (1944 г.) [1]. В русском переводе эта книга под названием *Что такое жизнь с точки зрения физики?* была опубликована дважды: в 1947 г. и 1972 г.

2009 г. был богат на юбилейные даты, связанные с обсуждаемой проблемой: исполнилось 200 лет со дня рождения Чарльза Дарвина, 150 лет с момента выхода в свет его книги *Происхождение видов* [2], а также 200 лет с момента выхода книги *Философия зоологии* Жана Батиста Ламарка [3]. Метафора Шрёдингера: "Жизнь — это существование аperiодических кристаллов", оказала влияние на многих исследователей, в том числе на Френсиса Крика и Мориса Уилкинса. В 1953 г. появилась работа о двойной спирали ДНК [4]. С этого времени начался отсчёт современного этапа молекулярной генетики.

Первое десятилетие XXI в. проходит под знаком развития нанотехнологий, создаются принципиально новые изделия: нанобиопокрытия, нанобиоконтейнеры, нанобиоплатформы, нанобиомоторы, нейрокмьютеры; совершенствуются глобальные информационные сети, развиваются планарные биоинформационные фабрики (биочипные технологии), наконец, медицина преобразуется в биомедицину с новым подходом к восстановлению функций каждого человека с учётом специфики его индивидуального генетического портрета. Всё это заставляет взглянуть на проблему определения жизни с другой точки зрения, которая отличается от точки зрения Шрёдингера 65-летней давности. В журнале *Успехи физических наук* за 65 лет после выхода книги Шрёдингера было опубликовано более 20-ти обзоров, посвящённых различным проблемам, имеющим отношение к рассматриваемой теме [5–26]. В данном обзоре принята попытка рассмотреть проблему определения жизни с позиции современной биофизики.

## 2. Проблема определения живого

### 2.1. Смена парадигмы

Можно говорить о двух направлениях изучения процессов жизни и биологической эволюции: *снизу вверх* (bottom – up) и *сверху вниз* (top – down).

В апреле 2003 г. средства массовой информации сообщили о завершении крупного международного научного проекта по расшифровке трёх миллиардов нуклеотидных пар, содержащих генетическую информацию человека. За 12 лет работы параллельно с геномом человека были расшифрованы геномы многих микроорганизмов и многоклеточных животных. Генетический код всех организмов был единым, но количество генов было разным. Различия оказались не столь велики, как ожидалось.

Первоначально не было недостатка в оптимистичных прогнозах при ответе на вопрос: как расшифровка генома человека изменит облик эволюционной биологии и современной медицины? Однако были и голоса скептиков. Число обнаруженных генов в ДНК человека оказалось равным всего 30000, а предполагалось, что их по крайней мере в три раза больше (порядка 100000). Это число генов совпало с числом генов мыши. Более того, выяснилось, что качественно по геному мы отличаемся от мыши структурой всего 300 генов. Порядка 100 наших генов соответствуют геномам вирусов и бактерий, которые к этому времени также были расшифрованы. До сих пор непонятно, что *представляют собой обширные нуклеотидные последовательности в промежутках между генами у человека и какую роль они играют в развитии организма*. В геноме человека задействовано только  $10^{-4}$  его нуклеотидного запаса. Тем не менее исследования снизу вверх — от молекулярного уровня к целостным организмам — позволили вскрыть эволюцию последовательностей нуклеиновых кислот и белков.

Анализ полных геномов позволяет изучать историю кариотипа (набора хромосом) живых организмов. Как и в случае генов в цепи ДНК, событием здесь является перестановка хромосомных "текстов", слияния и разрывы хромосом. Такие исследования дали возможность строить филогенетические деревья на целых геномах. События, формирующие геном (дупликации, горизонтальные переносы и т.п.), оказались крайне важными при исследовании прокариот, обладающих пластичностью генома. Стало ясно, что штаммы одного вида на этом уровне различаются по составу генов на 30 % [27].

Наконец, в последнее время появилась возможность изучать эволюцию регуляторных систем и иерархию уровней экспрессии генов. Можно надеяться, что это приведёт к пониманию таких процессов, как эволюция строения тела у животных, неравномерность скоростей морфологической эволюции, прерывистость эволюции и т.д. В области перехода от одномерного генетического кода к трёхмерному морфологическому строению живого организма пока имеется много вопросов. Это "пока" сохраняет площадку для проявления *креационизма* (от *creation* — сотворение) [1].

Следует констатировать, что за последние 65 лет в молекулярной биофизике произошла смена парадигмы. В этот же период аналогичное явление пережила астрофизика, а ещё раньше — физика высоких энергий. Молекулярная биофизика начала работать с базами

данных, получаемыми в масштабах, которые возрастают в геометрической прогрессии. Наличие и доступность больших объёмов генетической информации позволили делать содержательные выводы, основывающиеся на сопоставлении данных расшифровки геномов различных видов живых организмов.

### 2.2. Появление новых биофизических наук (геномика, протеомика, метаболита)

После того как были расшифрованы полные нуклеотидные последовательности многих геномов, включая геном человека, а также последовательности метагеномных фрагментов ДНК организмов разных природных сообществ с описанием их полиморфизма, были получены сведения об иерархиях транскрипции генов. В результате *геномика* объединилась с *протеомикой* — наукой о происхождении и синтезе белка. Сегодня эти исследования представляют собой последовательную цепь взаимно дополняющих друг друга исследований ДНК ↔ РНК ↔ белки. Следует говорить уже о новом этапе изучения живого — о науке *метаболизме*. Эта наука опирается на успехи молекулярной генетики и исследует, как из разнородных биохимических реакций собираются пути синтеза новых веществ. В результате все три науки объединились в одно целое: *геномика ↔ протеомика ↔ метаболита*.

Доступность большого числа геномов даёт в ряде случаев возможность реконструировать в деталях историю перестроек регуляторных систем у бактерий и дрожжей. Ещё более убедительны экспериментальные исследования регуляторных систем многоклеточных эукариот. Например, замена регуляторной области гена *Prx1*, управляющего развитием передней конечности, регуляторной областью гомологичного гена летучей мыши (без изменения самого гена) привела к увеличению длины конечностей у обычной мыши [27].

Хотя детально на молекулярном уровне изучено лишь небольшое число регуляторных систем многоклеточных эукариот, их сопоставление показывает, что достаточно радикальные изменения в строении тела могут быть достигнуты относительно небольшими перестановками в иерархии регуляторных модулей. Однако сравнение генных последовательностей ничего не говорит о самых первых этапах возникновения эволюции биохимических систем [28].

### 2.3. Эволюционная история живых организмов на молекулярном уровне

Построение филогенетических деревьев *на молекулярной основе* — это, пожалуй, единственный надёжный путь восстановления эволюционной истории живого. В первую очередь, это относится к бактериям и вирусам. Можно привести результаты нескольких десятков исследований, объясняющих, когда и как появились те или иные патогенные бактерии, вирусы и их переносчики. Например, сравнительное генетическое изучение множества штаммов возбудителей туберкулёза человека *Mycobacterium tuberculosis* и коров *Mycobacterium bovis* поставило под сомнение гипотезу о недавнем происхождении *M. bovis* из *M. tuberculosis* [27]. Таких примеров сегодня имеется несколько десятков, и не только на бактериально-вирусном уровне, но и на уровне всего филогенетического ряда растений и животных.

Изучение геномов позволяет понять, откуда берутся новые гены. После дупликации в одной из копий ДНК

сохраняется старая функция, а функция другой может измениться. Действительно, сравнительный генный анализ свидетельствует о первоначальном ускорении эволюции после события дупликации, причём во многих случаях это ускорение происходит только в одной из копий. Размножение особей усиливает эффекты мутаций, а их вымирание под влиянием изменения внешней среды, наоборот, вызывает у сохранившихся особей конвергенцию.

Одним из примеров конвергенции служит появление криопротекторных белков у рыб, обитающих в арктических и антарктических водах. Гликопротеины, которые препятствуют образованию кристаллов льда, разрушающих клетки, есть у арктической трески (*Gadidae*) и антарктических нототений (*Notothenioidea*). Их структуру составляют дисахариды, связанные с многочисленными трипептидными повторами (треонин–аланин–аланин). Однако сравнение экзон-интронной структуры генов и анализ использования синонимичных кодонов указывают на независимое происхождение этих белков на севере и на юге, причём белок нототении изначально был трипсиногеном, предшественником протеолитического фермента [29].

На основании анализа современных митохондриальных геномов и Y-хромосом человека (*Homo sapiens*) установлено, что популяция "Евы" и "Адама" — предков всех современных людей — обитала примерно 100–200 тыс. лет назад в Африке. Обширные исследования показали, что племена Южной Африки генетически разделились с другой линией человечества примерно 120 тыс. лет назад. Миграция современного человека из Африки началась 60–70 тыс. лет назад. По Американскому континенту современный человек расселился во времена ледникового периода, по-видимому, перейдя на этот континент из Азии через замёрзший Берингов пролив или существовавший тогда перешеек. Другой поток человеческой популяции распространился на острова Океании и в Австралию (в Юго-Восточной Австралии человек поселился примерно 45 тыс. лет назад). ДНК современных людей сохранила следы этих древних миграций [30]. Тем не менее из-за неравномерного хода "эволюционных часов" временные оценки являются условными.

Секвенирование (определение первичной аминокислотной или нуклеотидной последовательности) митохондриальных (передаваемых по женской линии) ДНК и ядерных ДНК ископаемого человека — сложная задача ввиду малых количеств доступной ДНК. Однако каждый год происходит существенное продвижение в этой интересной (в том числе, и для массовой аудитории) области исследований. Уже с высокой степенью достоверности можно утверждать, что все ныне существующие люди разных рас исторически являются *близкими родственниками* и отличаются друг от друга по геному всего на 0,1 % [30].

#### 2.4. Обнаружение факторов, ускоряющих эволюцию живых систем

Молекулярная генетика показала, что существуют два фактора ускорения эволюции. Секвенирование полных геномов позволило показать, что в истории многих таксонов происходили *полногеномные дупликации*, т.е. генетическая информация передавалась целыми текстами. Так, полногеномная дупликация в предке дрожжей из рода *Saccharomyces* была продемонстрирована в

результате сравнения с секвенированным геномом *Kluyveromyces waltii*. Аналогично были выявлены полногеномные дупликации в истории рыб и ранних позвоночных. Генный анализ позволяет не только описывать дупликации и другие события (слияния и разрывы хромосом, большие инверсии и т.п.), но и восстанавливать предковый кариотип [31].

Подтверждён второй фактор ускорения эволюции. Им служит горизонтальный перенос генов, т.е. заимствование организмами генов друг у друга. Выявлены обширные переносы генов между бактериями и археями и даже эукариотами. Частота переноса генов между близкими видами существенно выше. Исключение составляют переносы между таксономически далёкими организмами [31].

Многие из этих открытий были отмечены Нобелевскими премиями уже после выхода в свет книги Э. Шрёдингера [1]. Тем не менее и сегодня остаётся открытым вопрос: чем отличается живое от неживого с позиции физики?

#### 2.5. На границе живого и неживого

Дать содержательное определение живой материи трудно. В учебниках обычно идут по пути перечисления признаков, которые характерны для живого, но при рассмотрении этих признаков можно обнаружить, что все они встречаются и у объектов, которые определяют как неживую природу. В таблице 1 приведено такое сопоставление. Из него можно сделать вывод: попытка найти какой-либо один абсолютный, характерный признак живого — занятие малоперспективное. Следовательно, *в живых системах не обнаруживается никаких свойств, которыми не обладали бы разные неживые объекты*.

Более того, в пространстве рассмотренных признаков, например, *вирус или бактериофаг нельзя назвать живыми организмами* в полном смысле слова, скорее, это сложные композитные материалы, но решающие задачи поиска, узнавания и размножения путём уничтожения клетки или бактерии (рис. 1).

Почти 15 лет мы затратили на то, чтобы разобраться в трёхмерном строении бактериофага и понять механизм работы этой молекулярной машины [32–35]. Она лишена большинства отмеченных в табл. 1 признаков, не имеет внутренних биохимических процессов, не потребляет и не усваивает энергию (пищу), самостоятельно не размножается. Вирусы — это машины из белково-ДНК-субъединиц (в некоторых случаях из РНК-субъединиц). ДНК, РНК и белок — это полимерные материалы с распределённым по их длине зарядом. Любой неоднородный полимерный материал обладает набором состояний своей пространственной конфигурации, каждое из которых соответствует определённому температурному и ионно-катионному составу среды. Если ион, катион или какая-либо полярная частица изменяет или нейтрализует заряд в некоторой области полимера, то полимер изогнётся и примет другую, соответствующую воздействию заряда пространственную конфигурацию, отвечающую минимуму энергии в системе среда ↔ полимер. Если заряженные частицы будут нейтрализованы тем или иным способом, то полимер вернётся к исходному состоянию [39].

В очень кратком изложении сценарий взаимодействия бактериофага с бактериальной клеткой выглядит

Таблица 1. Признаки живой и неживой материи

№	Признаки живой материи	Признаки неживой материи
1	Живые организмы характеризуются <i>упорядоченной иерархической структурой</i>	Все объекты неживой природы отвечают этому же условию и устроены по иерархическому принципу: элементарные частицы → атомы → молекулы → → макромолекулы и т.д.
2	Живые организмы являются <i>открытыми системами</i> и получают энергию из окружающей среды, используя её для поддержания своей высокой упорядоченности	Смерчи, тайфуны, ветер, молнии черпают энергию от Солнца; извержение вулканов, землетрясения, подвижка материков происходят за счёт энергии из недр Земли. Таким образом, открытость живых систем — не специфический признак живого
3	Способность <i>реагировать на внешнее воздействие</i> (рецепция) — универсальное свойство всех живых систем	Намагничивание, электризация, свечение, поляризация, деформация, инерция, перемещение, разрушение и т.д. — это также ответы неживых объектов на внешние воздействия
4	Способность <i>запоминать информацию</i> о предыдущих состояниях и адаптироваться к изменению внешних условий	Ответная реакция объектов неживой природы обычно также направлена на "нейтрализацию" внешнего воздействия. Ответная реакция неживого объекта — это стремление сохранить своё исходное состояние (принцип Ле Шателье, принцип Ленца, инерция Ньютона). Существуют проявления в неживых объектах и элементов памяти: например, магнитный гистерезис
5	Живые организмы <i>изменяются и усложняются</i>	Объекты в астрофизике (образование газо-пылевых облаков → туманностей → → галактик), в геофизике (образование горячего ядра планет → сравнительно холодной мантии поверхности планет → тектонических плит → материков и океанов) и в химии (преобразование субстратов в продукты) также демонстрируют эволюционное изменение и усложнение
6	Всё живое <i>размножается</i>	Коацерватные капли органических веществ могут расти и делиться. Из растворов солей растут кристаллы. Кусочек, отломившийся от растущего кристалла, становится зародышем для подобного кристалла. Чёрные курильщики и белые столбы на дне океана также размножаются
7	Живое способно к <i>саморегуляции и регенерации повреждений</i>	Устойчивые вихри, торнадо, ячейки Рэля–Бенара — саморегулирующиеся системы. Ледяная сосулька после разрушения восстанавливается. Кристаллы способны к регенерации дефектов (дислокаций). Следовательно, сам факт саморегуляции и регенерации не может служить отличительным признаком живого от неживого
8	Живые объекты осуществляют <i>обмен веществ</i> с окружающей средой с целью размножения и экспансии	Все реакции окисления обладают этим свойством, например горение. Преобразование энергии — это свойство всей природы, а не специфическое свойство живых систем
9	Живые объекты обладают <i>направленной подвижностью</i>	Этим свойством обладают ферромагнитные частицы в магнитном поле, ионы в электрическом поле, броуновские частицы в тепловом поле, частицы, имеющие массу, в гравитационном поле и т.д.
10	Живым объектам свойственна <i>неравновесность состояния</i>	Дожди, снегопады, лавины, водопады и т.п. — это всё также неравновесные состояния

так: бактериофаг, встретив клетку, с помощью своих хвостовых нитей проверяет химический состав её внешней мембраны. Если клетка пригодна для данного вида фагов, то он прикрепляется к ней снаружи, а затем чехол хвоста сокращается и ДНК, выходящая из головы фага (или РНК), "заглатывается" клеткой.

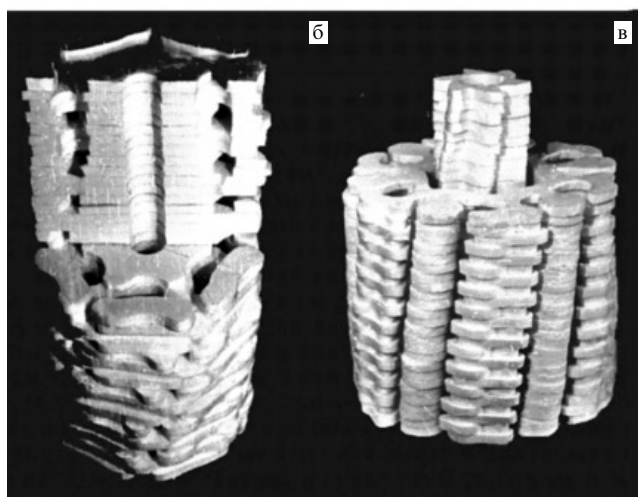
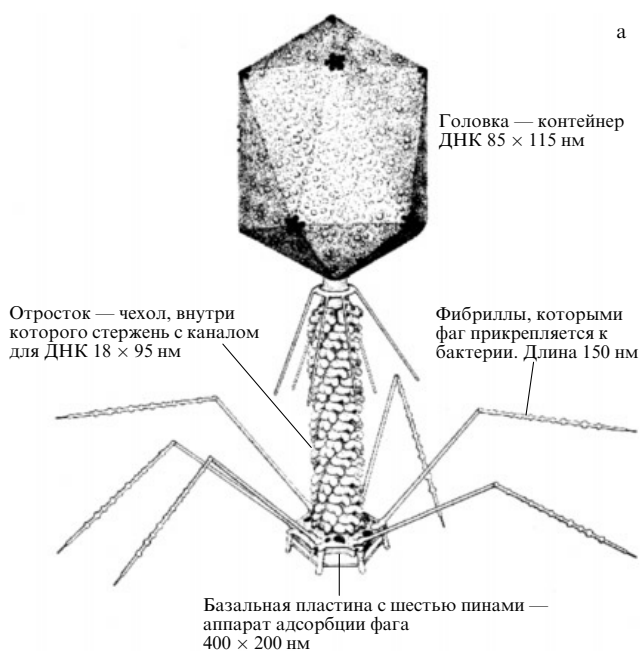
С этого момента биохимический аппарат бактериальной клетки в течение двух десятков минут работает под контролем ДНК бактериофага. Сначала синтезируются особые ферменты, которые останавливают синтез собственных белков и собственной ДНК клетки и стимулируют синтез ДНК и белков бактериофага. Затем внутри клетки из белков начинается сборка компонентов бактериофага (хвостов, голов) и целых бактериофагов (рис. 2).

Приблизительно через 20 минут вся имевшаяся в распоряжении клетки-жертвы энергия будет использована для построения новых бактериофагов. Оболочка клетки разрывается, и 100–200 потомков бактериофага оказываются готовыми к встрече с новыми бактериальными клетками.

Таким образом, вирусы и бактериофаги частично обладают качествами, которые с одной стороны, можно найти у безусловно живых организмов, но, с другой стороны, их свойства настолько редуцированы, что эти частицы можно отнести к неживым объектам. Однако вирусология — наука биологическая. Следовательно, классификация на основе свойств, указанных в табл. 1, не может удовлетворить нас и приводит к парадоксам.

Формализация задачи получения определения живого достаточно очевидна. Имеется множество физических терминов, которые наполнены определённым содержанием, и два множества объектов  $V$  (*vita*) и  $M$  (*mort*). В пространстве выбираемых признаков множества создают область перекрытия. С учётом современных научных фактов путём комбинации признаков множества  $V$  и  $M$  необходимо разделить. Другими словами, преобразовать спутанное множество признаков  $F(V, M)$  в два отдельных множества:

$$F(V, M) \rightarrow F_1(V) + F_2(M).$$



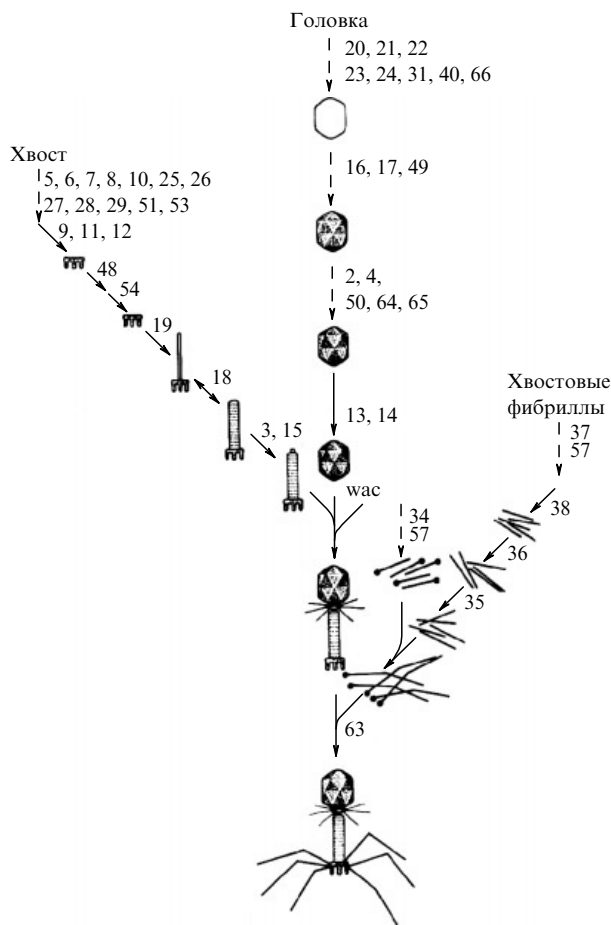
**Рис. 1.** Бактериофаг Т4: *относит ли этот объект к живой или неживой природе?* Трёхмерная (3D) реконструкция бактериофага (а), 3D-реконструкция растянутого (б) и сокращённого хвоста бактериофага (в). (Из наших работ 1980-х годов [36–38].)

При таком разделении  $F_1(V)$  будет являться определением жизни. Очевидно, что процедура разделения — это классическая задача распознавания образов. Здесь возможно построение логических функций от исходных признаков. Трудность состоит в том, что заранее нельзя сказать, комбинация каких признаков окажется полезной для такого разделения. Граница живого и неживого подвижна и проходит через наше восприятие окружающего мира.

### 3. Игра живой и неживой материи (десять парадоксов)

#### 3.1. Парадокс Платона и Сократа

В начале XX в. в Москве состоялась серия публичных диспутов между представителями христианской философии и материалистами. Судя по мемуарам, эти диспуты




**Рис. 2.** Последовательность сборки бактериофага [40]. Числа — номера генов, продукты которых участвуют в каждой из стадий сборки. Сплошными стрелками обозначены этапы, поддающиеся воспроизведению на основе самосборки в пробирке. Сборка головки бактериофага самосборкой организовать не может и требует участия управляющих генов.

стали событием не только церковной, но и культурной жизни страны [41]. Спор об идеализме и материализме фактически являлся спором об определении смысла жизни. Представители церкви доказывали совместимость религиозного и естественнонаучного мировоззрения. Материалисты отрицали. Демонстрация совместности научного знания и религиозного опыта была, пожалуй, основным аргументом обновлённой апологетики церкви. При этом отмечалось, что некоторые учёные-естественники соглашались с доводами религии [42]. Как вспоминали современники, это была дискуссия перебивающих друг друга мыслящих личностей. Однако эти диспуты окончились ничем. В споре не родилась истина. Дальнейшее развитие событий показало, что Бога можно свергнуть с престола, но такие "должности" в человеческом обществе не остаются вакантными. Развившийся тоталитарный режим создал свою религию, физически уничтожил прежних религиозных оппонентов, часть из них была выслана за границу, а остальные отправлены в лагеря или расстреляны.

Причина бессмысленности таких дискуссий состоит в том, что вера и наука имеют различную базу в человеческом сознании. Вера переносит неопределённости знаний в сферу сознания, а наука неопределённость знаний переносит в сферу эксперимента.

Можно предположить, что попытка найти какое-либо содержательное определение для феномена жизни — безуспешна. Суть этих предположений вытекает из двух теорем Гёделя о неполноте [43, 44]. Встаёт вопрос: достаточно ли полны сегодня наборы обнаруженных фактов и язык геномики, протеомики или метаболики, для того чтобы найти и описать признаки, отличающие живое от неживого в сфере эксперимента?

В рамках ограничения, высказанного в своё время Гёделем, можно пытаться дать определение живого в троичной логике. Помимо двух понятий *истина* и *ложь* следует ввести третье понятие — *неопределённость*. Таким образом, определение живого можно дать с точностью до величины его *неопределённости* на открытой границе пересечения множеств неживого и живого. Этот подход опирается на так называемый *парадокс Платона и Сократа* (парадокс 1). В троичной логике перечень понятий расширяется.



