

Воронежский государственный педагогический университет
Кафедра общей физики

В. В. Свиридов

Эволюционная картина мира

Учебное пособие

Воронеж
Версия 2013 г.

Электронный ресурс

[http://phys.vspu.ac.ru/staff/Sviridov/Lectures/Эволюционная картина мира.pdf](http://phys.vspu.ac.ru/staff/Sviridov/Lectures/Эволюционная%20картина%20мира.pdf)

*Вы можете использовать данный материал
в образовательном процессе Вашего вуза,
просто запросив на это согласие автора*

ББК 20я73
С24

УДК 50(075)

Свиридов В.В.

С24

Эволюционная картина мира: Учебное пособие. – Воронеж: Кафедра общей физики ВГПУ, 2013. — 235 с. – [Электронный ресурс]. – URL: [http://phys.vspu.ac.ru/staff/Sviridov/Lectures/Эволюционная картина мира.pdf](http://phys.vspu.ac.ru/staff/Sviridov/Lectures/Эволюционная%20картина%20мира.pdf)

В этом учебном пособии автор, известный в России специалист по разработке и преподаванию интегрированных естественнонаучных дисциплин, доктор физико-математических наук, профессор В.В. Свиридов прослеживает возникновение эволюционной идеи в человеческой культуре и становление современного эволюционного естествознания. Подробно обсуждаются представления и проблемы биологического эволюционизма, закон возрастания энтропии, его практическое и мировоззренческое значение.

Пособие выделяется среди существующей учебной литературы авторским стилем изложения, сочетающим увлекательное повествование, прекрасный литературный язык с высоким научным и научно-методическим уровнем.

Для студентов и преподавателей вузов, а также широкого круга читателей.

ББК 20я73

© В.В. Свиридов, 2013

Оглавление

Предисловие	9
Глава 1. Становление эволюционного естествознания	14
1.1. Эволюция как естественный прогресс	14
1.2. Ощущал ли Леонардо «стрелу времени»?	16
Векторное время.....	16
Циклическое время.....	17
Модель «золотого века».....	18
Модель линейного времени	19
Античность как «золотой век» Возрождения.....	20
1.3. Распространение идей научного, общественного и естественного прогресса в эпоху Просвещения	21
Возникновение идеи научного прогресса	21
Возникновение идеи социального прогресса	22
Проникновение идеи прогресса в естествознание.....	23
1.4. Открытие механизма эволюции. Дарвинизм	25
Что же сделал Дарвин?.....	26
Изменчивость по Дарвину и по Ламарку	27
Естественный отбор — творческая сила эволюции	27
Универсальная формулировка механизма эволюции..	28
1.5. Решение проблемы возраста Земли.....	30
Время, необходимое для образования геологических слоев.....	30
Время, необходимое для остывания Земли	31
Время, необходимое для засоления океанов	31
Остывание Земли с учетом ее радиоактивного подогрева	31
Радиометрические методы датировки пород	32
1.6. Основной естественнонаучный парадокс эволюционной картины мира	33
Обратимость и детерминизм механической Вселенной	34
Термодинамика и ее законы	35
Формулировка парадокса	36
Воскрешение витализма. Взгляды Вернадского	37
Разрешение парадокса	37
1.7. Эволюционное естествознание XX века и универсальный эволюционизм.....	39
Теория подвижности материков.....	39

Геотектоника	41
Развивающаяся Вселенная.....	43
Самоорганизация в простейших системах	44
Предмет синергетики.....	45
Универсальный эволюционизм	46
1.8. Литература к главе 1.....	48
Глава 2. Биологический эволюционизм	49
2.1. Возникновение дарвинизма	49
Чего Дарвин не знал.....	51
«Кошмар Дженкина»	52
2.2. Развитие эволюционной идеи в XIX веке	53
Множественность эволюционных теорий	53
Альфред Уоллес и неодарвинизм.....	53
Эрнст Геккель и ламаркодарианизм	54
Ламаркизм	56
Проблема определенности вида.....	57
Сальтационизм.....	