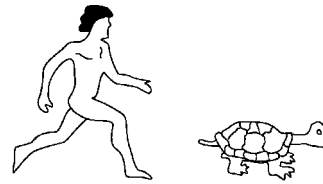
**Парадокс 1**

Платон говорит: "Следующее высказывание Сократа будет ложным". Сократ отвечает: "То, что сказал Платон, — истина". Порочный круг этих двух высказываний очевиден. Однако, если появится третий участник, который будет утверждать, что Платон чаще говорит неправду, чем Сократ, то симметрия высказываний нарушается и состояние устойчивого замкнутого круга противоречий превращается в движение по статистическому распутыванию противоречия. Необходимо теперь исследовать вероятности того, кто чаще говорит правду или неправду, Платон или Сократ. Если из  $N$  высказываний Платон говорил правду  $n$  раз, то Сократ —  $m$  раз. В  $u$  случаях правда и ложь неопределимы. При  $N = n + m + u$  вероятности того, что Платон и Сократ говорят правду, соответственно равны  $p_P = n/N$ ,  $p_C = m/N$ , а вероятность того, что они лгут можно записать так:  $q_P = (N - n)/N = m/N \pm \varepsilon$ ,  $q_C = (N - m)/N = n/N \pm \varepsilon$ , где  $\varepsilon = \pm u/N$ . Если  $\varepsilon \rightarrow 0$ , то вероятность возвращения в начало порочного круга  $P$  равна 1 только в симметричном случае, когда  $p = q = 1/2$ , так как  $P = 1 - |p - q|$ . Во всех остальных случаях, когда  $p \neq q$ , эта вероятность меньше единицы, следовательно, возврат в исходную точку порочного круга не происходит, и противоречия постепенно могут быть распутаны.

Человек даёт определение жизни. При этом определение, которое он формулирует, в его внутреннем представлении обогащает саму жизнь, но непротиворечивость этой новой, более богатой с его точки зрения, теории не может быть доказана средствами самой этой теории (вторая теорема Гёделя), поэтому получается порочный круг. Определение по мере его расширения перемещается по непрерывному усложнению самого определения феномена жизни, создавая тавтологию "жизнь — это живое". При разборе этого парадокса получается, что если это высказывание истинно, то оно ложно, и в то же время, если оно ложно, то оно истинно. Таким образом, оно внутренне противоречиво, потому что нет третьего варианта. Утверждения такого рода не могут быть доказаны или опровергнуты в пределах *двоичной логики* рассуждений [45].

### 3.2. Парадокс Зенона

Операционный метод — надёжное руководство к построению базиса знаний. Согласно этому методу



#### Парадокс 2

Парадокс Зенона состоит в том, что быстроногий Ахиллес никогда не догонит черепаху, если в начале движения черепаха находится впереди на некотором расстоянии от Ахиллеса. Между Ахиллесом и черепахой всегда будет оставаться отличное от нуля расстояние.

Доказательство: пусть Ахиллес бежит в  $m$  раз быстрее черепахи. Когда Ахиллес пробежит расстояние  $l$ , черепаха проползёт расстояние  $l/m$ ; когда Ахиллес пробежит это расстояние  $l/m$ , то черепаха проползёт  $l/m^2$  и т.д., т.е. всякий раз между ними будет оставаться отличное от нуля расстояние. Если сложить все отрезки пути, которые пробежал Ахиллес и проползла черепаха, то получатся два ряда геометрической прогрессии. Путь, пройденный Ахиллесом:  $s_A = l + l/m + l/m^2 + \dots + l/m^n + \dots = l + l \sum_{n=1}^{\infty} 1/m^n$ , путь, пройденный черепахой:  $s_C = l/m + l/m^2 + \dots + l/m^n + \dots = l \sum_{n=1}^{\infty} 1/m^n$ . Парадокс состоит в том, что между черепахой и Ахиллесом всегда будет оставаться некоторое отличное от нуля расстояние. Причина парадокса основана на предположении, что пространство и время можно делить на любые малые интервалы без ограничения.

любые постулаты и скрытые параметры, следствия которых нельзя проверить экспериментально и измерить, следует считать ненаучными. Если операционный метод игнорировать, то возникают парадоксы. Напомним о самом простом из них — парадоксе Зенона (парадокс 2).

Если предел точности измерения существует и равен  $\varepsilon$ , то путь  $s_A$ , пройденный Ахиллесом к тому времени, когда он догонит черепаху, определяется выражением  $q_{n_{\max}} = 1/m^{n_{\max}} = \varepsilon$  при  $n = n_{\max}$ , что демонстрирует рис. 3. Следовательно, парадокса нет.

Очень малые интервалы в физике, а тем более в биологии измерить нельзя. Если пытаться воспользоваться в качестве линейки, например, длиной волны порядка  $\lambda = 10^{-50}$  см, то энергия (в системе СГС) для создания такой волны должна быть порядка

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \approx \frac{2 \times 10^{-16}}{10^{-50}} = 2 \times 10^{34} \text{ эрг},$$

где  $h$  — постоянная Планка,  $\nu$  — частота,  $c$  — скорость света. Большие энергии убьют живую систему задолго до

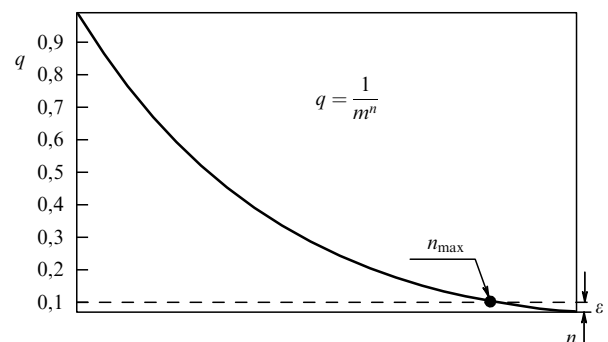


Рис. 3. Нормированная кривая, соответствующая выражению  $q = 1/m^n$ . Точка пересечения кривой и прямой  $\varepsilon$  соответствует моменту  $n_{\max}$ , в который Ахиллес догонит черепаху.

получения результата измерения. Следовательно, существует предел измерения  $\varepsilon$ , он и создаёт *неопределённость*. В своё время эти приборные ограничения были исследованы в ряде работ, в том числе в книге Л. Бриллюэна [46]. Между познанным и непознанным всегда будет оставаться величина  $\varepsilon$ .

Более того, обратим движение Ахиллеса и черепахи в противоположное, мысленно заставив их по сигналу развернуться и бежать назад. Окажутся ли Ахиллес и черепаха через  $n$  шагов вновь в исходной точке? Двоичная логика нам подсказывает, что должны оказаться. Однако это не так, поскольку груз неопределённости приведёт их в область неопределённости размером  $\pm 0,5\varepsilon$ . Теперь, если повторять процедуру смены направления их движения  $N$  раз, размер зоны неопределённости будет возрастать как  $\pm 0,5\varepsilon\sqrt{N}$ . Накопление ошибок при измерении — это проклятие всех экспериментов, включая численные эксперименты на компьютерах. При компьютерных экспериментах ошибки накапливаются из-за квантования процесса и суммирования погрешностей, связанных с округлением величин.

Эти рассуждения могут быть дополнены многочисленными примерами, использующими другие математические модели: двумерный газ Лоренца [47], бильярд Синая [48, 49], странные аттракторы [50] и т.п. Вывод будет одним и тем же: *мир, в котором мы живём, не является полностью детерминированным и содержит неопределённость*.

### 3.3. Парадокс демона Максвелла

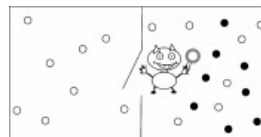
Направленное движение микрочастиц в потоках протоплазмы в живых клетках было замечено ещё 225 лет назад Корти [51] и с тех пор оно интенсивно изучается. На грибах и гигантских растительных клетках *Acetabularia*, *Nitella* и т.п. это движение можно увидеть с помощью оптического микроскопа, а иногда — и невооружённым глазом, например в случае *Physarum polycephalum* [52, 53].

Факт теплового движения неживых микрочастиц был замечен Ж. Ингенгхаузом (J. Ingenhousz) ещё в 1785 г., т.е. через 150 лет после создания А. Левенгуком первого оптического микроскопа. Левенгук зарегистрировал движение живых бактерий, сперматозоидов и простейших, которое очень походило на движение, замеченное позднее Ингенгхаузом при наблюдении неживых объектов: размельчённых частиц древесного угля на поверхности спирта. Само явление теплового движения было названо именем ботаника Р. Броуна (R. Brown), который опубликовал в 1828 г. результаты своих исследований движения мелких частичек, в том числе пыльцы растений, пыли и сажи, на поверхности воды [54]. В начале 70-х годов XX в. Х. Берг из Гарвардского университета с помощью следающего микроскопа в "лагранжевой системе координат" экспериментально регистрировал траекторию движения отдельной бактерии в пространстве и показал, что в изотропном объёме аттрактанта эта траектория также имеет случайный характер, при котором небольшие интервалы ровного плавания случайным образом перемежаются сменой направления движения [55–58]. Другими словами, живые и неживые частицы в микромире подчиняются одним и тем же правилам движения.

Шрёдингер попытался определить живое, переходя от общего к частному. Он писал [1, с. 105]: *"Как можно было бы выразить в терминах статистической теории ту*

*удивительную способность живого организма, с помощью которой он задерживает переход к термодинамическому равновесию (смерть)? Мы выше сказали: "он питается отрицательной энтропией", как бы привлекая на себя её поток, чтобы компенсировать этим увеличение энтропии, производимое им в процессе жизни, и таким образом поддерживает себя на постоянном и достаточно низком уровне энтропии"*. (Цитируется по первому изданию на русском языке, предпоследняя глава.)

Изложенная в этом отрывке позиция отражала точку зрения ряда выдающихся биологов и физиков 65 лет назад, которые изучали механизмы броуновского движения, поэтому легко была воспринята научной общественностью. Сегодня она выглядит неконструктивной. Энтропия — слишком грубый усреднённый параметр, для того чтобы с её помощью можно было бы охарактеризовать движение и развитие живых систем. Она не позволяет сделать содержательные выводы по отличию живых систем от неживых. Почему? Обратимся к парадоксу демона Максвелла (парадокс 3).



#### Парадокс 3

Парадокс "демона Максвелла" (1871 г.), сортирующего броуновские микрочастицы, т.е. отделяющего быстро движущиеся микрочастицы от медленных, почти

140 лет интересовал исследователей. Несколько поколений физиков изгоняли "демона" из науки. Были рассмотрены ограничения, не позволяющие микрочастице независимо от её устройства векторизовать случайную траекторию без притока дополнительной энергии, проанализированы возрастание энтропии в системе "демон ↔ микрочастицы" [59–61], влияние принципа неопределённости [62–64], невозможность регистрировать направление ударов в условиях температурного равновесия и т.п. [65–67]. Тем не менее интерес к этой проблеме сохранился. В новой интерпретации вопрос состоит в следующем: как формирование кинетики движения частиц разрушает парадокс демона Максвелла?

Частицы размером порядка  $10^{-8} - 10^{-6}$  м, например сажа или пыль в жидкости, демонстрируют стохастическое движение под действием как ударов молекул жидкости, так и взаимных столкновений (бильярдная модель). Броуновская подвижность была теоретически описана в 1905 г. А. Эйнштейном и М. Смолуховским [68–70]. В 1908 г. эта теория была дополнена П. Ланжевеном [71], который постулировал наличие двух компонент силы, заставляющей двигаться микрочастицы. Во-первых, это сила толчков молекул среды, происходящих с высокой частотой, которая заставляет микрочастицы изменять направление своего движения. Усреднённая за некоторый промежуток времени эта сила равна нулю. Второй компонентой является связанная с вязкостью среды сила, которая флуктуирует с низкой частотой.

Эти две силы независимы, и их влияние на движение частиц проявляется в аддитивной форме. Однако это справедливо лишь в первом приближении. При изменении параметров среды может происходить изменение формы частиц. Они могут "разрыхляться", "округляться" или пульсировать, влияя тем самым как на вязкость среды, так и на динамику собственного движения [72–74]. Другими словами, может возникнуть обратная связь и появиться цикл движения со взаимным влиянием "частицы ↔ среда". С тех пор теория броуновского движения

непрерывно модифицировалась с целью охватить различные его проявления в неживой и живой природе [75]. Во всех подобных задачах важна не столько *термодинамика процесса*, сколько *кинетика относительного изменения скорости* движения частиц и влияния на неё среды.

Понятие термодинамической вероятности имеет смысл только для состояний, близких к равновесию. Неравновесная термодинамика Л. Онзагера [76, 77] и дальнейшее её развитие Х. Казимиром [78], Мейксенером и И. Пригожиным [79–83] не дают основы для выяснения отличий живой материи от неживой. Даже для описания неживых диссипативных неравновесных структур, далёких от равновесия (например, таких, как ячейки Бенара [84] или структуры в колебательной реакции Белоусова–Жаботинского [85–92]), подходы неравновесной термодинамики оказываются слишком грубыми. Для содержательного описания открытых систем требуется *кинетический подход*, позволяющий сравнить индивидуальные скорости процессов в живой и неживой материи.

Первым выдающимся достижением в переходе от описания неживой материи к описанию живой стало решение энергетической проблемы. Для появления необратимости в макросистемах нет необходимости в непрерывной передаче или изъятии энергии из внешней системы. Необратимость может возникнуть из-за *кинетики процессов, происходящих внутри гетерогенных систем за счёт их собственного аккумулированного ранее запаса энергии и их неравновесности* [93]. Величайшей находкой в ходе эволюции живой материи было обнаружение ряда белков, обменивающих одну частоту квантов солнечного света на другую с затратой разности приобретаемой энергии на нужды живой материи. Хлорофилл и родопсины стали аккумуляторами энергии (своеобразными банками) живой природы, постоянно выдающими энергетические "ссуды" на её рост и развитие.

Другим выдающимся достижением в переходе от неживой материи к живой стала *структуризация* живой материи, что повлекло за собой увеличение продолжительности её *существования*. Приведём простой пример из неживой природы. Как известно, газовый кластер с повышенной плотностью, например, в форме шара радиусом  $R$  будет рассеиваться в воздухе со скоростью звука  $c_s$ :

$$c_s = \sqrt{\frac{\gamma T}{m}},$$

где  $\gamma$  — показатель адиабаты,  $T$  — температура,  $m$  — масса молекул. Внутри кластера движение обратимо. При этом по мере рассеяния кластера плотность молекул в нём будет уменьшаться, но оставаться некоторое время  $\tau_1$  более высокой, чем в окружающем пространстве. Длина свободного пробега молекул газа на границе кластера будет больше, чем внутри его. Радиус газового кластера при заданной плотности будет уменьшаться во времени по закону  $r_s = R - c_s t$ . При этом через время  $t = \tau_1 = R/c_s$  кластер полностью исчезнет, т.е. плотность молекул в нём станет одинаковой с плотностью окружающей области. Очевидно, чем больше кластер, тем больше время его жизни  $\tau_1$ . Время жизни кластера увеличится, если его заключить в оболочку (например,

мыльный пузырь). В этом случае характеристическое время жизни кластера  $\tau$  возрастёт. Теперь оно будет определяться не только первоначальным размером кластера и давлением внутри его, но и упругостью и проницаемостью оболочки. Это два аддитивных процесса. Время жизни такой системы возрастёт и будет равняться  $\tau \approx \tau_1 + \tau_2$ , где  $\tau_2$  — время жизни оболочки (мыльного пузыря). Наконец, время жизни газового кластера можно ещё увеличить, если внутри оболочки окажется капля воды или, что ещё лучше, капля жидкого перфторуглерода. В перфторуглеродах растворится до 50 % газа, а в воде — только 2 %. Тогда после исчезновения оболочки до тех пор, пока длится диффузия газа из капли во внешнюю среду, газовый кластер будет продолжать существовать. Таким образом, время жизни кластера увеличится и станет равным  $\tau \approx \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ , где  $\tau_3$  — характеристическое время диффузии газа из капли. Гетерогенность структуры приводит к увеличению продолжительности жизни системы. При этом возникает комбинация обратимой и необратимой частей системы. Другими словами, на фронте кластера происходит разрушение корреляций в первоначальном взаимодействии молекул, а за фронтом находится классическая механическая система с обратимой траекторией. Далее на фронте следующей фазы также происходит разрушение корреляций в движении молекул с другим характеристическим временем, а за фронтом опять будет находиться классическая механическая система с обратимой траекторией и т.д. До тех пор пока существует последняя структура, энтропия внутри этой структуры будет ниже, чем в окружающей среде. При этом сами величины энтропии внутри структуры кластера и в окружающей среде для дальнейшего рассмотрения особой роли не играют. Главная характеристика кинетическая — это время жизни  $\tau \approx \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ , т.е. время существования системы. Ключевое слово здесь — *существование*.

Что касается оценок с использованием энтропии, то в своё время эти вопросы были рассмотрены Л.А. Блюменфельдом в книге [94]. Приведу один пример из этой книги [94, с. 6]. Организм взрослого человека содержит около 7 кг белков и около 150 г ДНК, что соответствует  $3 \times 10^{25}$  аминокислотным и  $3 \times 10^{23}$  нуклеотидным остаткам. Для создания единственной последовательности из  $20^{3 \times 10^{25}}$  вариантов, возможных для белка, необходимо примерно  $1,3 \times 10^{26}$  бит информации. В случае ДНК необходимо примерно  $6 \times 10^{23}$  бит. В пересчёте на энтропию получаем для белков 300 энтропийных единиц (э.е.), а для ДНК — приблизительно 1,4 э.е. Таким образом, упорядоченность биологической организации человеческого тела не превышает 301,5 э.е., причём подавляющий вклад в эту упорядоченность вносит упорядоченное распределение аминокислотных остатков в молекулах белков. Такое понижение энтропии при возникновении сложнейшей биологической организации — человеческого тела — с лёгкостью компенсируется обычными физическими и химическими процессами. Так, например, повышение энтропии на 300 э.е. обеспечивается испарением 170 см<sup>3</sup> воды или окислением 900 г глюкозы.

Вышеприведённые оценки показывают, что возникновение и усложнение биологической организации термодинамически происходит практически "бесплатно" за счёт чередования обратимых и необратимых процессов внутри системы. Энтропия совокупности  $10^{13}$  различных



одноклеточных организмов почти не отличается от энтропии человека, состоящего из  $10^{13}$  клеток. Все разговоры об "антиэнтропийных тенденциях" биологической эволюции и живой материи основаны на недоразумении. Согласно термодинамическим критериям любая биологическая система упорядочена не больше, чем кусок горной породы того же веса. Их различие заключается в кинетике и способности запоминать удачные обстоятельства структурирования (последняя характеристика будет рассмотрена в разделе 3.9).

В 1990 г. М. Перутц в статье "Физика и загадка жизни" [95] отметил: "Очевидные противоречия между жизнью и статистическими законами физики могут быть разрешены включением в рассмотрение науки, которую Шрёдингер игнорировал. Эта наука — химия. Когда Шрёдингер писал: "Регулярный ход событий, управляемый законами физики, никогда не является следствием одной высокоупорядоченной конфигурации атомов, если только эта конфигурация не повторяется многократно", он не представлял, что в точности так работают химические катализаторы. Если имеется источник свободной энергии, то высокоупорядоченная конфигурация атомов в одной молекуле фермента может направить образование упорядоченного стереоспецифического вещества со скоростью  $10^3 - 10^5$  молекул в секунду, создавая порядок из беспорядка, в конечном счёте, благодаря солнечной энергии".

Такая аргументация правильна, но и она представляет лишь исторический интерес. На поле биологии в первой половине XX в. одновременно формировались две ветви науки: биохимия и биофизика. Они занимались одним и тем же — познанием живого, но различались используемым для описания языком. Природа едина, а деление наук по рубрикам всегда условно. Если исходить из доламарковского тезиса, что физика — это наука о природе в целом (занимающаяся исследованием как неживой, так и живой материи), то язык биохимии можно рассматривать как частный случай языка физики [75]. Хотя язык биохимии в ряде случаев лучше приспособлен для описания явлений, свойственных живому. Этот язык интенсивно разрабатывается сегодня для количественного описания кинетики метаболизма в живых системах. Первые результаты его создания изложены нами в книге [96]. Однако и этот язык пока не обладает достаточной общностью, для того чтобы с его помощью однозначно сформулировать отличие живого от неживого.

Уже в течение нескольких лет предпринимаются попытки приложить к описанию живых систем ещё один язык — язык теории информации [97]. Проблема здесь состоит в том, что для биологических систем важно не количество информации, а её качество, т.е. ценность информации. Для того чтобы сформулировать, что такое ценность информации, нужно определить цель живого. Если цель определена, то охарактеризовать понятие "ценность информации" особого труда не составляет. Её можно определить в терминах вероятности, поскольку после получения информации вероятность достижения цели увеличивается.

Проводить оценку можно разными способами (по М.М. Бонгарду [98], по А.А. Харкевичу [99] или В.И. Корогодину [100]). Проблема использования теории информации для описания живых систем состоит в определении цели живого. Есть ли эта цель и какова она? Какая цель, например, у травы или дерева, кроме как существовать, т.е. появиться на свет, питаться, расти,

размножаться и умирать? Если допустить, что у живого есть цель, то мы неизбежно должны предположить, что её кто-то поставил или она возникла из ничего. Другими словами, мы скатываемся в этом случае либо к креационизму, т.е. к тому, что цель задана кем-то свыше, либо к рождению цели из ничего, а именно к тому, что неупорядоченность является истоком упорядочивания и несёт в себе свойства организующего начала. Во втором случае необходимо понять, как из случайности может родиться упорядоченность (к механизму этого рождения мы обратимся в разделах 3.9, 3.10). Вместе с тем при решении многих частных задач биологии (анализа рецепции, репликации, мутаций; рассмотрения биомакромолекул как наномашин; создания нейрокомпьютеров) информационный подход используется и он даёт хорошие практические результаты [97].

### 3.4. Парадокс кота Шрёдингера

Поскольку корни жизни уходят на атомно-молекулярный уровень, то предпринимались попытки на квантовом уровне найти ответ на вопрос: чем отличается живое от неживого? Квантовая физика, так же как и классическая физика, необратима, хотя само квантово-механическое уравнение Шрёдингера обратимо.

Дело в том, что измерения в квантовой механике основаны на двух постулатах [97]. Первым постулатом является само уравнение Шрёдингера  $i\hbar \partial \Psi / \partial t = H\Psi$ , где  $\hbar$  — постоянная Планка,  $H$  — оператор Гамильтона,  $\Psi$  — волновая функция системы. Вторым постулат представляет собой зависимость плотности вероятностей  $\rho(x)$  обнаружить частицу в заданной точке  $x$  (или в точках  $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$ ) от  $\Psi$ :

$$\rho(x) = \Psi^*(x) \Psi(x),$$

где  $\Psi^*(x)$  — функция, комплексно сопряжённая  $\Psi(x)$ . При этом регистрация частицы предполагает коллапс волновой функции, при котором она стягивается в точку, т.е. плотность вероятностей  $\rho(x)$  приобретает вид дельта-функции  $\delta(x)$ :

$$|\Psi(x)|^2 = \rho(x) \rightarrow \delta(x).$$

Известно, что даже если в гамильтониан включить всю систему вместе с измерительным прибором, то редукция не может быть описана уравнением Шрёдингера. Эти постулаты в рамках квантовой механики несовместимы. Суть состоит в том, что редукция волнового пакета — процесс необратимый во времени. Следовательно, энтропия в течение этого процесса возрастает, но согласно теореме фон Неймана [101] это невозможно, так как само квантово-механическое уравнение Шрёдингера обратимо во времени. Согласно теореме Вигнера [102] интегральная мера начальных отклонений в квантово-механических системах остаётся постоянной и не увеличивается со временем, что и является признаком обратимости. В связи с этим и появился мысленный эксперимент, который вошёл в историю науки как парадокс кота Шрёдингера [17] (парадокс 4).

Этим парадоксом Шрёдингер хотел показать, что квантовая механика неполна без некоторых правил, которые указывают, при каких условиях происходит коллапс волновой функции и кот либо становится мёртвым, либо остаётся живым, но перестаёт быть смешением того и другого. Шрёдингер считал, что квантовая



#### Парадокс 4

В 1935 г. Эрвин Шрёдингер хотел продемонстрировать неполноту при переходе от субатомных систем к макроскопическим системам

[103]. Суть его мысленного эксперимента состояла в том, что в закрытый ящик помещён кот. В ящике имеется механизм, содержащий ёмкость с ядовитым газом. Параметры эксперимента подобраны так, что детектор, входящий в механизм, реагирует на прилёт квантовой частицы, приводя в действие некоторый механизм, разбивающий ёмкость с ядовитым газом, и кот умирает. Согласно квантовой механике, если ящик закрыт, то равновероятные состояния находятся в суперпозиции и являются смешанными. Следовательно, *кот, сидящий в ящике, и жив, и мёртв одновременно*. Если ящик открыть, то экспериментатор увидит только какое-нибудь одно конкретное состояние — "детектор сработал, кот мёртв" или "детектор не сработал, кот жив". Вопрос ставится так: *когда система перестаёт существовать как смешение двух состояний и выбирается одно конкретное, т.е. система становится необратимой?*

механика не до конца описывает реальность. Оригинальная статья Шрёдингера вышла в немецком журнале *Naturwissenschaften (Естественные науки)* [103]. Целью статьи было обсуждение парадокса Эйнштейна–Подольского–Розена [104], опубликованного ранее в том же году. В *двоичной* ситуации, подобно *живому и одновременно мёртвому коту*, находится и атомное ядро. Оно обязано быть либо распавшимся, либо не распавшимся, третьего не дано. После распада материнского ядра на частицы А и В, эти частицы представляют собой квантовую суперпозицию всевозможных запутанных состояний, различающихся значениями импульса частиц, что в двоичной логике вносит неопределённость в предсказание места их обнаружения при регистрации.

Есть несколько способов объяснить *необратимость квантово-механических систем*. Там, где рассматривается волновое движение, можно использовать уравнение Шрёдингера, а прибор, с помощью которого регистрируются частицы (фотопластинка или любой другой прибор-детектор), уравнением Шрёдингера уже не описывается. Можно утверждать, что в процессе регистрации на волновую функцию действует проекционный оператор макроприбора, который превращает размытую в пространстве волновую функцию в факт регистрации, стягивая её в точку. Именно он делает систему необратимой. В связи с этим возникает вопрос: должны ли мы согласиться с использованием проекционного оператора прибора как некоего дописка к уравнению Шрёдингера или откуда вообще берутся вероятности в волновом уравнении Шрёдингера?

Согласно копенгагенской школе Бора [105] имеет место *принцип дополнителности*, а именно: элементы физической реальности (импульсы или координаты) не являются некими объективно существующими атрибутами микромира, а непосредственно зависят от выбранных для их регистрации приборов. Если принять сторону Бора, то никаких скрытых параметров в квантовую механику вводить не следует. Квантовую механику можно понять, приняв как факт, что волновая функция  $\Psi(x)$  имеет другой смысл. Это всего лишь *распределение вероятностей*. Неважно, как называть волновую функцию в квантовой механике, её можно назвать *информационной*, т.е. волновая функция отличается от всех других

волновых полей классической механики, которые подчиняются законам сохранения, например законам сохранения энергии или заряда. К квантовой волновой функции эти законы не применимы. Коллапсы волновых функций — это стирание квантовой информации путём факторизации волновых функций. Развитие Природы — это *частичное стирание памяти предыдущего этапа развития системы по отношению к последующему* и превращение их в независимые [106]. Более того, хотя сама квантовая частица — *не локальна, локальной её делает процесс регистрации*. Когда мы говорим про вероятности, то нас не смущает, что в каждой конкретной реализации случайного процесса все остальные возможности тут же уничтожаются. Когда же мы говорим о волновой функции, нам это непривычно. Всё новое поначалу кажется невозможным. А потом все-таки мы к этому привыкаем.

Согласно теореме Белла [107] имеется возможность статистической экспериментальной проверки существования скрытых параметров, влияющих на любую физическую характеристику. В приложении к квантово-механической теории такие эксперименты были проведены в 1976 г. и было показано, что волновое уравнение Шрёдингера не требует введения скрытых параметров [108]. Недавно в *УФН* была опубликована одна из последних лекций Б.Б. Кадомцева, в которой разбирается этот и некоторые последовавшие за ним эксперименты [106]. В 1985 г. Аспе и Грандье провели эксперимент, который также подтвердил, что квантово-механическое уравнение Шрёдингера является достаточным для описания квантовых эффектов и не требует введения скрытых параметров. Квантовый мир по своей природе оказался вероятностным и не похожим на мир классической механики [109]. Оставалось либо признать, что это два разных мира, либо возобновить попытки поиска скрытых параметров.

В связи с этим следует отметить интересную гипотезу Эверетта о множественности миров [110]. Эверетт предложил считать, что для составной квантово-классической системы (каковой является частица, взаимодействующая с измерительным прибором) утверждение о том, что квантовая система находится в запутанном комбинированном состоянии с классической системой, является бессмысленным. Это привело Эверетта к заключению об *относительном* характере состояния одной системы по отношению к другой.

Б. Де Витт, модернизируя трактовку Эверетта, предложил интерпретировать суперпозицию волновых функций как набор состояний одинаковых, не взаимодействующих между собой параллельных миров, каждый из которых содержит "альтернативную историю" распада материнской частицы и характеризуется своим значением импульса [111]. До тех пор, пока не проведено измерение, невозможно установить, в каком из этих миров осуществляется эксперимент. В момент измерения происходит необратимое "расщепление миров" и история обеих частиц, А и В, с момента самого распада становится определённой и необратимой. После факта регистрации частицы А её влияние на состояние частицы В прекращается. Любая теория должна быть проверяема в эксперименте. Однако многомировая интерпретация предполагает, что "параллельные миры" не взаимодействуют, а потому их существование принципиально не проверяемо. Эту гипотезу нельзя ни доказать, ни опровергнуть в результате эксперимента.

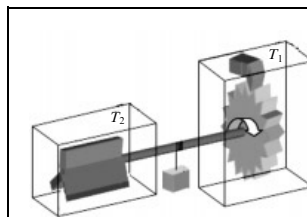
Тем не менее некоторые учёные признают данную гипотезу как имеющую право на существование [112]. В частности, в УФН было опубликовано несколько статей М.Б. Менского [5, 113–117]. М.Б. Менский попытался объяснить феномен жизни и сознания на основе модификации многомировой концепции Эверетта [5, 117]. Утверждается, что *сознание* приводит к ощущению необратимости, так как субъективно экспериментатор обнаруживает себя в одном из "эвереттовских миров", в котором реализуется измерение. Поскольку человек видит один из миров, он не может видеть другие. Другие миры при этом исчезают только для экспериментатора, но продолжают существовать. Отсюда Менским предложено определение жизни: "*жизнь — это выбор и осознание альтернатив*".

Эта гипотеза не проверяема в эксперименте. На мой взгляд, более перспективным было бы использовать понятие структурной устойчивости регистрирующего прибора, а не термин "сознание", который в этом контексте воспринимается плохо. Хотя часть из предлагаемого определения жизни является удачной, а именно "*выбор альтернатив*", но это понятие следует из других соображений, на чём мы остановимся в разделе 3.9.

### 3.5. Парадокс стохастического храповика

*Стохастический храповик Р. Фейнмана* — это, по сути, тот же демон Максвелла. Рассмотренное Р. Фейнманом устройство может вращаться только в одном направлении. При этом возникает необратимость направления вращения. В часовом механизме храповик — это *память*, фиксирующая достигнутый в ходе вращения шестерёнки угловой поворот. Например, в механических часах вращение возникает под действием взведённой пружины, а храповик обеспечивает направление движения в одну сторону. Способ подачи энергии в систему не принципиален: он может быть тепловым, механическим или электрическим. В биофизике идея *храповика* — это путь поиска логически похожих устройств в живых системах, позволяющих дать простое объяснение тому, что в них существует направленность развития. На основе идеи храповика Р. Фейнман попытался доказать на молекулярном уровне, что второй закон термодинамики в работе такой механической системы с *памятью* не нарушается, т.е. выполнять работу без перепада температур невозможно. Парадокс *стохастического храповика Фейнмана* сформулирован в его лекциях [118] (парадокс 5).

Р. Фейнман дал следующее объяснение. Шестерёнка храповика, проскочив очередной зубец, должна возвратиться в прежнее положение. Когда шестерёнка пройдёт через конец зубца и сработает прижимная пружинка, зубец собачки ударится о шестерёнку и начнёт подпрыгивать. Если в это время произойдёт очередная тепловая флуктуация, то шестерёнка может повернуться и в другую сторону, так как зубец окажется приподнятым. Значит, для необратимости вращения шестерёнки важно, чтобы имелось устройство, способное гасить прыжки зубца. Но при этом энергия собачки перейдёт ко всему механизму в виде тепловой энергии. По мере вращения шестерёнки вся система будет всё сильнее нагреваться. Вместе с храповиком начнёт нагреваться и сам газ. Собачка и пружинка, сами обладающие некоторой температурой, подвержены также и случайным флуктуациям движения. Это означает, что время от времени



#### Парадокс 5

Суть парадокса следующая. Пусть в двух сосудах находится газ соответственно при температурах  $T_1$  и  $T_2$ , а внутри одного из них имеется храповик, а в другом — вертушка-крыльчатка, жёстко посаженная на ось, причём будем считать, что  $T_1 = T_2 = T$ . От ударов молекул газа вертушка будет покачиваться. Шестерёнка храповика может поворачиваться только в одну сторону, поскольку обратному движению препятствует храповик, состоящий из собачки (зуба и шестерёнки) и прижимной пружинки. Собачка пресекает попытки вертушки поворачиваться в обратную сторону. Если шестерёнка будет медленно поворачиваться в одну сторону под действием ударов молекул газа, то удастся даже подвесить на ниточку небольшой грузик, привязав нить к оси, и поднять его. *Может ли такая система совершать работу?* Ответ: при равенстве температур это невозможно.

зубец случайно поднимается и проходит мимо шестерёнки, как раз в тот момент, когда та же флуктуация температуры пытается повернуть её назад. Чем больше нагрев, тем чаще это будет происходить. В итоге за цикл ось в среднем остаётся в исходном угловом положении. Когда температура в обоих сосудах одинакова, в среднем одностороннего вращения не будет.

Ось будет вращаться в одну сторону только в том случае, если температура вертушки  $T_2$  и температура храповика  $T_1$  таковы, что  $T_1 < T_2$ . Другими словами, если есть температурный градиент  $\Delta T = T_2 - T_1$ , то он может совершать работу при условии, что его хватит на покрытие расходов на трение в системе. Это объяснение является банальным и соответствует циклу Карно:  $Q_1/Q_2 = T_1/T_2$ , где  $Q_1$ ,  $T_1$  и  $Q_2$ ,  $T_2$  — тепловая энергия и температура соответственно лопастей и храповика. Отсюда следует, что никакого парадокса нет. Результат полностью согласуется с законами термодинамики.

Интересна кинетика процесса в храповике при равенстве  $T_2 = T_1$ , но при введении в эту систему дополнительной энергии с помощью изменения массы подвешенного груза. Если мы подвесим чересчур большой груз, то могут произойти любые неприятности. Зубец соскользнет, лопнет пружинка или ещё что-нибудь случится. Но предположим, что груз очень мал. В этих условиях верен приведённый ниже анализ вероятностей поворота шестерёнки вперёд или назад при равенстве температур. При каждой температурной флуктуации валик поворачивается на угол  $\theta$  так, что угловая скорость равна величине  $\theta$ , умноженной на вероятность появления флуктуации в единицу времени. Шестерёнка храповика поворачивается вперёд с вероятностью  $p_1 = (1/\tau) \exp[-(\varepsilon + L)/kT]$  и назад с вероятностью  $p_2 = (1/\tau) \exp(-\varepsilon/kT)$ . Здесь  $\tau$  — характеристическое время, соответствующее периоду между флуктуациями,  $\varepsilon + L\theta$  — энергия, создаваемая вертушкой за счёт флуктуации ударов молекул газа,  $\varepsilon$  — величина флуктуаций,  $L$  — момент инерции груза,  $\theta$  — угол поворота вала,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура, при этом угловая скорость храповика

$$\omega = \frac{\theta}{\tau} \left[ \exp\left(-\frac{\varepsilon + L\theta}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT}\right) \right] = \frac{\theta}{\tau} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT}\right) \left[ \exp\left(-\frac{L\theta}{kT}\right) - 1 \right].$$

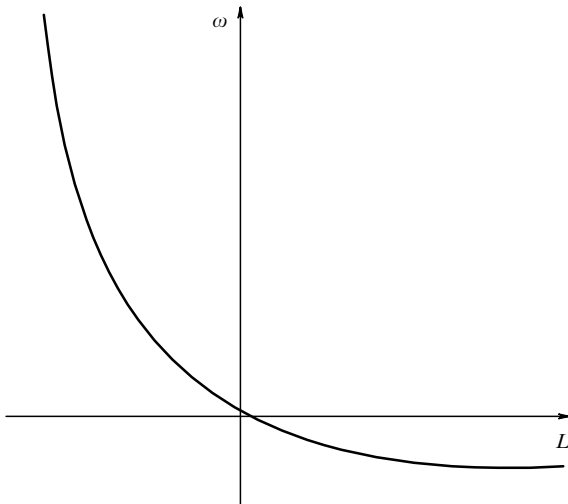


Рис. 4. График зависимости угловой скорости храповика  $\omega$  от момента инерции груза  $L$ .

График зависимости  $\omega$  от  $L$  показан на рис. 4. Из рисунка видно, что когда значение  $L$  положительно, результат один, когда отрицательно — другой. График асимметричен. Если  $L$  возрастает, будучи положительным, что бывает, когда мы хотим повернуть шестерёнку назад, то угловая скорость вращения назад меняется слабо (правая часть графика). Когда  $L$  становится отрицательным, то экспонента резко возрастает (левая часть графика). Идя в одну сторону (налево), мы получаем большую угловую скорость от малой силы. Идя в обратную сторону, мы можем приложить много усилий, а вал будет сдвигаться незначительно. Возникает асимметрия.

Сходная асимметрия появляется, например, в *электрическом выпрямителе*, действие которого основано на асимметричном сопротивлении. Вместо механической силы здесь имеется электрический ток, а вместо угловой скорости — сила тока. Проведённый выше анализ для механической системы пригоден и для электрического выпрямителя.

Обратимся к первоначальному механизму Фейнмана. Если бы  $T_2$  была больше  $T_1$ , то храповик вращался бы вперёд. Если бы  $T_1$  превышала  $T_2$ , то храповик вращался бы назад. Храповик с избытком теплоты внутри вращается назад, потому что зубец храповика отскакивает. Если зубец в какой-то момент находится на наклонной плоскости, то он толкает эту плоскость в сторону подъёма. Но это происходит *не всё время*, поскольку если зубец поднимется достаточно высоко, то он окажется на новой наклонной плоскости. Другими словами, горячий храповик идеально приспособлен для вращения в сторону, обратную той, в которую первоначально было предназначено вращаться шестерёнке.

Любопытно заметить, что если масса грузика, перемещающегося вниз, будет изменяться во времени, например, по закону  $\cos \Omega t$ , то полученное ранее выражение для частоты примет вид

$$\omega = \frac{\theta}{\tau} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT}\right) \left[ \exp\left(-\frac{\theta L_0 \cos \Omega t}{kT}\right) - 1 \right] \approx \frac{\theta^2}{\tau kT} L_0 \cos \Omega t \left( \frac{\varepsilon}{kT} - 1 \right).$$

Теперь осцилляции массы грузика начинают играть роль колебаний температуры и при  $\varepsilon/(kT) \gg 1$  могут поворачивать колёсико как вперёд, так и вспять. В подобной системе абсолютно безразлично, как появляются осцилляции. Колеблется ли температура, меняется ли вес грузика или упругость храповика, в среднем результат будет один и тот же.

Биологические системы прекрасно пользуются правилами обмена разными видами энергии для своего существования в меняющемся мире. И тем не менее, как бы хитроумно мы ни сконструировали "асимметричный" механизм, при симметрии воздействующих сил он не будет вращаться в одну сторону чаще, чем в другую. Он может поворачиваться либо туда, либо сюда, но при продолжительной работе *в среднем* останется на месте. Ключевые слова здесь — "в среднем". Однако *при сужении спектра колебаний дисперсия колебаний будет возрастать*. Возрастание флуктуаций при ограниченном времени наблюдения может дать ощутимое перемещение шестерёнки как вперёд, так и назад, но мы не можем предвидеть, в какую сторону она повернётся. Это дело случая. Похожая система часто реализуется и в биоструктурах [119, 120]. В настоящее время в связи с развитием нанотехнологий и созданием нанобиомоторов идёт лавина работ, демонстрирующих наличие молекулярных хаотических храповиков в химических и биологических системах [121–140]. Примеры биологических прототипов таких устройств мы приведём в разделе 3.10.

Основные законы физики обратимы, а необратимость возникает из-за превращения *порядка в беспорядок*. Но это утверждение непонятно до тех пор, пока мы не знаем, откуда возникает *порядок*, т.е. векторизация движения. Причина состоит в том, что обычно ситуации, которые мы наблюдаем ежедневно и повсеместно, не бывают равновесными. В биологии вместо фейнмановского термина "храповик" чаще используют термин "память о прошлых состояниях". Слова *храповик* и *память* здесь могут рассматриваться как синонимы (см. разделы 3.9, 3.10).

### 3.6. Парадокс дефицита времени

В 1981 г. была опубликована книга двух астрофизиков Фреда Хойла и Налин Чандра Викрамасингха *Эволюция из Космоса* [141]. В июньском номере журнала *Курьер Юнеско* за 1982 г. Викрамасингх в статье "Размышления астронома о биологии" так излагает главную идею книги: "Свои собственные философские предпочтения я отдаю вечной и безграничной Вселенной, в которой каким-то естественным путём возник творец жизни — разум, значительно превосходящий наш. Он и заложил основы биологической эволюции на нашей планете". Аргументация такова: "Нелепо полагать, что информация, которую несёт одна простейшая бактерия, путём репликации может развиваться так, чтобы появился человек и все живые существа, населяющие нашу планету. Этот, так называемый здравый смысл равнозначен предположению, что если первую страницу "Книги Бытия" переписать миллиарды миллиардов раз, то это приведёт к накоплению достаточного количества ошибок и, следовательно, достаточного многообразия для появления не только всей Библии целиком, но и всех книг, хранящихся в крупнейших библиотеках мира... Число перестановок, необходимых для появления жизни, на многие порядки превышает число атомов во всей видимой Вселенной."

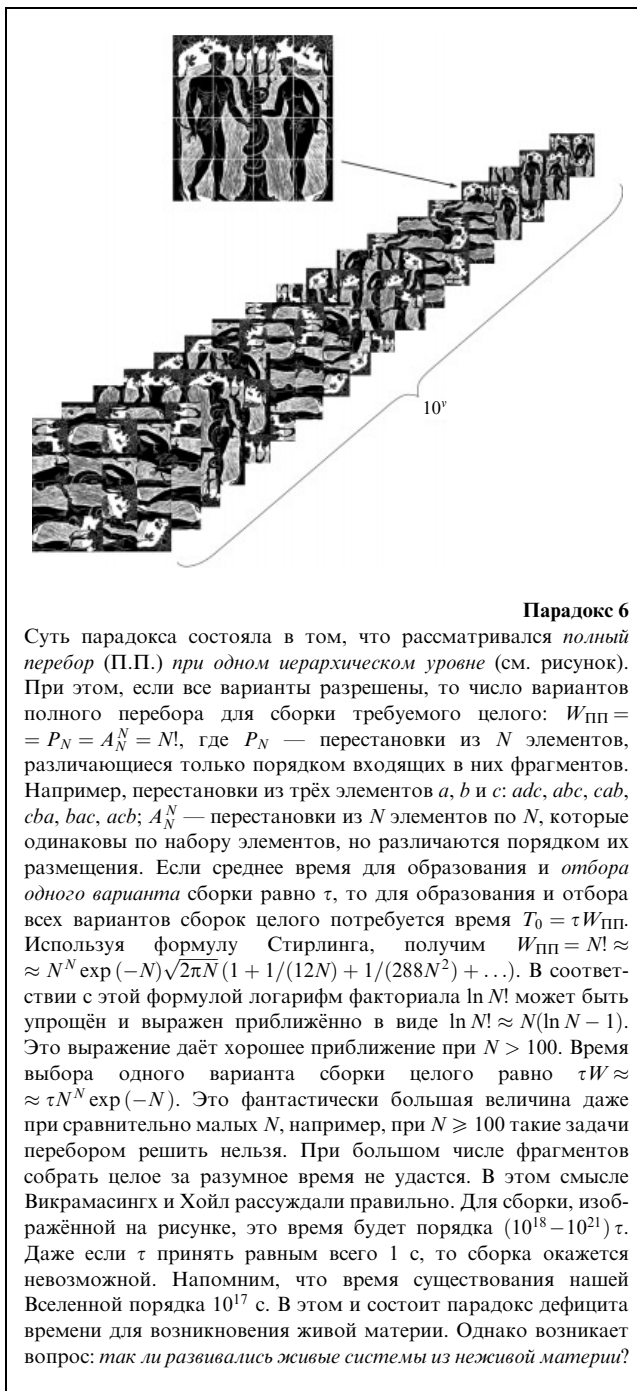
*Скорее ураган, пронесшийся по кладбищу старых самолётов, соберёт новёхонький суперлайнер из кусков лома, чем в результате случайных процессов возникнет из своих компонентов жизнь".*

Авторы этой книги и их последователи [142, 143] указывали, например, на проблему с молекулой ДНК, а именно на то, как она работает в живой клетке. Процесс её репликации (копирования) регулирует фермент. Он движется по молекулярной цепочке ДНК для образования её копии и считывает последовательность кода. В случае, если обнаруживается неверный нуклеотид, к делу приступает "ремонтирующий механизм", который использует другой фермент, чтобы "вырезать" ошибочный нуклеотид и восстановить правильный, исправляя тем самым ошибку. Давайте посмотрим на ДНК и этот "ремонтирующий механизм", отмечали авторы указанных работ. Действительно ли такой механизм был образован случайными естественными процессами? Если вначале появился ремонтирующий механизм, то какая от него польза, если ДНК ещё не образовалась? Если, напротив, вначале появилась молекула ДНК, то как она знала, что ей будет необходим ремонтирующий механизм? Оба механизма должны были возникнуть одновременно. ДНК — это нестабильная молекула, и без системы постоянного "ремонта" она быстро распадётся в результате химического окисления и других процессов. Каким же способом можно объяснить, что ДНК могла существовать в течение миллионов лет, пока ремонтирующий механизм эволюционировал? ДНК просто распалась бы на нуклеотиды до того, как предполагаемые миллиарды случайных мутаций смогли создать ремонтирующий механизм.

Так возник *парадокс о дефиците времени*, необходимого для возникновения живой материи (парадокс 6).

Этот парадокс легко опровергнуть следующими соображениями. Очевидно, что сборку целого из составляющих его фрагментов можно осуществлять *снизу вверх*, последовательно по этапам переходя от маленьких блоков к большим, т.е. от атомно-молекулярного уровня — к уровню целого организма. Именно так и происходило развитие и усложнение живых систем. При этом процесс разбивался на сборки каждого уровня. На каждом уровне отбирались нужные для дальнейшей сборки блоки. Это есть правило блочно-иерархического отбора (БИО) [144]. При этом выигрыш во времени сборки будет очень большим (рис. 5).

Несложно показать, во сколько раз будет выигрыш во времени. Введём обозначения:  $N$  — число фрагментов нижнего уровня, содержащихся в собранном целом верхнего уровня;  $k_i$  — число сборок на  $i$ -м уровне, отбираемых на уровень  $i+1$ ;  $n_i$  — длина сборки из фрагментов  $i$ -го уровня;  $k_1$  — исходное число сборок на первом уровне;  $m$  — число иерархических уровней;  $i$  — порядковый номер уровня,  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $W_i$  — число переборок для получения необходимой сборки на  $i$ -м уровне;  $\tau$  — время, необходимое для сборки одного варианта на любом из  $i$ -х уровней;  $T_i$  — время, необходимое для отбора правильного варианта на  $i$ -м уровне. Будем полагать, что правильные сборки отбираются на каждом уровне, а неправильные отбрасываются. Примем утверждение теории Ч. Дарвина: отбор осуществляет внешняя среда. Правильные сборки пропускаются на следующий, второй уровень. Тогда время сборки всей последовательности  $T_0 = \sum_{i=1}^m \tau_i W_i$ . Здесь  $W_i$  — число

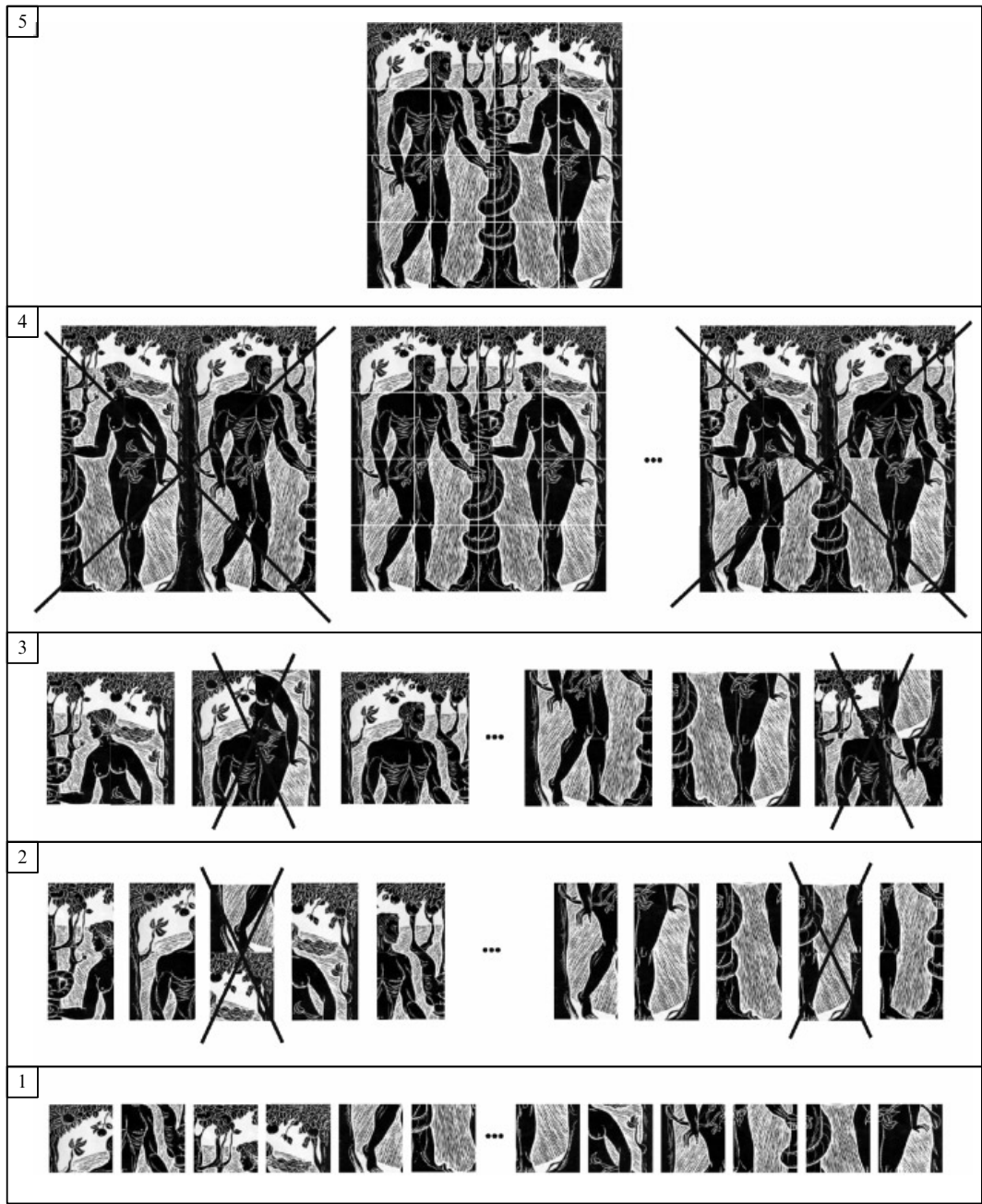


#### Парадокс 6

Суть парадокса состояла в том, что рассматривался *полный перебор* (П.П.) при одном иерархическом уровне (см. рисунок). При этом, если все варианты разрешены, то число вариантов полного перебора для сборки требуемого целого:  $W_{пп} = P_N = A_N^N = N!$ , где  $P_N$  — перестановки из  $N$  элементов, различающиеся только порядком входящих в них фрагментов. Например, перестановки из трёх элементов  $a, b$  и  $c$ :  $adc, abc, cab, cba, bac, acb$ ;  $A_N^N$  — перестановки из  $N$  элементов по  $N$ , которые одинаковы по набору элементов, но различаются порядком их размещения. Если среднее время для образования и отбора одного варианта сборки равно  $\tau$ , то для образования и отбора всех вариантов сборок целого потребуется время  $T_0 = \tau W_{пп}$ . Используя формулу Стирлинга, получим  $W_{пп} = N! \approx N^N \exp(-N) \sqrt{2\pi N} (1 + 1/(12N) + 1/(288N^2) + \dots)$ . В соответствии с этой формулой логарифм факториала  $\ln N!$  может быть упрощён и выражен приближённо в виде  $\ln N! \approx N(\ln N - 1)$ . Это выражение даёт хорошее приближение при  $N > 100$ . Время выбора одного варианта сборки целого равно  $\tau W \approx \tau N^N \exp(-N)$ . Это фантастически большая величина даже при сравнительно малых  $N$ , например, при  $N \geq 100$  такие задачи перебором решить нельзя. При большом числе фрагментов собрать целое за разумное время не удастся. В этом смысле Викрамасингх и Хойл рассуждали правильно. Для сборки, изображённой на рисунке, это время будет порядка  $(10^{18} - 10^{21}) \tau$ . Даже если  $\tau$  принять равным всего 1 с, то сборка окажется невозможной. Напомним, что время существования нашей Вселенной порядка  $10^{17}$  с. В этом и состоит парадокс дефицита времени для возникновения живой материи. Однако возникает вопрос: *так ли развивались живые системы из неживой материи?*

переборов на каждом  $i$ -м иерархическом уровне. При этом значение  $W_i$  зависит от переменных  $m, N, k_i$  (таких разных  $k_i$  может быть  $m$ ) и  $n_i$  (различных величин  $n_i$  также может быть  $m$ ). Естественно, что все значения  $m, k_i$  и  $n_i$  меньше  $N$ . В зависимости от значений этих переменных  $W_i$  может изменяться. Однако в целом, несмотря на разброс значений  $W_i$ , его величина при переходе снизу вверх от уровня к уровню имеет тенденцию к уменьшению, так как  $N$  больше каждого из значений  $m, k_i, n_i$ . Для убедительности приведём числовые примеры при  $N = 16$ .

Первый вариант, приведённый в левой части табл. 2, соответствует процессу отбора, показанному на рис. 5. Из него видно, что если из исходных 16 фрагментов мы сначала соберём блоки по два фрагмента, то для выбора нужных восьми сборок на второй уровень нам потребуется перебрать 240 вариантов. Для того чтобы затем



**Рис. 5.** Схема блочно-иерархического отбора вариантов объединения фрагментов. На первом иерархическом уровне находятся элементарные фрагменты. Самосборка переводит их на второй уровень. Внешняя среда подбирает из них фрагменты второго уровня, которые отвечают её условиям, а остальные отбраковываются (на схеме они перечёркнуты). Далее этот процесс повторяется на последующих уровнях. Показаны четыре уровня самосборки и пять уровней отбора.

**Таблица 2.** Зависимость  $W_i$  от длины сборки из фрагментов  $n_i$  на  $i$ -м уровне

$m = 4$						$m = 4$					
$N$	16	$n_1$	2	$W_1$	240	$N$	16	$n_1$	4	$W_1$	43680
$k_1$	8	$n_2$	4	$W_2$	1960	$k_1$	4	$n_2$	4	$W_2$	24
$k_2$	4	$n_3$	2	$W_3$	12	$k_2$	4	$n_2$	4	$W_2$	24
$k_3$	1	$n_4$	1	$W_4$	1	$k_3$	1	$n_4$	1	$W_4$	1
Всего					2213	Всего					43705

выбрать четыре необходимых варианта для третьего уровня потребует перебрать 1960 вариантов. Итого: общий перебор составит 2213 вариантов. Однако, если мы выберем другую начальную ситуацию и будем отбирать сразу на первом уровне блоки по четыре элемента, то того же результата мы достигнем при общем переборе 43705 вариантов. Становится ясно, что для экономии времени сборку желательно начинать со сборки малых блоков. Теперь рассмотрим, как время сборки будет зависеть от числа уровней  $m$ . При четырёх уровнях, в зависимости от стратегии сборки, время изменится от 2213τ до 43705τ, при трёх уровнях (табл. 3) оно возрастёт

Таблица 3. Зависимость  $W_i$  от числа иерархических уровней  $m$ 

$m = 3$						$m = 2$					
$N$	16	$n_1$	8	$W_1$	$1,6 \times 10^9$	$N$	16	$n_1$	16	$W_1$	$1,2 \times 10^{21}$
$k_1$	2	$n_2$	1	$W_2$	2	$k_1$	1	$n_2$	1	$W_2$	1
$k_2$	1	$n_2$	1	$W_2$	1						
Всего					$1,6 \times 10^9$	Всего					$1,2 \times 10^{21}$

до  $1,6 \times 10^9 \tau$ , а при двух уровнях (т.е. при полном переборе) станет фантастически большим:  $1,2 \times 10^{21} \tau$ .

Несмотря на случайный разброс величины  $W_i$ , обычно число переборов с переходом на каждый следующий уровень уменьшается, т.е.  $W_1 > W_2 > W_3 > \dots > W_m$ . Причина такого уменьшения состоит в том, что в этой цепи мы имеем такую последовательность переходов:

$$W_1 = A_N^{n_1} = \frac{N!}{(N-n_1)!} \rightarrow W_2 = A_{k_1}^{n_2} = \frac{k_1!}{(k_1-n_2)!} \rightarrow W_3 = A_{k_2}^{n_3} = \frac{k_2!}{(k_2-n_3)!} \rightarrow \dots$$

$$W_m = A_{k_{m-1}}^{n_m} = \frac{k_{m-1}!}{(k_{m-1}-n_m)!}.$$

Если в этой последовательности  $N > k_1 > k_2 > \dots > k_{m-1}$  и  $n_1 > n_2 > n_3 > \dots > n_m$ , а  $N \gg n_1$ ,  $k_1 \gg n_2$ ,  $k_2 \gg n_3$ , ...,  $k_{m-1} \gg n_m$ , то каждый следующий перебор за редким исключением меньше предыдущего.

Из этих  $k_{i-1}^{n_i} \exp(-n_i)$  блоков на следующий,  $(i+1)$ -й, уровень будут отобраны и пропущены  $k_i$  вариантов сборок предыдущего уровня. Остальные варианты окажутся забракованными и отброшенными. Эти  $k_i$  вариантов случайной комбинацией объединяются в блоки следующего  $i$ -го, более высокого иерархического уровня. Часть блоков, прошедшая проверку на правильность сборки последовательности фрагментов, переходит на следующий уровень и т.д. В результате, если использовать формулу Стирлинга, получим:

$$W_{\text{БИО}} = \sum_i^m W_i = \sum_i^m \frac{k_i!}{(k_i-n_i)!} =$$

$$= \sum_i^m \frac{k_i^{k_i}}{(k_i-n_i)^{(k_i-n_i)}} \exp(-n_i).$$

Примем, что время сборок и отбора одного варианта на всех уровнях приблизительно одинаково, т.е.  $\tau_1 \approx \tau_2 \approx \dots \approx \tau_i \approx \dots \approx \tau_m$ . При этом выигрыш во времени  $\alpha$  при замене полного перебора (ПП) перебором по правилу БИО выражается в виде

$$\alpha = \frac{W_{\text{ПП}}}{W_{\text{БИО}}} = \frac{N^N}{\exp N} \left[ \sum_i^m \frac{k_i^{k_i}}{(k_i-n_i)^{(k_i-n_i)}} \exp(-n_i) \right]^{-1},$$

или

$$\ln \alpha = N(\ln N - 1) - \ln \sum_i^m \frac{k_i^{k_i}}{(k_i-n_i)^{(k_i-n_i)}} \exp(-n_i).$$

В последнем выражении второе слагаемое всегда много меньше первого, поэтому  $\ln \alpha \approx N(\ln N - 1)$ . В этом легко убедиться, вернувшись к численным примерам, приведенным в табл. 2 и 3. При  $N = 16$ , если использовать упрощенную формулу Стирлинга, слагаемое  $N(\ln N - 1) = 28,36$  (см. табл. 3, вариант второй). Если

второе слагаемое при  $m = 4$ ,  $n_1 = 2$ ,  $n_2 = 4$ ,  $n_3 = 2$ ,  $n_4 = 1$ ,  $N = 16$ ,  $k_1 = 8$ ,  $k_2 = 4$ ,  $k_3 = 1$  (см. табл. 2, вариант первый) определить по той же формуле Стирлинга, то получим

$$\sum_i^m \frac{k_i^{k_i}}{(k_i-n_i)^{(k_i-n_i)}} \exp(-n_i) = \frac{16^{16}}{14^{14}} \exp(-2) +$$

$$+ \frac{8^8}{4^4} \exp(-4) + \frac{4^4}{2^2} \exp(-2) + \frac{1^1}{1^0} \exp(-0) =$$

$$= 223,7 + 1200 + 8,66 + 1 = 1433,36.$$

Логарифм этого числа 7,26. Однако этот результат будет заниженным, поскольку для всех  $n_i$  имеем  $n_i < 10$ , при этом упрощенная формула Стирлинга даёт ошибку. Вычисление по формулам комбинаторики  $A_N^{n_1} = N!/(N-n_1)!$ ,  $A_{k_1}^{n_2} = k_1!/(k_1-n_2)!$  даст более точное значение этой суммы. Она увеличится и станет равной 2213 (см. табл. 2, вариант первый). Таким образом, как бы мы не вычисляли значение  $\sum_{i=1}^m W_i$  и величину его логарифма, вывод остаётся однозначным:  $N(\ln N - 1) \gg \ln \sum_{i=1}^m W_i$ . Для данного числового примера  $28,3 > 7-10$ , т.е. временной выигрыш составляет 18–20 порядков. При увеличении количества блоков выигрыш будет ещё больше. Выигрыш во времени при сборке с блочно-иерархической организацией по сравнению со сборкой при полном переборе даёт величину порядка  $\ln \alpha \approx N(\ln N - 1)$ . Здесь  $\alpha$  — величина выигрыша,  $N$  — исходное число первоначальных фрагментов. Таким образом, утверждение Ф. Хойла и Н.Ч. Викрамасингха о дефиците времени не имеет оснований.

### 3.7. Парадокс гомохирального строения

Хиральность — это понятие, характеризующее парность левых и правых объектов в Природе. Зеркально парные химические и биологические объекты называют хиральными (от греч. *χειρ* — рука). Со времён Пастера известно [145, 146], что многие органические соединения, имеющие одинаковый набор атомов, но различную зеркальную симметрию, обладают разным запахом, вкусом и биовоздействием. Живая природа построена на основе веществ с определённой формой, а другая зеркальная форма, возникающая при искусственном синтезе, не используется живым как строительный материал.

Аминокислоты, которые входят в состав функциональных белков всех организмов, — это только L-аминокислоты (L — от лат. *laevus* — левый). Таким образом, белок — это полимерная цепочка, созданная только из L-аминокислот. Хотя короткие полипептиды с D-аминокислотами (D — от лат. *dexter* — правый) существуют, например, нейропептиды, но это не структурные, а сигнальные белки. Некоторые известные нам ферменты состоят более чем из 100 аминокислот, и все они находятся в L-форме, т.е. поворачивают плоскость поляризации света в одном направлении. Организмы используют D-аминокислоту для информационных

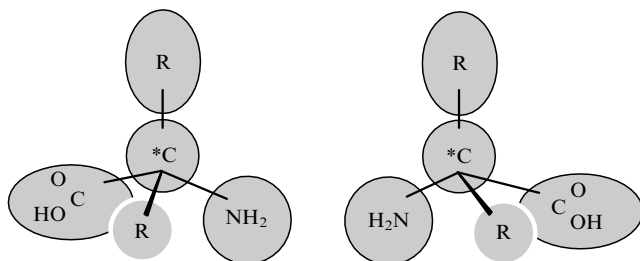


Рис. 6. Пример молекул аминокислоты тетраэдрической формы, в которой атом углерода связан с четырьмя разными группами, имеющими разную симметрию: L- и D-формы [9]. Звёздочкой отмечен атом углерода, расположенный в центре зеркальной симметрии.

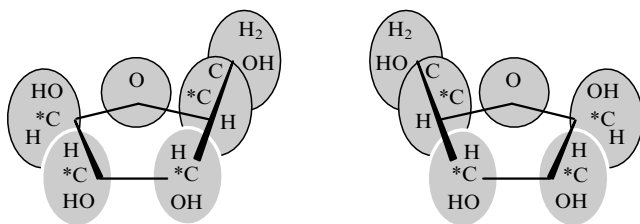


Рис. 7. Пример L- и D-формы биологически важной молекулы — рибозы, из которой образуется сахарный остов макромолекул РНК и ДНК.

функций. На рисунках 6 и 7 приведены два примера хиральных соединений.

Поразительным является тот факт, что в РНК и ДНК при формировании остова используются только D-сахара. Конечно, наименования "левые" и "правые" условны. Это означает, что у каждой из этих групп есть зеркальные антиподы. Если бы существовали D-аминокислоты и хотя бы одна из них включилась в активный центр фермента, построенного из L-аминокислот, то последний перестал бы функционировать. Так возник *парадокс гомохирального строения* (парадокс 7).

Можно допустить, что в результате каких-то случайных причин возник асимметричный мир живого, а далее эта асимметрия поддерживалась и усиливалась за счёт репликации кода и размножения, что и привело к гомохиральности живого в целом. Если представить себе такую логику событий, то нужно задать вопрос:

**Парадокс 7**

Одновременная сборка полимеров из смеси молекул L- и D-формы невозможна. Рисунок в виде схемы демонстрирует причину прекращения сборки при наличии смеси из двух изомеров, L и D (а). Сборка длинного линейного полимера в смеси L и D прекращается, так как L может соединяться только с L, а D — только с D. Левое с правым не стыкуется (б). Только L (или D) могут образовывать полимерные цепи любой длины (в). Гомохиральность даёт основания утверждать, что наряду с общим генетическим кодом для всего живого, являющимся инвариантом жизни на нашей планете, имеет место и другой инвариант — гомохиральность. *Каким же образом в мире, который характеризуется симметричными процессами, могла появиться гомохиральность?*

каков был первичный механизм нарушения зеркальной симметрии в ходе истории естественных добиологических природных процессов? Ещё до Пастера было показано, что кристаллы с левым и правым скосом имеют разные знаки оптической поляризации — левый или правый. Если бы химические превращения минералов, обеспечивающие энергией реакционные циклы на заре эволюции, отдавали предпочтение только одной изомерной форме вещества  $A_L$ , то в соответствующей конфигурации находился бы также продукт этого превращения — вещество  $B_L$  — и все другие участники циклов. Тип конфигурации приобретает значение тогда, когда малые оптически активные молекулы начинают соединяться друг с другом с образованием линейных или циклических полимеров.

Самопроизвольный распад симметричной смеси в результате кристаллизации в L- и D-кристаллы, которые первоначально присутствуют в равном количестве, сам по себе не должен приводить к нарушению симметрии. Если эксперимент кристаллизации повторить  $N$  раз, то в среднем количество полученных гомохиральных как L-кристаллов, так и D-кристаллов будет одинаковым, т.е. в большой выборке хиральность восстанавливается. Следовательно, гомохиральность живого — это случайность, связанная с начальными условиями отбора. Эти эксперименты неоднократно проводились на нескольких тысячах кристаллов. Получалось примерно равновероятное распределение тех и других. Другими словами, было обнаружено дискретное спонтанное, но равновероятное за большой отрезок времени проявление видов хиральности, т.е. в определённом малом объёме спонтанно с равной вероятностью образовывались оба вида гомохиральных соединений.

Если этот процесс развернуть не только во времени, но и в пространстве, то в разных участках маточной химической среды будут спонтанно возникать и эволюционировать гомохиральные структуры. Этот процесс подобен процессу образования спиральных автоволновых структур, наблюдаемых в реакции Белоусова — Жаботинского. Автоволны в этой реакции, разрываясь на препятствиях, порождают спиральные структуры с разной закруткой, L и D, но они возникают парами. Глобально в границах этого ареала симметрия не нарушается, а нарушается лишь в выделенной небольшой области внутри ареала.

Можем ли мы эту аналогию использовать для объяснения возникновения гомохиральности в достаточно сложных структурах, создавая, таким образом, гомохиральные последовательности в ДНК и РНК и гомохиральные полимерные цепи за определённое время в определённом месте?

Казалось бы, на основе самоорганизации можно выстроить достаточно длинные цепочки. Они самостоятельно сложились бы в структуры типа РНК или ДНК. Однако оказалось, что в случайном процессе критической по оценкам является длина порядка 30 единиц. Для биологической эволюции этого мало, так как 30 единиц не могут переносить достаточное количество информации. Чем длиннее цепь, тем больше возникает ошибок, и её сборка прекращается.

Причина появления ошибок проста. Для того чтобы собрать определённую последовательность, например только из левых молекул, из очень большого числа возможных последовательностей L- и D-молекул, кото-



рые могут спонтанно возникать в маточном растворе, необходимо отбирать только один вариант, L или D. Оказывается, что когда это число становится слишком большим, то вероятность ошибок возрастает (аналогично, если мы подбрасываем монетку  $N$  раз, то вероятность выпадения подряд только решки быстро уменьшается с увеличением  $N$ ). Следовательно, для того чтобы сохранить один вид, L или D, точность отбора должна непрерывно возрастать. В противном случае вследствие сбоев процесс сборки прекратится (часто в литературе это явление называют катастрофой ошибок Левинталя).

Для того чтобы точно отбирать, нужно проводить настройку процесса с помощью специфических структур, таких как белки-ферменты, т.е. так, как это осуществляется в ныне существующих биосистемах. Но если ферментов нет, то остаётся только один способ: *поддерживать среду настолько чистой, чтобы в ней был только один вид изомеров, из которых идёт самосборка, например L, а изомеров формы D должно быть очень мало, настолько мало, чтобы вероятность появления неправильного звена из них была бы небольшой.*

Другими словами, имеет место обменная операция: ферментная специфичность функций (увеличение точности отбора) заменяется чистотой состояния среды (удалением молекул с ненужной гомохиральностью). Возникает вопрос: а можно ли создать среду из гомохиральных фрагментов на первом этапе эволюционного процесса, для того чтобы на втором этапе в этой "чистой" среде осуществлять безферментную сборку длинных цепей? Если бы на начальном этапе эволюции имелся какой-то способ, который заменял бы ферментную регуляцию, то тогда было бы неважным, в какой среде осуществляется сборка, — в симметричной или в асимметричной.

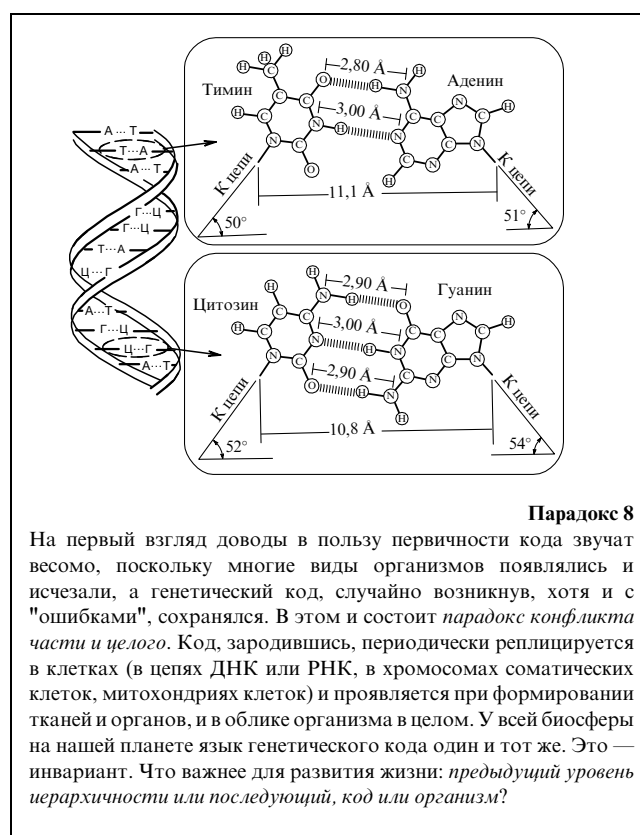
В конце концов остановились на том, что в условиях нелинейных реакций в сильнонеравновесных системах с критическим поведением нарушение устойчивости симметричного состояния может происходить почти спонтанно. Там, где зарождается неустойчивость, *слабое* воздействие влияет как *сильное*. Понятно, что в этих условиях система может выходить из равновесия под действием очень слабого толчка. Малые причины могут приводить к большим последствиям [9]. Это своеобразный фазовый переход в критической точке. Оценки должны были показать, какая нужна сила и сколько необходимо времени, чтобы это произошло (см. Санкт-Петербургский парадокс, раздел 3.9). Выяснилось, что множество вариантов отвечают этим условиям. Такими системами могут быть метеориты, изменение вращения магнитного поля, колебания температуры, т.е. нарушение поведения атмосферы или гидросферы Земли.

Проблема хиральности и способ спонтанного разделения — это не только чисто фундаментальная, но и практическая задача, например синтез хирально чистых наносоединений. Сегодня вся мировая фармакологическая промышленность переходит на хирально чистые лекарства. Это было инициировано известной историей, произошедшей в 70-х годах XX в. Тогда родилось несколько сотен детей с пороками развития костных тканей и отсутствием развитых конечностей — так называемой тюленьей болезнью. Причина состояла в том, что препарат одной из фармацевтических фирм, продаваемый как успокоительное и снотворное средство, содержал имид-талионилглутаминовую кислоту в

смешанном хиральном соединении. Раздельное испытание этих антиподов показало, что L-антипод вызывает уродства, тогда как D-антипод является безопасным. Пример с талидомидом свидетельствовал о том, насколько для биосистем важна гомохиральность.

### 3.8. Парадокс конфликта части и целого

В 1976 г. была опубликована книга Р. Докинза *Эгоистичный ген* [147], которая стала бестселлером и была переведена на 13 языков. Идея книги состояла в том, что генам приписывалась роль самостоятельных субъектов эволюции. Гены как бы используют живые организмы, для того чтобы сохраняться и размножаться. Можно ли рассматривать, двигаясь снизу вверх, последующий иерархический уровень как тару для сохранения предыдущего? Очевидно, что всё дело во взаиморегуляции в процессе влияния одного иерархического уровня на другой (парадокс 8).



Известно, что ошибки (мутации) при репликации кода часто приводят к сбою в работе клетки или организма в целом, что иногда убивает организм, а затем гибнут и клетки с нарушенным кодом, например раковые клетки. На другом иерархическом уровне также обнаружено эгоистичное влияние части на целое при инфицировании организма паразитами, которые изменяют поведение животного. Например, они делают уязвимым жвачное животное для нападения со стороны хищника, который должен в соответствии с жизненным циклом паразита стать следующим его носителем. Некоторые паразиты влияют на поведение своих промежуточных хозяев, проникая в их центральную нервную систему. Существует, например, болезнь *вертячка*, при которой больные жвачные животные, например овцы, ходят, пошатываясь, кругами и в конце концов отби-

ваются от стада. Вертячка вызывается проникновением в головной и спинной мозг животного личинки собачьего ленточного червя *Taenia multiceps*. Следующим хозяином гельминта становятся волки или дикие собаки, которые охотятся за отделившимися от стада животными. Паразиты не индуцируют каких-то новых типов поведения, а просто вызывают поведенческие реакции, которые препятствуют выживанию животного [148].

Хотя все живые организмы отмечены *сравнительно небольшой продолжительностью жизни*, они являются активными участниками эволюционного процесса. Если бы какое-то поколение организмов в самом начале биологической эволюции овладело искусством идеального, безошибочного воспроизведения кода и код существовал бы сам по себе, то эволюция прекратилась бы. Единственными хозяевами планеты остались бы эти праорганизмы, с безошибочной точностью воспроизводящие и передающие кодовое сообщение. Но при неблагоприятном изменении условий внешней среды они бы все одновременно и вымерли.

Это означает, что генетический код и его модификации путём отбора на предыдущих уровнях иерархии вписываются в последующие более высокие уровни иерархии как составляющие их и эволюционирующие фрагменты. Размножаясь, организм обеспечивает условия для того, чтобы нижний уровень, хотя и с некоторыми ошибками, сохранялся и воспроизводился в потомстве. Следовательно, биологическая эволюция существует в двух обликах: в образе недолговечных организмов и в виде кода, более долговечного, но небезотказного, так как он подвержен мутациям.

Математически такую ситуацию можно описать разными способами, например, ступенчатой функцией Хевисайда [149] или кронекеровскими  $\delta$ -функциями [150, 151]. Совокупность различных способов описания взаимодействия иерархических уровней и их критических состояний при изучении биосистем можно условно назвать наукой о кооперативной иерархической самоорганизации. Г. Хакен назвал её *синергетикой* [152]. Кооперация нижнего уровня создаёт высший уровень. "Мягкость" связей при кооперации не понижает, а повышает устойчивость организма как целого. Такой организм может адаптироваться к изменениям среды. Платой за недостаточно "жёсткие" связи служит возможность нижнего уровня иногда выходить из-под контроля верхнего, что может привести к гибели всей системы.

### 3.9. Санкт-Петербургский парадокс

Дарвин предполагал [2], что движущей силой эволюции является наследственность, изменчивость и отбор. Однако отбор не может быть движущей силой. Отбор может происходить только из того, что уже существует, и тем самым уменьшать разнообразие существующего. Отбор — это операция *редукции*. Если и происходит редукция некоторых свойств организмов, то это имеет место только в рамках уже возникшей системы, в которую эти организмы входят как составляющие элементы. Термин "изменчивость" у Дарвина плохо определён, его следовало бы заменить термином "самоусложнение". Но как реализуется механизм самоусложнения?

Для того чтобы приумножать разнообразие, должна существовать движущая сила, направляющая процесс усложнения живого. Таким образом, мы переходим к главному разделу этого обзора, констатируя, что живое

обладает тенденцией к усложнению и расширению зоны своего существования. Другими словами, необходимо показать, как из случайного симметричного хаотического процесса возникает направленный процесс. Как уже отмечалось, дело здесь не столько в термодинамике системы в целом (в интегральных её показателях), сколько в кинетике её отдельных субъектов.

Допустим, что мы наблюдаем за некоторым процессом, например пространственным перемещением совокупности частиц  $x$ , и строим графики распределения вероятностей  $P(x)$  появления разных значений длин пробега за определённое время. При этом в результате интегрирования информация о перемещении каждой отдельной частицы теряется. После усреднения по интегральным графикам трудно сказать, что происходило внутри этого распределения.

Изначально проблема индивидуализации рассматривалась в терминах теории вероятности в связи с азартными играми, но она представляет собой наглядный пример многих важных аспектов появления временных шкал и фрактальности в биосистемах (как гомохиральности, так и самоусложнения), а также описывает механизм развития жизни. Поясним это утверждение.

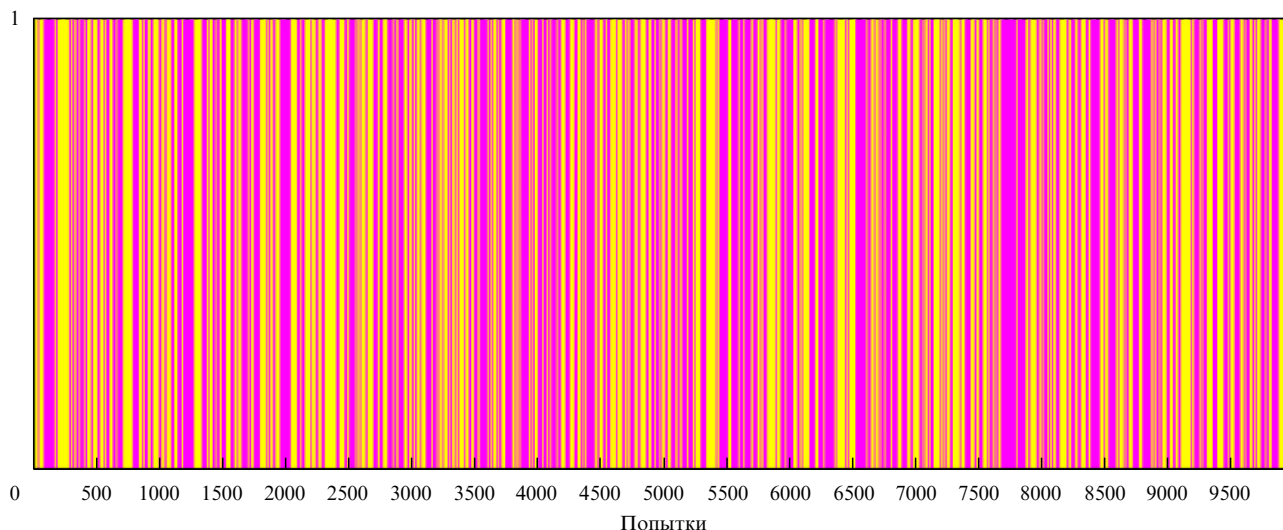
Если подбрасывать монетку  $N$  раз, то при большом  $N$  мы получим последовательность удач (выигрышей) и неудач (проигрышей) (рис. 8).

Как видно из чередования выигрышей и проигрышей, их распределение во времени носит случайный характер, но вместе с тем появляются кластеры полос с разной шириной, в которых преобладают либо выигрыши, либо проигрыши. Теперь разобьём тот же интервал бросаний на более крупные интервалы — не на единичные, а, например, объединяя последовательности бросков в группы по 20, по 40 и т.д. Отметим те кластеры, в которых преобладали выигрыши, сделав их светлыми, а те, в которых преобладали проигрыши, выделим тёмным цветом (рис. 9).

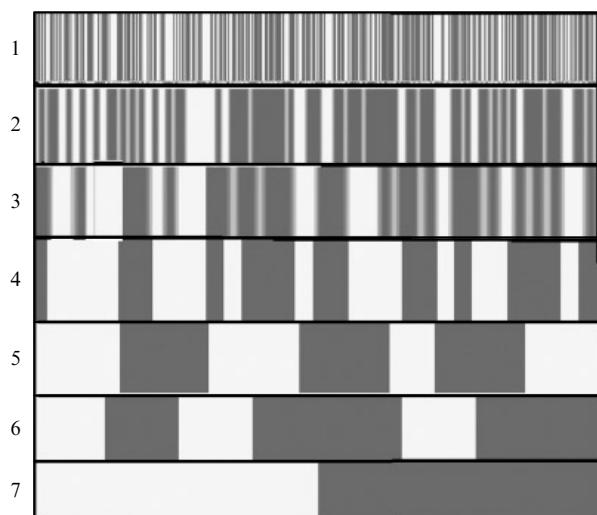
За бесконечный интервал времени средние вероятности выигрыша  $p$  и проигрыша  $q$  одинаковы, процесс — симметричный и  $p = q = 0,5$ . Вопрос состоит в том, может ли играющий субъект каким-либо способом нарушить симметрию распределения в свою пользу? Если — да, то не использовала ли живая природа подобную стратегию в своём развитии?

В середине 1920-х годов П. Леви задал вопрос: "При каких условиях распределение  $P(x)$  для суммы из  $N$  шагов  $X = X_1 + X_2 + \dots + X_N$  имеет такое же распределение, как и отдельные распределения  $P(x)$  на  $N$ -шаговой масштабной шкале?" Такой вопрос имеет прямое отношение к расщеплению процессов на фракталоподобные потоки, когда картина в целом выглядит как отдельные её части, но в другом масштабе. Стандартный ответ очевиден: сумма  $N$  гауссовых распределений будет также являться гауссовым распределением. Однако Леви показал, что этот ответ не единственный [153]. Другой ответ требует, чтобы второй момент распределения  $P(x)$  стремился к бесконечности, т.е.  $\langle x^2 \rangle \rightarrow \infty$ .

Задолго до Леви похожее явление в записках Санкт-Петербургской академии наук (начало XVIII в.) рассмотрел Даниил Бернулли. Парадокс вошёл в историю науки как Санкт-Петербургский парадокс о разорении игрока [154, 155]. Этот парадокс связан с возникновением набора временных шкал внутри случайного процесса, когда в нём начинает проявляться влияние предистории. В этом



**Рис. 8.** Последовательность выигрышей (например, орёл) и проигрышей (решка) при бросании монетки. Светлые полосы — выигрыши, а тёмные — проигрыши. По оси абсцисс отложено число бросаний (время), здесь  $N = 10000$ .



**Рис. 9.** Фракталоподобное строение объединений временных событий в случайном процессе в диапазоне от 1-й до 7-ми итераций. Светлым показаны интервалы, в которых в среднем преобладали выигрыши, тёмным — проигрыши. В среднем распределение выигрышей и проигрышей симметрично.

случае число выигрышей и проигрышей зависит от того, в какую полосу, светлую или тёмную, попал игрок (парадокс 9).

Казалось бы, что когда в очередной раз бросается монета, все предыдущие результаты игр забыты, игра начинается снова. Вероятности каждой новой игры не зависят от результата предыдущей. Это означает, что не существует стратегии, которая может гарантировать выигрыш одному из игроков и разорение другому. В соответствии с так называемой *теоремой о минимаксе* фон Неймана при оптимальной стратегии каждого из игроков в конечной игре с нулевой суммой выигрыши равны [156, 157]. Другими словами, если противопоставить случайности выпадения сторон монетки случайную стратегию угадывания орла или решки, то останешься при своих деньгах. Однако практика показывает, что, как правило, имеются выигравшие и проигравшие. Почему?

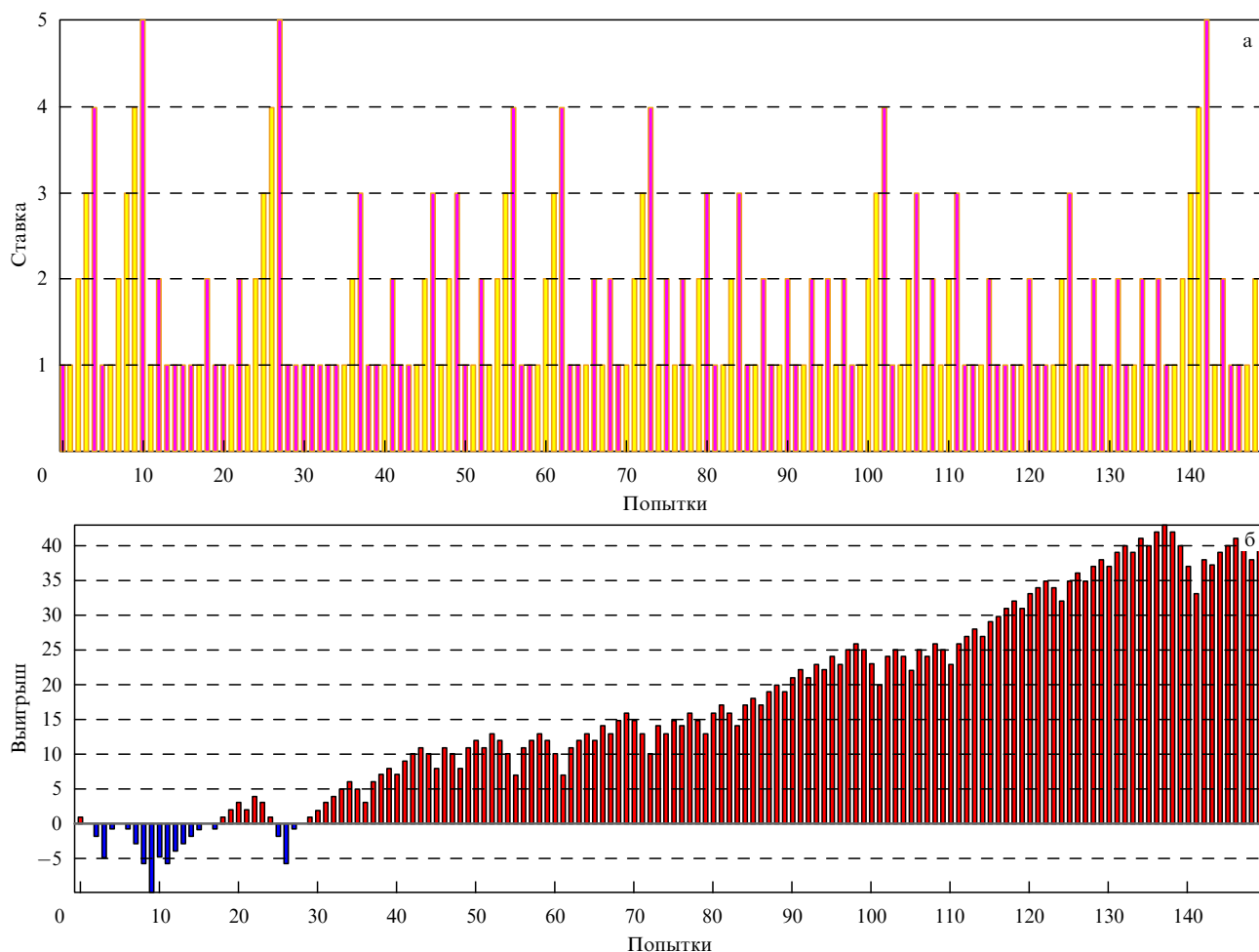


#### Парадокс 9

Вероятностная двоичная игра — это дискретный процесс, функция распределения выигрышей в котором возрастает (уменьшается) скачками лишь в счётном множестве точек окончаний раундов игры и остаётся постоянной между ними во временном интервале продолжительности самого раунда игры  $\tau$ . Дополнительная информация относительно предыдущего раунда не имеет значения для предсказания результатов последующего раунда, так как *время корреляции* или *память* определяются продолжительностью самого раунда, например временем вращения летящей монетки. В интервале  $\tau$  игрок не имеет возможности влиять на процесс игры. Если иметь "память" хотя бы на один раунд, то, возможно, должна существовать стратегия, приводящая к выигрышу путём увеличения *времени корреляции*. Так ли это?

В терминах биологической эволюции крупье — это внешняя среда, а сам игрок — это живая материя. Возьмём для примера игру с монеткой. Игрок не может влиять на результат подбрасывания монетки. Её бросает крупье. Тем не менее игрок может управлять процессом выигрышей и проигрышей в каждой игре, состоящей из  $N$  бросаний монетки, меняя ставку перед каждым очередным бросанием монетки в зависимости от результата предыдущего подбрасывания. Если игрок будет обладать *памятью* хотя бы на один раунд, запоминая выиграл он или проиграл в предыдущем раунде, то он может выбрать стратегию изменения ставки при следующем бросании монетки. Тогда события второго подбрасывания монетки в терминах ставки будут иметь другую цену. Независимые вероятности станут зависимыми. Цель стратегии — внести асимметрию в терминах ставок в первоначальное симметричное распределение проигрышей и выигрышей. Если игрок выигрывает при первом бросании монетки (например, при выпадении орла), то возможно, что он попал в полосу выигрышей и при этом он увеличивает ставку на выпадение орла (например, линейно в виде арифметической прогрессии

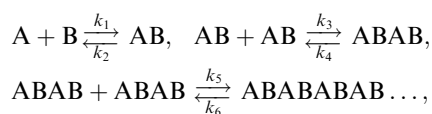
№ $n_i$	Вероятность появления кластера $p_i$	Увеличение ставки в области выигрыша по арифметической прогрессии			Увеличение ставки в области выигрыша по последовательности чисел Фибоначчи		
		Изменение ставки в полосе выигрышей $+b$	Изменение ставки в по- лосе проигрышей $-b$	Сумма выигрыша $+b - b = \Delta_i$	Изменение ставки в полосе выигрышей $+b$	Изменение ставки в полосе проигрышей $-b$	Сумма выигрыша $+b - b = \Delta_i$
0	1/2	1 или 1	-2 или -1	-1 - 0	1 или 1	-2 или -1	-1 - 0
1	1/4	1 + 2 = 3	-3 - 1 = -4	-1	1 + 2 = 3	-3 - 1 = -4	-1
2	1/8	1 + 2 + 3 = 6	-4 - 1 - 1 = -6	0	1 + 2 + 3 = 6	-4 - 1 - 1 = -6	0
3	1/16	1 + 2 + 3 + 4 = 10	-5 - 1 - 1 - 1 = -8	2	1 + 2 + 3 + 5 = 11	-8 - 1 - 1 - 1 = -11	0
4	1/32	1 + 2 + 3 + 4 + 5 = = 15	-6 - 1 - 1 - 1 - 1 = -10	5	1 + 2 + 3 + 5 + 8 = 19	-13 - 1 - 1 - 1 - 1 = = -17	2
5	1/64	1 + 2 + 3 + 4 + 5 + +6 = 21	-7 - 1 - 1 - 1 - 1 - -1 = -12	9	1 + 2 + 3 + 5 + 8 + +13 = 32	-21 - 1 - 1 - 1 - 1 - -1 = -26	6
6	1/128	1 + 2 + 3 + 4 + 5 + +6 + 7 = 28	-8 - 1 - 1 - 1 - 1 - -1 - 1 = -14	14	1 + 2 + 3 + 5 + 8 + +13 + 21 = 53	-34 - 1 - 1 - 1 - 1 - -1 - 1 = -40	13
7	1/256	1 + 2 + 3 + 4 + 5 + +6 + 7 + 8 = 36	-9 - 1 - 1 - 1 - 1 - -1 - 1 - 1 = -16	20	1 + 2 + 3 + 5 + 8 + +13 + 21 + 34 = 87	-55 - 1 - 1 - 1 - 1 - -1 - 1 - 1 = -62	25
8	1/512	1 + 2 + 3 + 4 + 5 + +6 + 7 + 8 + 9 = 45	-10 - 1 - 1 - 1 - 1 - -1 - 1 - 1 - 1 = -18	27	1 + 2 + 3 + 5 + 8 + 13 + +21 + 34 + 55 = 142	-89 - 1 - 1 - 1 - 1 - -1 - 1 - 1 - 1 = -97	45
9	1/1024	1 + 2 + 3 + 4 + 5 + +6 + 7 + 8 + 9 + +10 = 45	-11 - 1 - 1 - 1 - 1 - -1 - 1 - 1 - 1 - 1 = -20	35	1 + 2 + 3 + 5 + 8 + +13 + 21 + 34 + 55 + +89 = 231	-144 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - -1 - 1 - 1 - 1 = -153	78
10	1/2048	1 + 2 + 3 + 4 + 5 + +6 + 7 + 8 + 9 + 10 + +11 = 66	-12 - 1 - 1 - 1 - 1 - -1 - 1 - 1 - 1 - 1 - -1 = -22	44	1 + 2 + 3 + 5 + 8 + +13 + 21 + 34 + 55 + +89 + 144 = 375	-233 - 1 - 1 - 1 - 1 - -1 - 1 - 1 - 1 - 1 - -1 = -243	132



**Рис. 10.** (а) В полосе выигрышей ставка увеличивается линейно, в полосе проигрышей находится на нижнем уровне и не изменяется. (б) Сумма проигрышей (столбцы, отложенные вниз по оси ординат) и выигрышей (столбцы, отложенные вверх по оси ординат). По оси абсцисс отложены раунды бросания монетки, т.е. время  $nt$ . Общее число бросаний в данном случае  $N = 150$ .

раундов продолжительностью соответственно в 100, 1000, 10000 и 100000 бросаний монетки. Нами в имитационном компьютерном эксперименте было проведено порядка  $10^7$  испытаний ("бросаний монетки").

Таким образом, можно сделать вывод, что величайшей находкой природы было появление *примитивной памяти*, хотя бы на один цикл изменения внешней среды. Эта находка сразу разделила всю природу на живую и неживую. У её части (которую называют живой материей) появилась возможность прогнозировать (пусть и не совсем точно) изменение среды своего существования. Какой могла быть эта примитивная память? Генетический код — это память, направленная на масштабирование игры, но этот вариант — не единственный. Любая последовательная химическая реакция также обладает памятью:

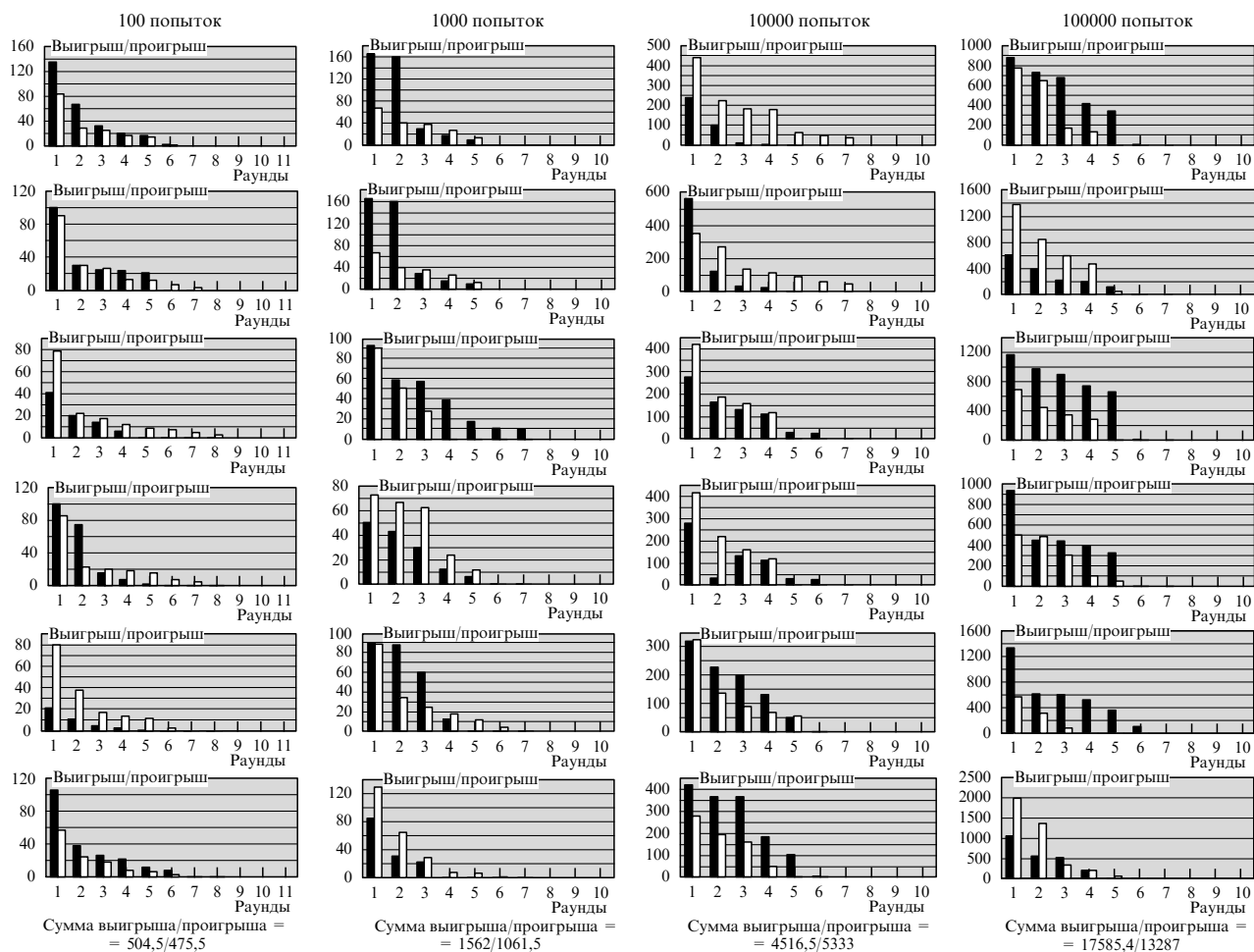


где  $A$  и  $B$  — субстраты,  $AB$  — продукт первого цикла. Для следующего цикла  $AB$  и  $AB$  — субстраты, а  $ABAB$  — продукт и т.д.,  $k_1, k_2, \dots$  — химические константы прямого и обратного путей реакции. Значения  $k_i$  в реальных условиях могут меняться при изменении физи-

ческих условий среды (температуры, кислотности, электрических или магнитных полей), нарушая равновесие прямого и обратного хода реакций. Чем больше протяжённость химического цикла во времени, т.е. чем дальше успевает по этой цепи продвинуться образование продуктов при благоприятных условиях, тем меньше вероятность обратного пути реакции к исходным продуктам  $A$  и  $B$ . Это и есть *память* цикла химических реакций о прошлом.

Стратегия, направленная на достоверный выигрыш, требовала очень большого (в идеале бесконечного) времени на игру и, что особенно важно, очень большого капитала (энергии) или его притока во время игры и состояла в масштабировании игры  $nt$ , где  $n$  — число раундов в одной игре. При формировании живых систем было и то и другое: 4,5 млрд лет на эволюцию и приток энергии Солнца.

Усваивая энергию Солнца, живая частица могла, например, изменять свой гидродинамический радиус Стокса [158] и тем самым управлять вероятностью своего движения не только во времени, но и в пространстве при поиске комфортных зон. При  $p > q$  вероятность проиграть, т.е. вернуться в нуль, будет стремиться к нулю. Другими словами, попав в область выигрышей, частица (примитивная живая система) могла оставаться там долго [155].



**Рис. 11.** Гистограммы выигрышей и проигрышей. Чёрные столбцы — проигрыши, белые — выигрыши. Внизу под каждой серией испытаний приведено отношение сумм проигрыша/выигрыша. Хотя в некоторых играх можно проиграть, но выигрыши преобладают, по крайней мере, в трёх из четырёх случаев.

В 1999 г. был сформулирован ещё один, похожий на рассмотренный выше, математический парадокс Паррондо [159, 160]. В 2009 г. двумя исследователями, М. Макдонниеллем и Д. Эбботтом, была предложена на основе этого парадокса стратегия выигрыша в игре с двумя конвертами [161].

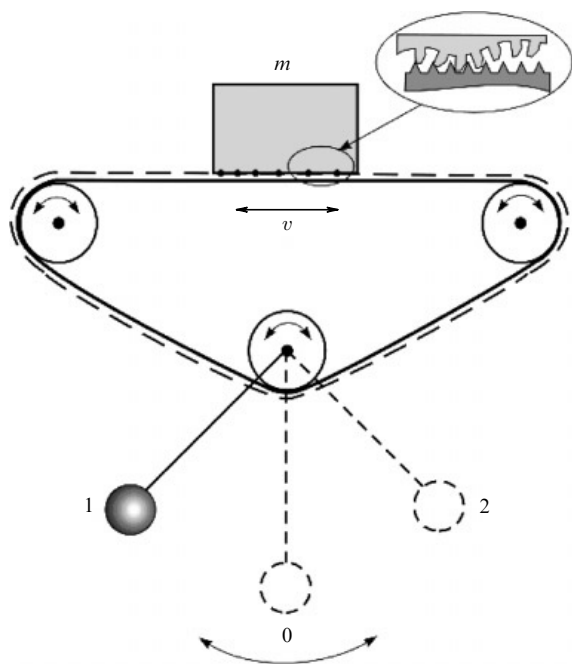
Суть игры предполагала наличие двух конвертов с деньгами (взвешивать, ощупывать и просвечивать их нельзя). Известно только то, что в одном из конвертов содержится сумма вдвое большая, чем в другом, но в каком и какая именно сумма — неизвестно. Разрешается открыть один из конвертов. После чего можно или взять себе этот конверт, или обменять его на другой. Можно менять конверты случайным образом или по какому-то закону. Как поступить, чтобы за  $N$  раундов выиграть максимальную сумму?

Стратегия, которая ведёт к максимальному выигрышу, состоит в том, что нужно менять или не менять конверты в каждом раунде с вероятностью, которая зависит от суммы, увиденной в выбранном конверте. То есть, чем меньше сумма в конверте, тем с большей вероятностью следует сменить конверт, и наоборот, большая сумма в открытом конверте говорит о том, что, скорее, следует оставить себе этот конверт. Парадокс состоит в том, что увиденная сумма ничего не сообщает о намерениях крупье (который раскладывает деньги), по-

скольку игрок не знает, в каком вообще диапазоне раскладывает деньги крупье. Разрешение этого парадокса основано, так же как и в Санкт-Петербургском парадоксе, на нарушении симметрии в игре в пользу игрока [161].

На первый взгляд может показаться, что в приложении Санкт-Петербургского парадокса к реальным процессам происходит нарушение законов сохранения импульса силы или энергии. Это не так. Энергия берётся из внешней среды, а направленность движения создаётся тем, что возникает асимметрия, вносимая игроком. Поясним механизм этого явления с помощью механической модели, которую можно назвать *линейным колеблющимся транспортёром с храповиками*. Рисунок 12 иллюстрирует схему такого устройства. Груз массой  $m$  лежит на ленте транспортёра. Лента транспортёра приводится в движение силой колебаний гармонического массивного маятника (рис. 12а). Эта сила сдвигает транспортёр на равные расстояния то влево, то вправо. Масса маятника  $M$  много больше массы груза  $m$ . Аналогом маятника в этой модели является внешняя среда, а аналогом живых систем — груз.

Лента транспортёра имеет *симметричные* зубцы. На нижней стороне груза также имеются зубцы, но *асимметричные* (рис. 12б, схема в овале). Транспортёр движется со скоростью  $v$ , периодически изменяя направ-



**Рис. 12.** Линейный колеблющийся транспортёр с храповиками и маятниковым управлением: схема устройства с маятниковым управлением движения; на вставке — увеличенная часть фрагмента схемы (в овале), иллюстрирующая зубчатое зацепление груза с лентой транспортёра. Силы сцепления груза (аналог живой материи) с лентой транспортёра при его движении влево и вправо различаются. В результате груз будет перемещаться только вправо. Движущей силой здесь является энергия маятника (т.е. внешней среды). Из-за расхода энергии на трение маятник в конце концов остановится, но если есть толкающая маятник сила, то движение груза будет продолжаться до тех пор, пока подкачивается энергия извне.

ления движения под действием маятника. Вследствие асимметрии зубьев деформация груза при движении транспортёра вправо и влево различна. По закону Гука сила  $F$ , толкающая груз, будет вызывать упругую деформацию зубьев:

$$F = \gamma \frac{\Delta L}{L},$$

где  $L$  — длина груза,  $\Delta L$  — его укорочение,  $\gamma$  — коэффициент,  $\gamma = ES$ , здесь  $E$  — модуль Юнга,  $S$  — поперечное сечение зубьев. Зубья груза стремятся рас-

прямиться, упираясь в зубья транспортёра, и обеспечивают перемещение груза. Выражение для закона Гука можно преобразовать как

$$F = \gamma \left( 1 - \frac{a}{L} \right),$$

так как  $\Delta L = L - a$ , где  $a$  — длина хорды (рис. 13а).

Длину хорды  $a$  можно выразить через радиус искривления  $R$  и центральный угол  $\beta$ :  $a = 2R \sin \beta/2$ . Если груз достаточно упругий, то его деформация будет незначительной и  $\sin \beta/2$  можно заменить углом  $\beta/2$ . В результате получим

$$F = \gamma \left( 1 - \frac{R\beta}{L} \right).$$

Примем, что жёсткость транспортёра велика (сам он не прогибается) и трение в его подшипниках бесконечно мало. Главное обстоятельство состоит в том, что радиусы прогибов самого груза при смене направления его движения не равны,  $R_1 \neq R_2$  (рис. 13б, в). Из последнего приведённого выше выражения для силы вытекает, что в том направлении вектора силы, в котором изгиб груза будет больше (радиус  $R$  меньше), и будет осуществляться преимущественное перемещение груза. Поскольку при движении транспортёра вправо при зацеплении зубьев груза и транспортёра груз прогнётся сильнее, т.е.  $R_1 < R_2$ , отсюда получим:

$$\vec{F} = \gamma \left( 1 - \frac{R_1 \beta_1}{L} \right), \quad \vec{F} = m \frac{d\vec{v}_1}{dt},$$

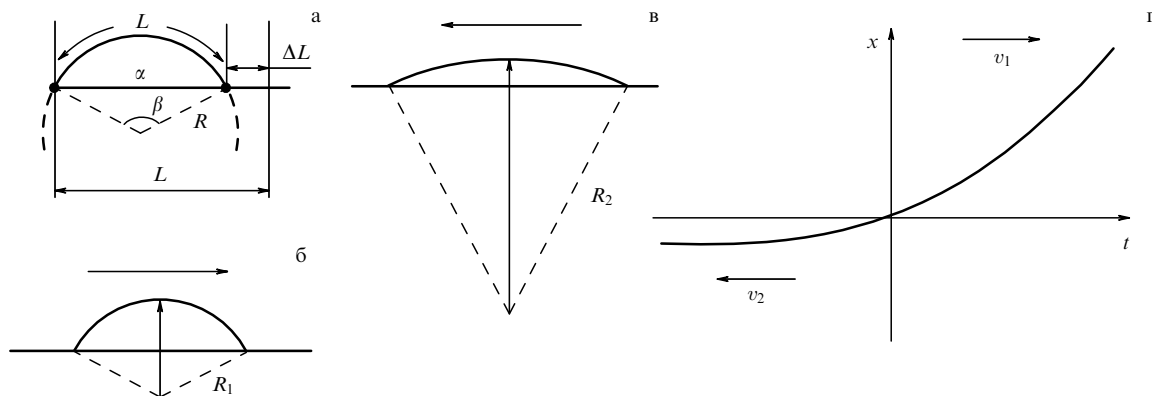
$$\vec{F} = \gamma \left( 1 - \frac{R_2 \beta_2}{L} \right), \quad \vec{F} = m \frac{d\vec{v}_2}{dt}.$$

Из этих выражений, интегрируя, можно определить перемещение груза соответственно вправо и влево:

$$\vec{x}_1 = \frac{\gamma}{m} t^2 \left( 1 - \frac{R_1 \beta_1}{L} \right), \quad \vec{x}_2 = \frac{\gamma}{m} t^2 \left( 1 - \frac{R_2 \beta_2}{L} \right).$$

На рисунке 13г показан график зависимости смещения груза во времени при изменении направления вектора скорости. Из графика видно, что процесс увеличения длины перемещения груза асимметричен во времени.

Макросистемы с переменным трением, зависящим от направления, известны давно. Некоторые северные народы много веков назад использовали для покрытия поверхности лыж шкуру животных с коротким ворсом, располагая её на поверхности лыжи так, чтобы при



**Рис. 13.** Схема изгиба груза при его зацеплении с движущимся транспортёром (а), прогиб груза при движении транспортёра вправо (б) и влево (в), а также (г) зависимость перемещения груза  $x$  во времени  $t$  при изменении направления скорости транспортёра  $v$ . (См. пояснения в тексте.)

движении вперёд ворс шкуры прижимался к лыже, а движение назад осуществлялось против прилегания ворса. Такое расположение ворса способствовало отталиванию от поверхности снега, так как лыжи могли скользить только в одну сторону. Это обеспечивало быстрое перемещение лыжника. Сегодня эти идеи на молекулярном уровне используются при конструировании нанотранспортёров.

Если перемещение груза за каждый период маятника фиксируется, то эта фиксация представляет собой *память*. Груз начинает следующий шаг в новом цикле от уже достигнутого в предыдущем цикле движения маятника. Ещё одно полезное замечание: нетрудно заметить, что *колеблющимся транспортёром с храповиками являются часы с линейным циферблатом*, поскольку расстояние, на которое переместится груз, связано с количеством циклов колебаний маятника. В живой природе имеется много систем, работающих по принципу колеблющегося транспортёра с грузом, например фибриллярный белок или цепь ДНК представляют собой транспортёр, по которому движется фермент (груз). Такие системы демонстрируют периодичность и пространственную асимметрию, задаваемую генетической природой их структуры (подробнее см. в разделе 3.10).

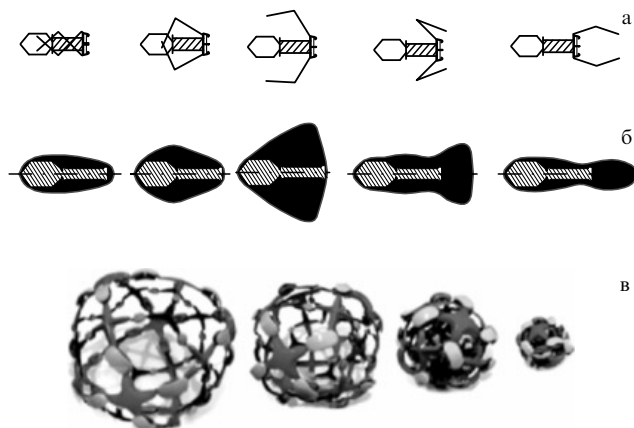
В приложении к биологическим системам это же явление можно описать и другими способами, например [162, 163]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f(u, v) + D_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + h_1 \frac{\partial}{\partial x} \left( Q_1(u, v) \frac{\partial v}{\partial x} \right),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = g(u, v) + D_2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + h_2 \frac{\partial}{\partial x} \left( Q_2(u, v) \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

Здесь  $u$  — перемещение живой системы (груза),  $v$  — перемещение самой среды (транспортёра). При  $h_1 = h_2 = 0$  математическая модель представляет собой систему типа реакция–диффузия с коэффициентами диффузии  $D_1 \geq 0$ ,  $D_2 \geq 0$  (по крайней мере, один  $D_i \neq 0$ ). В случае, когда хотя бы один из коэффициентов  $h_i \neq 0$  (знак может быть любым), система является кроссдиффузионной. Линейной кроссдиффузии соответствует  $Q_i(u, v) = \text{const}$  для  $i = 1, 2$ , нелинейной кроссдиффузии —  $Q_i(u, v) \neq \text{const}$ , хотя бы для одного  $i$ . Третье слагаемое в первом уравнении в приложении к биологическим объектам описывает их древнейшее свойство: изменение во времени *таксиса*, т.е. реакции на градиенты во внешней среде. Очевидно, что для определения градиента, необходима *память*, хотя бы на один шаг движения. Эта система уравнений отличается от рассмотренного ранее примера с *колеблющимся транспортёром с храповиками* тем, что здесь свойства самого транспортёра (внешней среды) также изменяются. Такая система проявляет способность к спонтанному образованию и развитию разнообразных упорядоченных динамических структур. Интересно заметить, что в таких системах возникает любопытное явление, похожее на отрицательное трение, которое в физиологии носит название *отрицательной рефрактерности* [163].

Второе важное замечание: даже не обладая метаболизмом, частица может, например, в температурном или ионном градиенте изменять свой гидродинамический радиус и тем самым за счёт ударов соседних молекул превращать своё хаотическое движение в направленное




**Рис. 14.** Модели частиц, изменяющих свою конфигурацию в поле градиента, что позволяет им направленно двигаться к источнику градиента: (а) изменение геометрии бактериофага. Концевые длинные фибриллы бактериофага, раскрываясь при возрастании температуры или при взаимодействии с продуктами метаболизма бактерий, меняют гидродинамический профиль бактериофага как целого; (б) соответствующие гидродинамические профили бактериофага (выделены чёрным цветом); (в) модель изменения геометрии глобулярного полимера (вируса или белка). Изменение радиуса в поле градиента создает направленность движения [75].

по градиенту [168]. На рисунке 14 приведены два таких примера.

### 3.10. Парадокс буриданова осла

Что преобладает в биосистемах: детерминированность или случайность? Дискуссия на эту тему имеет давнюю историю и может быть проиллюстрирована последним из рассматриваемых здесь, широко известным парадоксом буриданова осла (парадокс 10).

Сегодня этот парадокс ничего кроме улыбки не вызывает. В его основе лежит неправильное утверждение о том, что живые системы являются "детерминированными автоматами" и не содержат хаотической компоненты, которая разрушает неопределённость выбора при равных вероятностях. Парадокс основан на утверждении о том, что  $p = q = 1/2$ , где  $p$  — вероятность выбрать первую кучу сена,  $q$  — вероятность выбрать вторую кучу сена. Однако любая случайная флуктуация  $\varepsilon$  нарушит



**Парадокс 10**

*Буриданов осёл* — парадокс, названный по имени Жана Буридана (французский философ XIV в.). Однако этот парадокс использовался ещё во времена Аристотеля, к работам которого Буридан писал комментарии. Суть парадокса состоит в том, что осёл, которому предоставлены два одинаковых угощения, не может логически сделать выбор, поскольку логика *абсолютного детерминизма* не даёт оснований предпочесть одну кучу сена другой. Следовательно, осёл, помещённый на равном расстоянии от двух одинаковых кучек сена, умрёт голодной смертью. В переносном смысле — это выбор между двумя равнозначными возможностями.



это равновесие, и тогда  $p = 1/2 - \varepsilon$ ,  $q = 1/2 + \varepsilon$ , т.е. осёл будет спасён.

В 2002 г. из журнала *Биофизика* нам на рецензию прислали статью под названием "Может ли организм отбирать новую информацию?", в которой утверждалось, что "опыт построения искусственных интеллектуальных систем показывает, что такие системы обучить невозможно, а можно лишь запрограммировать (приготовить). Машина не может писать программу сама себе". При этом делался вывод, что всё живое кем-либо каким-то образом запрограммировано. Эта работа была опубликована [164]. Пришлось в том же номере журнала [165] ответить автору, который, по-видимому, забыл, что существуют самообучающиеся нейрокompьютеры [7, 167].

Разрешение парадокса буриданова осла основано на конкуренции между детерминированностью и случайностью в процессах, происходящих как в центральной нервной системе существующих сегодня организмов, так и в эволюционном отборе организмов. На тему о том, как реализуется подобная конкуренция или как мыслит человек, в *УФН* было опубликовано несколько обзоров [7, 166, 167].

Здесь дадим ответ на вопрос, как могло возникнуть разнообразие существовавших и существующих видов живых организмов. В первом приближении все живые системы можно разделить на два больших множества. Первое множество — это примитивные, неприспособленные организмы с быстрым размножением, короткой продолжительностью жизни, хорошей приспособляемостью к внешним условиям на основе мутаций и последующим отбором внешней средой тех из них, у которых мутации были удачными. Эти организмы не умеют мыслить и адаптироваться к условиям среды на основе обучения. К ним относятся, например, вирусы, бактерии, насекомые и т.п. Второе множество — это сложные организмы с медленным размножением, большей продолжительностью жизни, с задатками интеллекта, позволяющего им адаптироваться к внешним условиям на основе обучения. Какая стратегия лучше для устойчивости существования видов? Краткий ответ: обе хороши, поскольку оба множества существуют одновременно на нашей планете. Но на вопрос о том, какое множество будет преобладать в будущем, ответить трудно. Финал будет зависеть от случайности (это будет продемонстрировано ниже на модели) [168].

Математическая формулировка такой модели может быть следующей. Имеется некоторое множество субъектов  $N$ , исходно разбитых на  $X$  групп по  $n_X$  субъектов в каждой. Каждую группу во множестве  $X$  будем называть градацией распределения, а число субъектов в каждой группе — амплитудой градации распределения (рис. 15).

Субъекты в каждой градации множества  $X$  обладают некоторой способностью к обучению. Неважно, как реализуется эта способность: только через мутации или только через интеллект. Распределение градаций находится в пределах от  $X_{\min}$  до  $X_{\max}$ , а число субъектов со свойством  $X$  равно амплитуде  $n_X$ . Для данной модели справедливо следующее выражение:  $N = \sum_{X_{\min}}^{X_{\max}} n_X = \text{const}$ . Размножение субъектов рассматривать не будем. Учёт "размножения" не изменит выводов, вытекающих из рассматриваемой модели. Для нашего случая важен лишь обмен носителями информации (элементами памяти). Субъекты при парном случайном взаимодействии имеют возможность случайным образом переме-

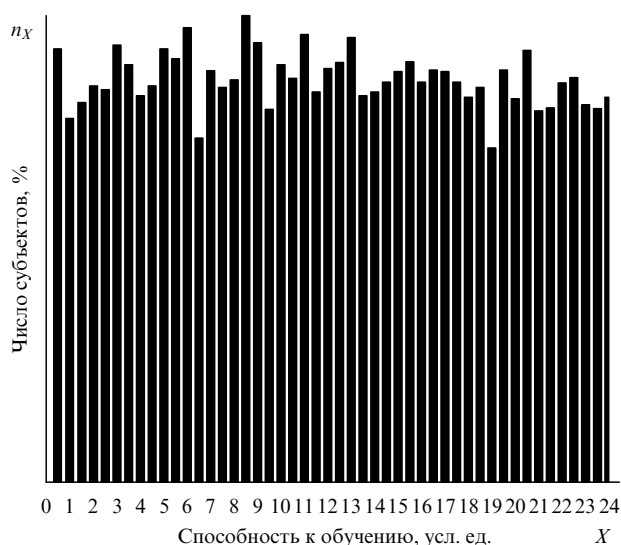


Рис. 15. Исходное распределение субъектов в осях  $X$  (способность к обучению) и  $n_X$  (число субъектов в списке  $N$  с соответствующей способностью к обучению). Количество градаций по оси  $X$  и исходное распределение амплитуд, соответствующее числу субъектов в этих градациях может быть любым. Здесь показано равномерное распределение (почти белый шум) при  $N = 10000$  и  $X_{\min} = 0$ ,  $X_{\max} = 24$ .

щаться из одной градации в другую, увеличивая или уменьшая своё свойство по данному признаку  $X$ . Правила взаимодействия признаков субъектов постулируются в зависимости от задачи моделирования. Для данного случая используем два простых взаимодействия.

1. В одних случаях при парной случайной встрече субъектов их признакам присваивается *высший ранг* из значений признаков двух встретившихся субъектов.

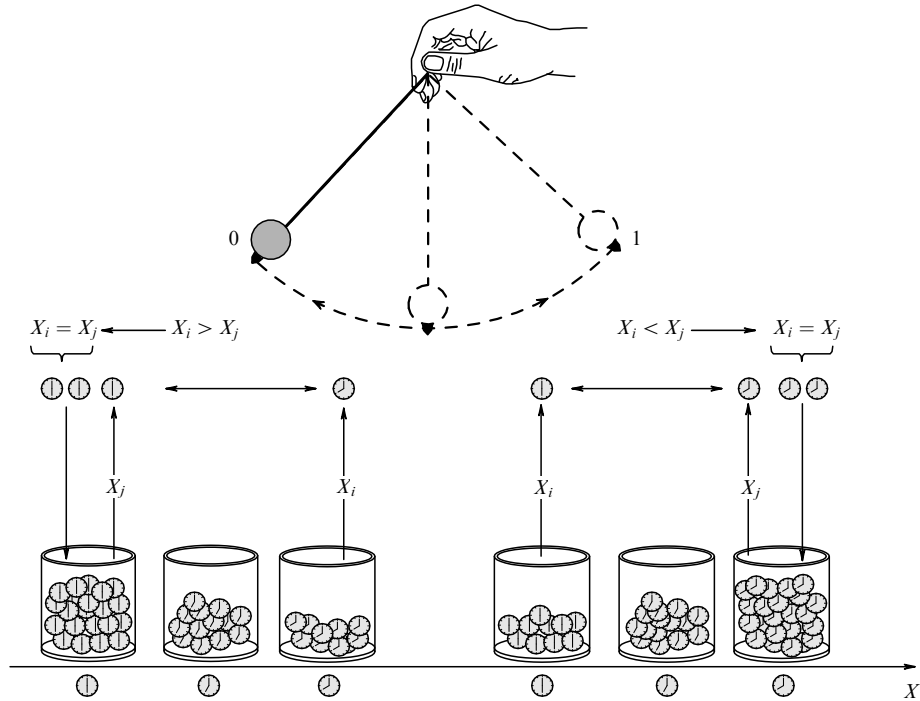
2. В других случаях при встрече субъектов показаниям их признаков присваивается *низший ранг* значения признаков двух встретившихся субъектов.

3. Правила пунктов 1 и 2 действует поочередно в некотором временном интервале.

Эта очередность определяется изменениями внешней среды (маятником) с периодом  $\chi$ .

В качестве признака способности к обучению возьмём, например, показание времени, необходимого для обучения субъекта. Другими словами, каждый субъект имеет признак, например часы, которые показывают время его индивидуальной жизни, возрастающее или уменьшающееся в результате обучения в интервале от 0 до 24 часов (или, что не важно, от 0 до 24 млн лет). Хотя это могут быть и любые другие признаки, например наборы любых атомных элементов, их комплексов или вообще любых соединений (нуклеотидов, аминокислот и т.п.). Маятник — это изменение внешней среды. Субъекты — это отдельные обучающиеся друг от друга при взаимодействии организмы. В простейшем случае обучение может происходить посредством горизонтального переноса генов или с помощью какого-то другого способа передачи информации от одного субъекта к другому (рис. 16).

При правиле 1 организмы усиливают свой признак  $X$ , при правиле 2 ослабляют его (теряют полезные признаки обучения, но увеличивают скорость размножения). Число всех возможных перемещений субъектов  $P$  в множестве  $N$  равно  $P = N!$ . Взаимодействие субъектов



**Рис. 16.** Схема кинетики процесса обучения. Выбор признаков определяется парой объектов, выбираемых случайным образом из любой градации  $X$ . Градации изображены в виде множеств субъектов с одинаковыми признаками. После встречи субъекты продолжают участвовать в дальнейших встречах, но уже с новым приобретённым рангом признака. Модель предполагает смену правил перекладывания субъектов из одного множества в другое в зависимости от приобретённого ими ранга признака. Правило, используемое в данный момент, зависит от положений маятника 0 (упрощение) или 1 (усложнение).

внутри каждой градации  $n_X$  не влияет на распределение признаков в системе в целом, поскольку свойства субъектов внутри группы (одной градации в гистограмме распределения) одинаковы. Количество разных групп-градаций равно  $X_{\max} - X_{\min}$ . В результате получим выражение для числа *бесполезных встреч*  $A$ , т.е. не изменяющих признаки популяции в целом. Для любого начального распределения справедливо выражение  $A = \sum_{X_{\min}}^{X_{\max}} (n_X!)$ . Если имеет место равномерное распределение типа белого шума, при котором амплитуды всех  $n_X$  градаций практически равны, то это выражение упрощается и принимает вид  $A = (X_{\max} - X_{\min}) n!$ . Обозначим  $\Delta X = X_{\max} - X_{\min}$ . Полезным или эффективным перебором, обеспечивающим усиление (правило 1) или ослабление (правило 2) свойства в множестве  $N$ , является перебор среди объектов, относящихся к разным группам. Таким образом, число *полезных встреч*  $B$ , изменяющих свойство системы:

$$B = P - A = N! - \sum_{X_{\min}}^{X_{\max}} (n_X!),$$

или

$$B = P - A = (N!) - \Delta X(n!).$$

Это выражение можно преобразовать в следующее:  $B = P - A = (\Delta X n!) - \Delta X(n!)$ . При этом вероятность появления *полезных встреч*  $p_{\text{useful}}$  для равномерного распределения типа белого шума выражается в виде

$$p_{\text{useful}} = 1 - \frac{\Delta X(n!)}{(\Delta X n!)},$$

а вероятность *бесполезных встреч*  $p_{\text{useless}}$  для него же — как

$$p_{\text{useless}} = \frac{\Delta X(n!)}{(\Delta X n!)}.$$

Из этих выражений видно, что при  $\Delta X = 1$  вероятность  $p_{\text{useful}} = 0$ , а  $p_{\text{useless}} = 1$ . Когда остаются в распределении только две градации с равным числом субъектов, т.е.  $n_1 = n_2 = N/2$ , то ситуация становится аналогичной предыдущей, поскольку

$$p_{\text{useful}} = 1 - \frac{\Delta X(n!)}{(\Delta X n!)} = 1 - \frac{2(N/2)!}{(2N/2)!} = 0,$$

$$p_{\text{useless}} = 1,$$

т.е. система переходит в длительный устойчивый колебательный режим или, другими словами, образуются два множества живых организмов — примитивные и сложные. Только случайные флуктуации могут вывести такую систему из колебательного равновесия. Однако такой расчёт даёт лишь вероятностные оценки стационарного состояния процесса и ничего не говорит о его кинетике. Характер переходного процесса можно выяснить с помощью имитационного компьютерного моделирования.

Здесь важны три временных параметра:  $T$  — интервал времени, необходимый для установления в системе единственного признака, т.е. одной градации (по правилу 1 или 2),  $\chi$  — период движения маятника,  $r = \tau_1/\tau_2$  — скважность этого периода, т.е. соотношение интервалов времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  в рамках периода  $\chi$ , отводимых соответственно на реализацию правила 1 или 2, при этом

$\chi = \tau_1 + \tau_2$ . Ситуации, в которых  $\chi \gg T$  либо  $\tau_1 \gg \tau_2$  или  $\tau_1 \gg \tau_2$ , т.е.  $r \rightarrow \infty$  или  $r \rightarrow 0$ , мало интересны. В этом случае колебательное управление маятника не будет оказывать особого влияния на процесс, происходящий с признаками организмов. Система в течение одного периода, в крайнем случае трёх периодов, успеет прийти к полной синхронизации, т.е. останется одна градация с амплитудой, равной  $N$ .

Интересным является случай, в котором  $\chi < T$ . При этом возникают конкурентные отношения при выборе общего признака для двух градаций. В случае  $\chi \leq T$ , а  $\tau_1 = \tau_2$ , т.е.  $r = 1$ , где  $\chi$  — период колебаний управляющего маятника, в результате моделирования обнаружено, что система действительно переходит в длительный колебательный режим с возникновением конкуренции между двумя равносильными градациями в распределении, изменение амплитуд которых синхронизируется с частотой маятника (рис. 17). При положении маятника 0 правая амплитуда уменьшается, а левая при этом возрастает на ту же величину, а при положении маятника 1 ситуация меняется на обратную.

Такой колебательный режим может продолжаться очень долго. Но поскольку в основе этой модели мы имеем случайный процесс встреч субъектов, то в конце концов случайно появляется асимметрия в конкурирующих градациях, что приведёт к финальному результату в виде одной градации, в данном случае либо правой 6, либо левой 23 (см. рис. 17), но предсказать результаты финала невозможно. Это дело случая.

Характер переходного процесса в компактной форме можно проиллюстрировать в виде графиков изменения

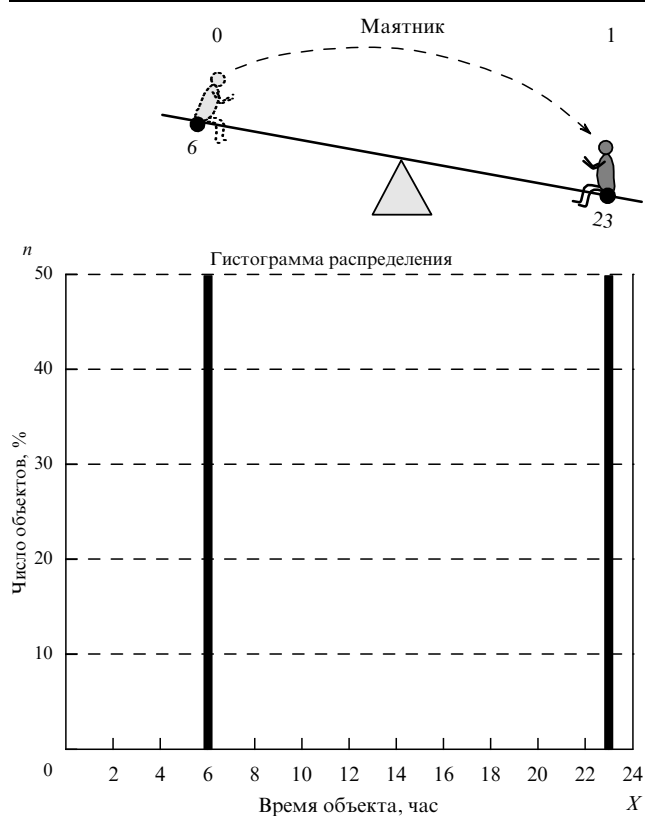


Рис. 17. Механизм возникновения сравнительно устойчивого режима в системе при появлении двух одинаковых амплитуд конкурирующих градаций, переводящих переходной процесс в длительный колебательный режим.

среднеквадратичного отклонения по всему ансамблю субъектов во времени  $t$ , используя полярные координаты. При этом радиус-вектор  $\rho$  является функцией времени  $t$  и имеет вид

$$\rho = \frac{1}{(X_{\max} - X_{\min})(vt)} \left[ \sum_{X_{\min}}^{X_{\max}} \sum_0^t (n_{ij} - \bar{n})^2 \right]^{1/2},$$

а угол  $\varphi$  изменяется по закону  $vt$ , где  $\bar{n}(t)$  — средняя величина градаций,  $v$  — частота встреч, в модели  $v = \text{const}$ . Другими словами, величина вектора  $\rho$  во времени в колебательном режиме уменьшается. При  $t \rightarrow \infty$  величина  $\rho \rightarrow 0$ , а угол вращения  $\varphi$  непрерывно изменяется в зависимости от времени от 0 до  $2\pi$ , т.е. вектор  $\rho$  вращается в этих пределах то в одну, то в другую сторону (рис. 18).

Исследование переходного процесса вскрыло его шесть особенностей:

1. Система с равномерным начальным распределением признаков имеет меньшее время установления единого признака (т.е. стягивания в одну градацию). Временной интервал, необходимый для установления единого признака при начальном распределении Гаусса, отличается на 35–40 % в большую сторону от интервала при начальном равномерном распределении. Это связано с тем, что при большом числе градаций в исходном распределении  $X$  вероятность *бесполезных встреч* уменьшается. Применительно к эволюционным процессам это означает, что равномерное накопление мутаций у всех организмов благоприятно сказывается на скорости отбора.

2. Существует зависимость времени установления не только от исходного среднеквадратичного отклонения и симметрии исходной кривой распределения, но и от локальных разбросов амплитуды градаций  $n_X$  и частоты движения управляющего маятника. Если в распределении асимметрия и локальные разбросы амплитуды градаций отсутствуют, то вероятность возникновения процесса с длительным переходным режимом возрастает. Чем выше разнообразие, тем дольше будет существовать система.

3. Большие амплитуды градаций в процессе смены правил поочередно могут отдавать градациям с малой амплитудой своё содержимое. Градация  $n_X$ , остающаяся в финале, не всегда соответствует максимальной ампли-

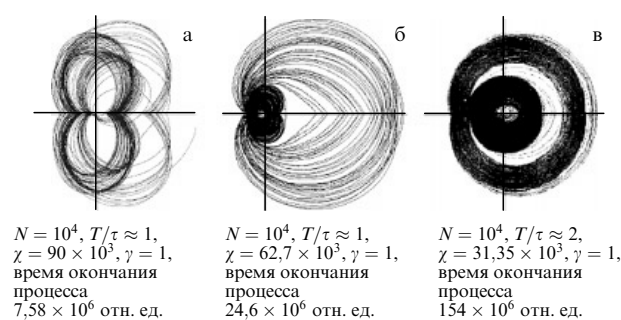


Рис. 18. Типичные формы изменения среднеквадратичного отклонения во времени в полярных координатах в переходном режиме: (а) для колоколообразного распределения (распределение Гаусса), (б, в) для равномерного распределения типа белого шума.  $N$  — число субъектов,  $\chi$  — период вращения маятника,  $r$  — скажность, т.е. отношение времени в рамках периода при правиле 1 и правиле 2.

туде градации исходного распределения, так как на "выживание" градации оказывает влияние локальное окружение. Часто процесс сходится к градации с небольшим исходным значением амплитуды  $n_x$ , если эта градация находится между градациями с большой амплитудой.

4. Изменение плотности расположения колец на графиках среднеквадратичного отклонения в полярных координатах свидетельствует о неравномерной сходимости к конечным результатам синхронизации в процессе переходного режима (см. рис. 18). Изменение плотности расположения колец является случайным и определяется вероятностными процессами встреч субъектов и второй производной распределения амплитуд градаций  $X$ , возникающих в процессе переходного процесса.

5. Время прихода системы с маятниковым управлением к какому-либо финалу (к градации) увеличивается на несколько порядков. Например, при  $N = 10000$  это время (в условных единицах) возрастает от  $63 \times 10^3$  (без маятникового управления) до  $144 \times 10^6$  (с маятниковым управлением).

6. Периодическая смена правил позволяет системе при кратных отношениях  $T/\chi$  и  $r = 1$  переходить в колебательный режим изменения амплитуды двух оставшихся градаций, создавая тем самым долговременные конкурентные отношения между ними.

Этот процесс характерен не только для эволюционного отбора. Он имеет место на всех иерархических уровнях реальных биосистем, начиная от макромолекул и кончая биоценозами, т.е. везде, где обнаруживается колебательный характер процессов с существенной хаотической компонентой. Подобные управляемые переходы с более высокого иерархического уровня, в основе которых лежит модуляция хаотического движения на нижнем уровне, характерны практически для всех биосистем. Вышестоящий уровень (маятник) модулирует высокочастотные хаотические процессы нижнего уровня. Например, на масштабах порядка  $0,1 - 50 \text{ \AA}$  макромолекула глобулярного белка в среднем содержит порядка 5000 атомов, которые в этом масштабе могут рассматриваться как неизохронные микромаятники, колеблющиеся случайно, или случайно взаимодействующие объекты с определёнными признаками (рис. 19). Они случайно отклоняются от направления ковалентных связей в полипептидном остове на углы порядка  $20^\circ - 60^\circ$ . Эти движения хаотичны и не согласованы между собой, но под влиянием периодического расщепления аденозинтрифосфата (АТФ) или флуктуации рН их колебания могут синхронизироваться. Также хорошо известна низкочастотная динамика разбавленных растворов линейных полимеров [169].

Амплитуда флуктуации атомов, расположенных внутри глобулярных белков, не превышает  $0,5 \text{ \AA}$ , но на поверхности может достигать более  $2 \text{ \AA}$  с характерными временами  $10^{-9} - 10^{-3} \text{ с}$ . Если флуктуации синхронизовать, то, например, в молекуле миоглобина (см. рис. 19) энергетические барьеры для проникновения молекулы кислорода снижаются почти в 20 раз. Это позволяет миоглобину в динамическом режиме выполнять свою функцию связывания молекул кислорода с затратой всего  $8,5 \text{ ккал моль}^{-1}$  [150–152]. Белок превращается в бинарную систему (открыт – закрыт).

На рисунке 20 приведены природные прототипы будущих нанотехнологических изделий — "броуновских биомоторов" [123, 127, 133, 136], действующих по тому же

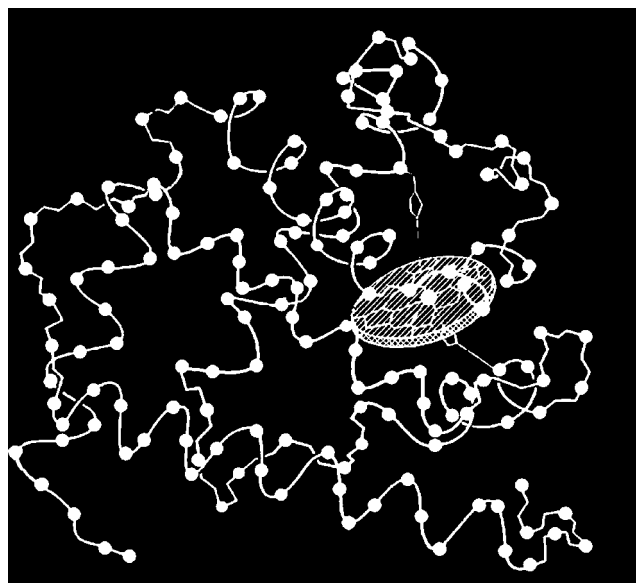
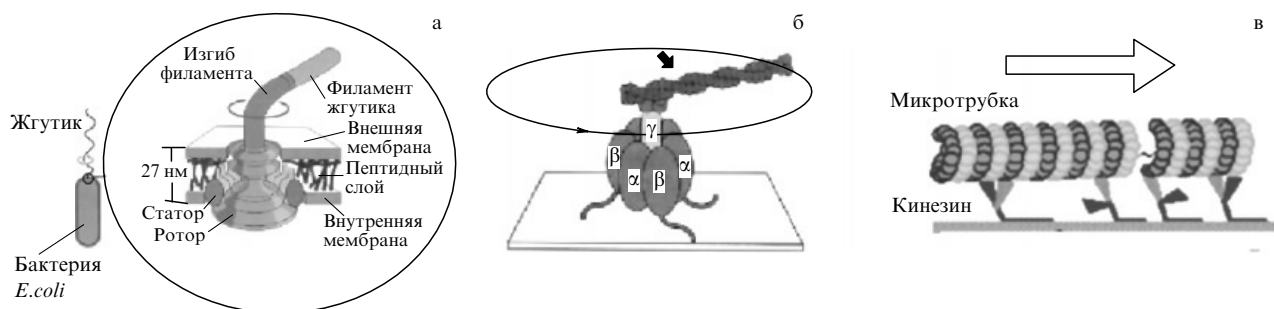


Рис. 19. Молекула глобулярного белка — миоглобина, которая имеет подвижную пространственную упаковку атомов. Размер молекулы порядка  $50 \text{ \AA}$ . Внутри "облака" атомов находится группа атомов, формирующих гемм (светлый диск), который присоединяет кислород. Различная форма "облака", возникающая при движении атомов, окружающих гемм, либо мешает, либо, наоборот, способствует присоединению и отдаче атома кислорода.

принципу. Принципы модулируемой хаотической подвижности, управляемой периодическими полями, лежат в основе биологических процессов с участием самых разных фибриллярных белков. Фибрилла, по которой движется, например, ферментный "мотор", демонстрирует периодичность и пространственную асимметрию, задаваемую генетической природой её структуры. Пространственная макропериодичность решётки фибриллы определяет шаг перемещения хаотически дрожащего фермента.

Например, период фибриллярного белка тубулина порядка  $8 \text{ нм}$ . В этом случае скорость перемещения, наблюдаемая в эксперименте, составляет  $10^{-4} \text{ м с}^{-1}$ . Можно предположить, что гидролиз АТФ — это источник низкочастотного (периодического) сигнала, который модулирует высокочастотный тепловой белый шум нижнего уровня (и тем самым управляет им) [119, 122], который перемещает элемент системы на фиксированных пространственных потенциалах, а сам элемент может находиться в двух или более различных состояниях.

Молекулярные машины, составленные из фибриллярных белков, таких как кинезин, актин или миозин, имеют микронную протяжённость, и по ним внутри клеток под действием модулирующих полей более высокого иерархического уровня могут транспортироваться микрочастицы, подобные везикулам или хромосомам [130, 133]. Динамика этих процессов количественно пока не измерена, потому что рентгеноструктурный анализ даёт нам представление только о кристаллизованных фибриллярных структурах. Например, волокна мышечного миозина в этом случае имеют искусственно вызванное кристаллоподобное стабильное состояние, а изучение его перестроек во времени *in vivo* требует исследования динамики переходного процесса вдали от равно-



**Рис. 20.** Примеры прототипов, имеющихся в живых системах, для создания искусственных наномоторов, преобразующих хаотическое движение в направленное: (а) мотор вращения жгутика бактерии, обеспечивающий пространственное перемещение бактерий, (б) фермент АТФ-синтетаза, (в) мышечный мотор.

весного кристаллизованного состояния с временным разрешением не хуже, чем  $10^{-8}$  с.

В заключение этого раздела отметим, что изменения окружающей среды часто отличаются высокой периодической стабильностью солнечных или земных циклов, сменой дня и ночи, фаз луны или сезонов года. Периодичность этих процессов модулирует внутренние программы работы организмов. Можно привести множество удивительных примеров периодических программ поведения, обмена веществ и размножения, связанных с циркадным, лунным, сезонным и многогодовым ритмами [173]. Однако до сего дня организация адаптационных механизмов на основе биологических часов остаётся предметом дискуссий. Например, какой организации биологических часов следует отдать предпочтение: счётчику ли по типу "песочных часов", измеряющему интервалы времени путём последовательного счёта [174], или неизохронному осциллятору [175], подстраивающему свою частоту и фазу под внешние условия? Очевидно, что накопительный счётчик последовательного счёта требует большого объёма памяти, а при её ограничении обладает низкой точностью и надёжностью. При колебаниях температуры или под действием каких-либо других внутренних факторов может происходить сбой его показаний. Осциллятор более сложен, чем накопительный счётчик, но и более надёжен, поскольку он может работать на своей частоте на протяжении многих циклов в изоляции от внешних воздействий. Экспериментальные наблюдения показывают, что предпочтение следует отдать неизохронным осцилляторам [176]. Механизм детерминированной хаотичности удачно сочетает в себе достоинства как накопительного счётчика типа "песочных часов", так и осциллятора с выраженной собственной периодичностью. Этот механизм отличается своим неизохронным внутренним механизмом, обеспечивающим подстройку под периодические воздействия внешних условий. Таким образом, механизмы детерминированной хаотичности, по-видимому, используются в разных системах как эволюционного отбора, так и управления внутри организма. Природа не расточительна, и свои удачные находки она использует для разных целей.

#### 4. Обсуждение

Отметим главное. Вариации случайного процесса в изменении внешней среды позволили живым системам построить стратегию селекции удач на основе памяти на

разных иерархических уровнях живого — от макромолекул до биосферы в целом, а также в процессе эволюции обучиться выживанию. Из изложенного ясно, что механизм селекции основан на поэтапном изменении реакции живой материи во времени и в пространстве на основе запоминания предыдущего результата. На разных этапах эволюции это происходило разными способами: посредством увеличения длины шага перемещения или длины генетического кода, с помощью изменения набора биохимических реакций, изменения внутренних связей, обменной операции обучения на скорость размножения и т.д. Селективный отбор обеспечил выигрыш живой материи, позволяя ей наращивать новые иерархические уровни регуляции путём объединения параллельно возникающих элементов, преобразуя тем самым как хаотический, так и детерминированный процессы внешней среды в симбиоз детерминированно-хаотического процесса внутри живого организма.

Колебательные процессы в неживой природе постоянно испытывали ту часть природы, которую сегодня мы называем *живой*, на прочность. Неживая природа периодически создавала и создаёт засухи и похолодания, производит извержения вулканов и землетрясения, тайфуны и цунами. В результате в живой природе существовали и существуют лишь два "вида": *приспособившиеся и вымершие*. Этапы эволюции *живой материи* — это история не только выигранных, но и проигранных игр.

Если рассматривать живое на макроуровне, то *это единая система — биосфера*. Ключевые слова здесь "единая система". Эта мысль не нова. Она восходит к XVIII и XIX вв., к работам Ж.Б. Ламарка и австрийского геолога Э. Зюсса (1875 г.). В начале XX в. В.И. Вернадский отвёл живым организмам роль преобразующей силы планеты, учитывая их деятельность не только в настоящем, но и в прошлом [177]. При определении живого следует исходить из понятия "*биосфера как целое*". Вернадский определил живое вещество как совокупность всех живых организмов, населяющих Землю, вне зависимости от их вида. Таким образом, вирусы и бактериофаги с сильно редуцированными признаками могут обладать качествами безусловно живых организмов, т.е. размножением, если они оказываются включёнными в биосферу. Но если биосфера исчезает, то они превращаются в простой полимерный наноматериал неживой природы [178]. Основные признаки живых организмов, позволяющие объединить их в единую систему, следующие:

1. Живое имеет *единую углеродно-водную основу*.

2. В конструкции основополагающих макромолекул используются молекулы с *единой пространственной симметрией (гомохиральные)*: L (аминокислоты) и D (сахара).

3. Всё живое на нашей планете объединено *единым генетическим кодом*.

4. В основе наследственного поддержания жизни лежит *единый механизм репликации макромолекул*.

5. Всё живое на нашей планете объединено *единым метаболическим процессом*, в котором продукты одних организмов являются субстратом для других.

Хотя на вопрос о том, как и почему появились данные объединяющие признаки, пока полного ответа нет. Из рассмотренных выше парадоксов следует набор из нескольких возможных сценариев:

1. *Живое — это флуктуация*. Если жизнь появилась как результат локальной флуктуации в нашей Галактике, то шансы надеяться на существование порядка, свойственного живой материи, где-либо ещё малы. Следовательно, жизнь в других галактиках — событие маловероятное.

2. *Живое — это результат начальных условий*. Появление живой материи произошло оттого, что сразу после Большого взрыва вся Вселенная была упорядочена и, следовательно, находилась в низкоэнтропийном состоянии. Однако без дальнейшего развития астрофизики это предположение не может быть полностью осмыслено и научно доказано.

3. *Жизнь — это результат начальных условий в далёком прошлом, локальных флуктуаций в недалёком прошлом и возникновения набора запоминающих конструкций у молекулярных машин в настоящем*. Этот вариант является комбинацией двух предыдущих, а именно он мог бы представлять собою переход хаотических процессов у части материи в детерминированно-хаотические процессы. Память, как и храповик, работает в одну сторону только потому, что система находится в тесном контакте с прошлым. Направленность связана с тем, что, возникнув, любая структура порождает цепь будущих событий, т.е. возникающее на каждом шаге определяет последующее. *Этот процесс развивается снизу вверх и, скорее всего, является главной движущей силой эволюции материи, приведшей в результате к возникновению живой материи, в том числе человека*. Прошлые и память о нём закладывало будущее. Например, появление воды на нашей планете определяло шаг за шагом выбор для формирования живого соединений углерода, а не соединений кремния, выбор соединений водорода, а не соединений фтора и т.д. [179]. По-видимому, Вселенная, возникнув, не была предназначена для жизни. Живая материя — это та часть всей материи, которая при равных шансах в игре научилась выигрывать, вытесняя неживую. В живой материи процессы "куда" и "как" стали происходить одновременно.

Следует заметить, что масса живого на нашей планете пока является очень небольшой и оценивается величиной  $2,4-3,6 \times 10^{12}$  т (в сухом весе), что составляет менее  $10^{-6}$  массы Земли. Но нагрузка на планету определяется не массой живого вещества, а его кинетикой, т.е. обесцениваемой вследствие потребления энергией. За 4,5 млрд лет органической эволюции на Земле по разным, но совпадающим оценкам появлялось и исчезало несколько миллиардов видов [31]. Все вместе эти организмы за 4,5 млрд лет должны были многократно про-

пустить через свои органы, ткани и клетки всю оболочку планеты: атмосферу, весь объём мирового океана, огромную массу минеральных веществ, создавая не только себя, но и преобразуя атмосферу, сушу и океан в отходы своей деятельности.

Сегодня мы располагаем суммой фактов о живой материи, но первые главы истории возникновения жизни нам известны только как гипотезы. Математическое моделирование не даёт ответа на этот вопрос. Задача восстановления причины по следствию является *некорректной обратной задачей*. Даже если когда-нибудь удастся в лабораторных условиях смоделировать полный процесс зарождения живой материи, то и тогда ответ будет вероятностным. Мы не сможем с абсолютной уверенностью утверждать, что на Земле этот процесс разворачивался именно по этому сценарию. Необходимо будет доказать, что такая траектория является единственно возможной или, по крайней мере, более вероятной.

Казалось бы, многое изложенное в этом обзоре уже было сказано до меня. Более того, вышедшая в русском переводе в 1979 г. книга немецких исследователей Э. Эйгена и Р. Винклера называется *Игра жизни* [180]. Однако там описывается другая игра, игра внутри живой материи. Рассмотренная нами игра — это не только игра внутри живой материи, но и игра, охватывающая всю материю.

Для живой материи существовали и существуют две опасности: собственная детерминированность и собственная хаотичность. Траектория жизни пролегает между этими двумя крайностями, как между Сциллой и Харибдой. Если бы процессы в живом были абсолютно детерминированными, то живая материя не могла бы противостоять изменениям внешней среды. Если бы они являлись хаотичными, то постоянно возникал бы конфликт между частями и целым как в организме, так и в биосфере и не было бы развития живой материи. Детерминированный процесс с существенной хаотической компонентой или хаотический процесс с существенной детерминированной компонентой — это основа кинетики живой материи. В заключение приведу ещё один пример.

Все органы живых организмов имеют периодический режим работы. Например, частота сокращений сердца человека приблизительно 60–70 ударов в 1 мин, у собаки — 90–100 ударов в 1 мин, у крысы — 350 ударов в 1 мин, за 1 мин желудок человека сокращается с частотой 3 цикла, собаки — 4–5 циклов, кошки — 6–7 циклов и т.д. Однако эти числа являются лишь средними показателями. В каждом из этих циклов прячется существенная хаотическая компонента. Например, типичная электрокардиограмма не является реализацией регулярного процесса, а, по-видимому, может рассматриваться как проявление детерминированного хаоса.

Исследование хаотической динамики сердечного ритма путём определения меры регулярности этого процесса позволяет прогнозировать заболевания человека на раннем этапе их развития. При спектральном анализе кардиоциклов проявляется много гармоник, отражающих состояние подкорковых нервных центров дыхания ( $2 \times 10^{-2} - 2,5 \times 10^{-2}$  Гц) и активности автономного контура регуляции сердечного ритма ( $3,3 \times 10^{-2}$  Гц). За 13 часов до остановки сердца уменьшается хаотическая компонента, возрастает детерминированная компо-

нента (область аттрактора уменьшается). За восемь суток до внезапной остановки сердца его ритм характеризуется постоянной периодичностью с резко уменьшающейся хаотической компонентой (аттрактор преобразуется в предельный цикл). Кинетика сокращений становится детерминированной. Таким образом, внезапная сердечная смерть представляет собой результат выхода системы из режима детерминированной хаотичности и перехода в детерминированный режим. После чего изменения быстро идут к остановке сердца и гибели живого организма. С другой стороны, тахикардия или, того хуже, фибрилляция сердца превращают его работу в хаотический процесс и ещё быстрее приводят организм к гибели [168].

## 5. Заключение

Итак, развёрнутое определение жизни, основанное на перечислении признаков, которые характерны для живых систем (и не только для живых, как было показано выше), следующее.

*Жизнь — это единая система (биосфера), для которой характерна память, способность к направленной подвижности, самовоспроизведению, обмену веществ, регулируемому потоку энергии и к размножению.*

Краткое определение жизни с точки зрения физики: *жизнь — это результат процесса игры при взаимодействии части системы со своим окружением. В игре у этой части системы появилось свойство запоминать вероятности появления удач и неудач в предыдущих раундах, что дало ей шанс на существование в последующих раундах.*

При этом, отражая результат этой игры, на надгробном камне одних исчезнувших видов следовало бы написать: "Они были косными и не могли противостоять изменениям своего окружения". На другом камне эпитафия гласила бы: "Они не научились запоминать и не испытывали тяги к объединению, потому что вели себя хаотично".

**Благодарности.** Я благодарю Д.С. Чернавского и Л.А. Блюменфельда за их многочисленные выступления на семинарах в Институте биологической физики в Пущине, повлиявшие на мои взгляды. Кроме того, я благодарен А.А. Дееву за написание компьютерной программы по проверке внесения асимметрии в симметричный вероятностный процесс. Я также признателен А.Б. Медвинскому и А.В. Куликову за прочтение рукописи и ряд замечаний.

Обзор в целом посвящается памяти В.Л. Гинзбурга, который попросил меня изложить моё видение этой проблемы и тем самым стимулировал написание этого обзора.

## Список литературы

1. Schrödinger E What is Life? *The Physical Aspect of the Living Cell* (Cambridge: The Univ. Press, 1945) [Шрёдингер Э Что такое жизнь с точки зрения физики? (М.: ГИИЛ, 1947); Что такое жизнь? С точки зрения физика 2-е изд. (М.: Атомиздат, 1972)]
2. Darwin C *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life* 1st ed. (London: J. Murray, 1859)
3. Lamarck J B P A *Philosophie Zoologique* 1st ed. (Paris: Dentu, 1809) [*Zoological Philosophy* (London: Macmillan, 1914); Ламарк Ж Б *Философия зоологии* (М.: Наука, 1911)]
4. Watson J D, Crick F H C *Nature* **171** 737 (1953)

5. Менский М Б *УФН* **177** 415 (2007) [Menskii M B *Phys. Usp.* **50** 397 (2007)]
6. Крупянский Ю Ф, Гольдманский В И *УФН* **172** 1247 (2002) [Krupyanskiy Yu F, Gol'danskii V I *Phys. Usp.* **45** 1131 (2002)]
7. Чернавский Д С *УФН* **170** 157 (2000) [Chernavskii D S *Phys. Usp.* **43** 151 (2000)]
8. Изаков М Н *УФН* **167** 1087 (1997) [Izakov M N *Phys. Usp.* **40** 1035 (1997)]
9. Аветисов В А, Гольдманский В И *УФН* **166** 873 (1996) [Avetisov V A, Gol'danskii V I *Phys. Usp.* **39** 819 (1996)]
10. Климонтович Ю Л *УФН* **166** 1231 (1996) [Klimontovich Yu L *Phys. Usp.* **39** 1169 (1996)]
11. Кадомцев Б Б *УФН* **164** 449 (1994) [Kadomtsev B B *Phys. Usp.* **37** 425 (1994)]
12. Гольдманский В И, Кузьмин В В *УФН* **157** 3 (1989) [Gol'danskii V I, Kuz'min V V *Sov. Phys. Usp.* **32** 1 (1989)]
13. Коренблит И Я, Шендер Е Ф *УФН* **157** 267 (1989) [Korenblit I Ya, Shender E F *Sov. Phys. Usp.* **32** 139 (1989)]
14. Волькенштейн М В *УФН* **154** 279 (1988) [Vol'kenshtein M V *Sov. Phys. Usp.* **31** 140 (1988)]
15. Kinzel W, in *Complex Systems, Operational Approaches in Neurobiology, Physics, and Computers: Proc. of the Intern. Symp. on Synergetics, Bavaria, May 6–11, 1985* (Ed. H Haken) (Berlin: Springer-Verlag, 1985) p. 107 [Кинцель В *УФН* **152** 122 (1987)]
16. Волькенштейн М В *УФН* **149** 726 (1986) [Vol'kenshtein M V *Sov. Phys. Usp.* **29** 799 (1986)]
17. Leggett A J *Contemp. Phys.* **25** 583 (1984) [Леггетт Э Д *УФН* **148** 671 (1986)]
18. Франк-Каменецкий М Д *УФН* **149** 728 (1986) [Frank-Kamenetskii M D *Sov. Phys. Usp.* **29** 800 (1986)]
19. Иоффе Л Б, Фейгельман М В *УФН* **150** 323 (1986) [Ioffe L B, Feigel'man M V *Sov. Phys. Usp.* **29** 986 (1986)]
20. Klug A *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **22** 565 (1983) [Клуг А *УФН* **142** 3 (1984)]
21. Волькенштейн М В *УФН* **143** 429 (1984) [Vol'kenshtein M V *Sov. Phys. Usp.* **27** 515 (1984)]
22. Волькенштейн М В *УФН* **141** 546 (1983) [Vol'kenshtein M V *Sov. Phys. Usp.* **26** 1011 (1983)]
23. Рабинович М И *УФН* **139** 363 (1983) [Rabinovich M I *Sov. Phys. Usp.* **26** 186 (1983)]
24. Чириков Б В *УФН* **139** 360 (1983) [Chirikov B V *Sov. Phys. Usp.* **26** 184 (1983)]
25. Peierls R *Contemp. Phys.* **21** (1–2) 3 (1980) [Пайерлс Р *УФН* **140** 315 (1983)]
26. Волькенштейн М В *УФН* **136** 733 (1982), рецензия на книгу: Schnakenberg I *Thermodynamic Network Analysis of Biological Systems* 2nd, corrected and updated ed. (Berlin: Springer-Verlag, 1981) и статью: Oster G F, Perelson A S, Katchalsky A "Network thermodynamics: dynamic modeling of biophysical systems" *Quart. Rev. Biophys.* **6** (2) 1 (1973)
27. Гельфанд М С *Вестн. РАН* **79** 411 (2009) [Gel'fand M S *Herald Russ. Acad. Sci.* **79** 247 (2009)]
28. Сverdlov E D *Взгляд на жизнь через окно генома* Т. 1 (М.: Наука, 2009)
29. Ambrose E J *The Nature and Origin of the Biological World* (New York: John Wiley & Sons, 1982)
30. Животовский Л, Хуснутдинова Э В *мир науки* (7) 82 (2003)
31. Grant V *The Evolutionary Process: a Critical Review of Evolutionary Theory* 2nd ed. (New York: Columbia Univ. Press, 1991) [Грант В, Эволюционный процесс. 1984–1989, <http://filosof.historic.ru/books/item/f00/s01/z0001022/st000.shtml>]
32. Khusainov A A, Deev A A, Ivanitsky G R *Biochim. Biophys. Acta BBA* **1117** 237 (1992)
33. Khusainov A A, Shilnikov G V, Emelyanenko V E, Ivanitsky G R *Biochim. Biophys. Acta BBA* **1118** 211 (1992)
34. Tarahovsky Y S, Ivanitsky G R, Khusainov A A *FEMS Microbiol. Lett.* **122** 195 (1994)
35. Иваницкий Г Р и др. *Биофизика* **40** 1265 (1995)
36. Вепринцева О Д и др. *ДАН СССР* **254** 496 (1980)
37. Вепринцева О Д, Деев А А, Иваницкий Г Р, Куниский А С *ДАН СССР* **270** 983 (1983)
38. Иваницкий Г Р и др. *ДАН СССР* **282** 1494 (1985)
39. Финкельштейн А В, Иванков Д Н, Галзитская О В *Успехи биологической химии* **45** 3 (2005)

40. Вуд У, Эдгар Р, в сб. *Молекулы и клетки* Вып. 4 (Под ред. Г М Франка) (М.: Мир, 1969) с. 80
41. Д'Эрбиньи М-Ж *Церковная жизнь в Москве* (Авторизованный пер. с франц. И Ф Наживина) (Париж: S.J., 1926) с. 57–58
42. Tabrum A H *Religious Beliefs of Scientists* (London: Hunter & Longhurst, 1910) [Табрум А Г *Религиозные верования современных ученых* (Пер. с англ. под ред. В А Кожевникова, Н М Соловьева) (М.: Творческая мысль, 1912)]
43. Сосинский А Б "Теорема Гёделя", Летняя школа "Современная математика", Дубна, 2006; <http://www.math.ru/media/lecture/12>
44. Cohen P J *Proc. Symp. Pure Math.* **13** 9 (1971) [Коэн П Дж *Успехи математических наук* **29** 169 (1974)]
45. Hájek P, Paris J, Shepherdson J J. *Symb. Log.* **65** 339 (2000)
46. Brillouin L *Scientific Uncertainty and Information* (New York: Academic Press, 1964) [Бриллюэн Л *Научная неопределенность и информация* (М.: Мир, 1966)]
47. Lorenz H F *Proc. Amsterdam Acad.* **437** 485 (1905)
48. Синай Я Г *Природа* (3) 72 (1981)
49. Синай Я Г *Теория фазовых переходов: строгие результаты* (М.: Наука, 1980) [Sinai Ya G *Theory of Phase Transitions: Rigorous Results* (Oxford: Pergamon Press, 1982)]
50. Gorodetski A, Pyashenko Yu *Int. J. Bifurc. Chaos* **6** 1177 (1996)
51. Corti B *Osservazioni microscopiche sulla tremella et sulla circolazione del fluido in una pianta acquajuola* (Lucca: Giuseppe Rocchi, 1774)
52. Kamiya N "Protoplasmic streaming", in *Protoplasmalogia* (Handbuch der Protoplasmaforschung, Bd. 8) (Wien: Springer-Verlag, 1959) [Камия Н *Движение протоплазмы* (М.: ИЛ, 1962)]
53. Романовский Ю М, Теплов В А *УФН* **165** 555 (1995) [Romanovskii Yu M, Teplov V A *Phys. Usp.* **38** 521 (1995)]
54. Brown R *Philos. Mag.* **2** 4 161 (1828)
55. Berg H C, Brown D A *Nature* **239** 500 (1972)
56. Berg H C *Nature* **254** 389 (1975)
57. Berg H C *Sci. Am.* **233** (2) 36 (1975)
58. Berg H C *Random Walks in Biology* (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1983)
59. Smoluchowski M *Phys. Z.* **13** 1069 (1912)
60. Scilard L *Phys. Z.* **53** 840 (1929)
61. Lewis G N *Nature* **118** 874 (1926)
62. Slater J C *Introduction to Chemical Physics* (New York: McGraw-Hill Book Co., 1939)
63. Demers P *Can. J. Res.* **22** 27 (1944)
64. Demers P *Can. J. Res.* **23** 47 (1945)
65. Brillouin L *Am. Scientist* **37** 554 (1949)
66. Brillouin L *J. Appl. Phys.* **22** 334 (1951)
67. Brillouin L *Science and Information Theory* (New York: Academic Press, 1956) [Бриллюэн Л *Наука и теория информации* (М.: Физматгиз, 1960)]
68. Einstein A *Ann. Physik* **322** 549 (1905)]
69. Smoluchowski M *Ann. Physik* **326** 756 (1906)
70. Эйнштейн А, Смолуховский М, в сб. *Броуновское движение* (Под ред. Б И Давыдова) (М.-Л.: ОНТИ, 1936)
71. Langevin P C R. *Acad. Sci.* **146** 530 (1908)
72. Климонтович Ю Л *УФН* **164** 811 (1994) [Klimontovich Yu L *Phys. Usp.* **37** 737 (1994)]
73. Иваницкий Г Р, Медвинский А Б, Цыганов М А *УФН* **161** (4) 13 (1991) [Ivanitskii G R, Medvinskii A B, Tsyganov M A *Sov. Phys. Usp.* **34** 289 (1991)]
74. Иваницкий Г Р, Медвинский А Б, Цыганов М А *УФН* **164** 1041 (1994) [Ivanitskii G R, Medvinskii A B, Tsyganov M A *Phys. Usp.* **37** 961 (1994)]
75. Иваницкий Г Р и др. *УФН* **168** 1221 (1998) [Ivanitskii G R et al. *Phys. Usp.* **41** 1115 (1998)]
76. Onsager L *Phys. Rev.* **65** 117 (1944)
77. Onsager L *Nuovo Cimento Suppl.* **6** 261 (1949)
78. Мостепаненко В М, Трунов Н Н *Эффект Казимира и его приложения* (М.: Энергоатомиздат, 1990) [Mostepanenko V M, Trunov N N *The Casimir Effect and Its Applications* (Oxford: Pergamon Press, 1997)]
79. Glansdorff P, Prigogine I *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations* (London: Wiley-Intersci., 1971) [Гленсдорф П, Пригожин И *Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций* (М.: Мир, 1973)]
80. Nicolis G, Prigogine I *Self-organization in Nonequilibrium Systems: from Dissipative Structures to Order Through Fluctuations* (New York: Wiley, 1977) [Николис Г, Пригожин И *Самоорганизация в неравновесных системах: от диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации* (М.: Мир, 1979)]
81. Васильев В А, Романовский Ю М, Яхно В Г *УФН* **128** 626 (1979) [Vasil'ev V A, Romanovskii Yu M, Yakhno V G *Sov. Phys. Usp.* **22** 615 (1979)]
82. Ebeling W *Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen* (Leipzig: Teubner, 1976) [Эбелинг В *Образование структур при необратимых процессах: Введение в теорию диссипативных структур* (М.: Мир, 1979)]
83. Prigogine I *From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences* (San Francisco: W.H. Freeman, 1980) [Пригожин И *От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках* (М.: Наука, 1985)]
84. Bénard H *Rev. Gén. Sci. Pures Appl.* **11** 1261 (1900); **11** 1309 (1900)
85. Zaikin A N, Zhabotinsky A M *Nature* **225** 535 (1970)
86. Zhabotinsky A M, Zaikin A N *J. Theor. Biol.* **40** 45 (1973)
87. Жаботинский А М *Концентрационные автоколебания* (М.: Наука, 1974)
88. Field R J, Koros E, Noyes R M *J. Am. Chem. Soc.* **94** 8649 (1972)
89. Winfree A T *Science* **175** 634 (1972)
90. Field R J, Noyes R M *J. Chem. Phys.* **60** 1877 (1974)
91. Smoes M-L *Bull. Am. Phys. Soc.* **23** (4) 534 (1978)
92. Vidal C, Roux J C, Rossi A J. *Am. Chem. Soc.* **102** 1241 (1980)
93. Кадомцев Б Б *УФН* **165** 967 (1995) [Kadomtsev B B *Phys. Usp.* **38** 923 (1995)]
94. Блюменфельд Л А *Проблемы биологической физики* 2-е изд. (М.: Наука, 1977) [Blumenfeld L A *Problems of Biological Physics* (Berlin: Springer-Verlag, 1981)]
95. Perutz M, in *Selected Topics in the History of Biochemistry* (Comprehensive Biochemistry, Vol. 37, Eds G Semenza, R Jaenicke) (Amsterdam: Elsevier, 1990) p. 1–20
96. Иваницкий Г Р, Кринский В И, Сельков Е Е *Математическая биофизика клетки* (М.: Наука, 1978)
97. Чернавский Д С *Синергетика и информация* (М.: Наука, 2001)
98. Бонгард М М *Проблемы узнавания* (М.: Наука, 1967)
99. Харкевич А А "О ценности информации", в сб. *Проблемы кибернетики* Вып. 4 (М.: Физматгиз, 1960) с. 53
100. Корогодин В И *Информация и феномен жизни* (Пушино, 1991)
101. Von Neumann J V *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (Berlin: J. Springer, 1932) [Mathematical Foundations of Quantum Mechanics (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1955); Фон Нейман Дж *Математические основы квантовой механики* (М.: Мир, 1964)]
102. Wigner E P *Symmetries and Reflections* (Cambridge, Mass.: M.I.T. Press, 1970) [Вигнер Е *Этюд о симметрии* (М.: Мир, 1971)]
103. Schrödinger E *Naturwissenschaften* **23** 807 (1935); **23** 823 (1935); **23** 844 (1935)
104. Einstein A, Podolsky B, Rosen N *Phys. Rev.* **47** 777 (1935)
105. Bohr N *Phys. Rev.* **48** 696 (1935)
106. Кадомцев Б Б *УФН* **173** 1221 (2003) [Kadomtsev B B *Phys. Usp.* **46** 1183 (2003)]
107. Bell J S *Physics* **1** 195 (1964)
108. Fry E S, Thompson R C *Phys. Rev. Lett.* **37** 465 (1976)
109. Aspect A, Grangier P *Lett. Nuovo Cimento* **43** 345 (1985)
110. Everett H (III) *Rev. Mod. Phys.* **29** 454 (1957)
111. DeWitt B S, Graham N (Eds) *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1973)
112. Wheeler J A, Zurek W H (Eds) *Quantum Theory and Measurement* (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1983)
113. Менский М Б *УФН* **174** 693 (2004) [Menskii M B *Phys. Usp.* **47** 637 (2004)]
114. Менский М Б *УФН* **173** 1199 (2003) [Menskii M B *Phys. Usp.* **46** 1163 (2003)]
115. Менский М Б *УФН* **170** 631 (2000) [Menskii M B *Phys. Usp.* **43** 585 (2000)]
116. Менский М Б *УФН* **168** 1017 (1998) [Menskii M B *Phys. Usp.* **41** 923 (1998)]
117. Менский М Б *УФН* **175** 413 (2005) [Menskii M B *Phys. Usp.* **48** 389 (2005)]
118. Feynman R P, Leighton R B, Sands M *The Feynman Lectures on Physics* Vol. 1 (Reading, Mass.: Addison-Wesley Publ. Co. Reading, Mass., 1963) [Фейнман Р, Лейтон Р, Сэндс М *Фейнмановские лекции по физике* Т. 1 (М.: Мир, 1967)]



119. Astumian R D *Science* **276** 917 (1997)
120. Astumian R D, Hänggi P *Phys. Today* **55** (11) 33 (2002); <http://www.physik.uni-augsburg.de/theo1/hanggi/Papers/309.pdf>
121. Bissell R A et al. *Nature* **369** 133 (1994)
122. Astumian R D, Derényi I *Eur. Biophys. J.* **27** 474 (1998)
123. Kelly T R, De Silva H, Silva R A *Nature* **401** 150 (1999)
124. Koumura N et al. *Nature* **401** 152 (1999)
125. Brouwer A M et al. *Science* **291** 2124 (2001)
126. Parrondo J M R, de Cisneros B J *Appl. Phys. A* **75** 179 (2002)
127. Schliwa M (Ed.) *Molecular Motors* (Weinheim: Wiley-VCH, 2003)
128. Leigh D A et al. *Nature* **424** 174 (2003)
129. Thordarson P et al. *Nature* **424** 915 (2003)
130. Badjić J D et al. *Science* **303** 1845 (2004)
131. Hernández J V, Kay E R, Leigh D A *Science* **306** 1532 (2004)
132. Fletcher S P et al. *Science* **310** 80 (2005)
133. Liu Y et al. *J. Am. Chem. Soc.* **127** 9745 (2005)
134. Berná J et al. *Nature Mater.* **4** 704 (2005)
135. Shirai Y et al. *Nano Lett.* **5** 2330 (2005)
136. Hernández J V, Kay E R, Leigh D A *Nature* **440** 163 (2006)
137. Eelkema R et al. *Nature* **440** 163 (2006)
138. Muraoka T, Kinbara K, Aida T *Nature* **440** 512 (2006)
139. Sambongi Y *Science* **286** 1722 (1999)
140. Serreli V et al. *Nature* **445** 523 (2007)
141. Hoyle F, Wickramasinghe C *Evolution from Space* (London: Dent, 1981)
142. Davis P W, Kenyon D H *Of Pandas and People: The Central Question of Biological Origins*. 2nd ed. (Dallas, TX: Haughton Publ. Co., 1993)
143. Kutschera U, Niklas K L *Naturwissenschaften* **91** (6) 255 (2004)
144. Иваницкий Г Р и др. *Биофизика* **30** 418 (1986)
145. Pasteur L "Leçons sur la dissymétrie moléculaire", in *Leçons de Chimie professées* (Paris: Société chimique, 1860) [*Ostwald's Klassiker Soret, Arch. Sc. Phys. Nat. Genève* (28) (1890)]
146. Pasteur L *Ann. Chim. Physique* **38** (3) 437 (1953)
147. Dawkins R *The Selfish Gene* (Oxford: Oxford Univ. Press, 1976)
148. Moore J *Sci. Am.* **250** (5) 108 (1984) [Мур Дж В мире науки (7) 48 (1984)]
149. Иваницкий Г Р, Панфилов А В, Цыганов М А *Биофизика* **32** 354 (1987)
150. Shlesinger M F, Zaslavsky G M, Klafter J *Nature* **363** 31 (1993)
151. Klafter J, Shlesinger M F, Zumofen G *Phys. Today* **49** (2) 33 (1996)
152. Haken H *Synergetics* (Berlin: Springer-Verlag, 1978) [Хаген Г Синергетика (М.: Мир, 1980)]
153. Levy P *Théorie de l'Addition des Variables Aléatoires* (Paris: Gauthier-Villars, 1937)
154. "Specimen theoriae novae de mensura sortis", Комментарий Санкт-Петербургской академии (1738)
155. Виноградов И М (Гл. ред.) *Математическая энциклопедия* Т. 1 (М.: Сов. энциклопедия, 1977) с. 412–422
156. Von Neumann J, Morgenstern O *Theory of Games and Economic Behavior* (Princeton: Princeton Univ. Press, 1944)
157. Монастырский М И *УФН* **174** 1371 (2004) [Monastyrskii M I *Phys. Usp.* **47** 1271 (2004)]
158. Иваницкий Г Р и др. *Биофизика* **40** 60 (1995)
159. Harmer G P, Abbott D *Nature* **402** 864 (1999)
160. Harmer G P, Abbott D *Statistical Sci.* **14** 206 (1999)
161. McDonnell M D, Abbott D *Proc. R. Soc. Lond. A* **465** 3309 (2009); <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/early/2009/07/31/rspa.2009.0312.abstract>
162. Цыганов М А и др. *УФН* **177** 275 (2007) [Tsyganov M A et al. *Phys. Usp.* **50** 263 (2007)]
163. Цыганов М А, Бикташев В Н, Иваницкий Г Р *Биофизика* **54** 704 (2009) [Tsyganov M A, Biktashev V N, Ivanitsky G R *Biophys.* **54** 513 (2009)]
164. Мелких А В *Биофизика* **47** 1134 (2002)
165. Иваницкий Г Р, Медвинский А Б *Биофизика* **47** 1140 (2002) [Ivanitsky G R, Medvinsky A B *Biophys.* **47** 1059 (2002)]
166. Абарбанель Г Д и др. *УФН* **166** 363 (1996) [Abarbanel H D et al. *Phys. Usp.* **39** 337 (1996)]
167. Борисюк Г Н и др. *УФН* **172** 1189 (2002) [Borisjuk G N et al. *Phys. Usp.* **45** 1073 (2002)]
168. Иваницкий Г Р, Деев А А *Биофизика* **54** 545 (2009) [Ivanitsky G R, Deev A A *Biophysics* **54** 381 (2009)]; <http://www.springerlink.com/content/c187232241411777>
169. Покровский В Н *УФН* **164** 397 (1994) [Pokrovskii V N *Phys. Usp.* **37** 375 (1994)]
170. McCammon J A, Gelin B R, Karplus M *Nature* **267** 585 (1977)
171. McCammon J A, Gelin B R, Karplus M *Am. ISA* (4) 4 (1986)
172. Ringe D, Petsko G A *Prog. Biophys. Mol. Biol.* **45** 197 (1985)
173. Иваницкий Г Р *Мир глазами биофизика* (М.: Педагогика, 1985)
174. Pittendrigh C S, in *Biological Rhythms* (Ed. J Aschoff) (New York: Plenum Press, 1981) [Питтендрих К, в сб. *Биологические ритмы* (Под ред. Ю Ашоффа) Т. 1 (М.: Мир, 1984) с. 22–53]
175. Bünning E *Cold Spring Harb. Symp. Quant. Biol.* **25** 1 (1960)
176. Aschoff J (Ed.) *Biological Rythms* (New York: Plenum Press, 1981) [Ашофф Ю (Ред.) *Биологические ритмы* Т. 1, 2 (М.: Мир, 1984)]
177. Вернадский В И *Химическое строение биосферы Земли и её окружения* (М.: Наука, 2001)
178. Иваницкий Г Р и др. *Биофизика* **40** 1265 (1995)
179. Иваницкий Г Р, Деев А А, Хижняк Е П, в сб. *Проблемы регуляции в биологических системах* (Под ред. А Б Рубина) (М. – Ижевск: РХД, 2007) с. 292–328
180. Eigen M, Winkler R "Ludus Vitalis", in *Mannheimer Forum* 73/74 (Heidelberg: Erwin Poell, 1973) p. 53 [Эйген М, Винклер Р *Игра жизни* (М.: Наука, 1979)]

## 21st century: what is life from the perspective of physics?

G.R. Ivanitskii

*Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences,  
ul. Institutskaya 3, 142290 Pushchino, Moscow region, Russian Federation  
Tel. (7-4967) 73-24 81  
Fax (7-4967) 79-05 53  
E-mail: ivanitsky@iteb.ru*

The evolution of the biophysical paradigm over 65 years since the publication in 1944 of Erwin Schrödinger's *What is life? The physical aspects of the living cell* is reviewed. Based on the advances in molecular genetics, it is argued that all the features characteristic of living systems can also be found in nonliving ones. Ten paradoxes in logic and physics are analyzed that allow defining life in terms of a spatial-temporal hierarchy of structures and combinatory probabilistic logic. From the perspective of physics, life can be defined as resulting from a game involving interactions of matter one part of which acquires the ability to remember the success (or failure) probabilities from the previous rounds of the game, thereby increasing its chances for further survival in the next round. This part of matter is currently called living matter.

PACS numbers: **01.65. + g, 01.70. + w, 87.23. – w**

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004a.0337

Bibliography — 180 references

Received 2 December 2009, revised 15 January 2010

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **180** (4) 337–369 (2010)

*Physics – Uspekhi* **53** (4) (2010)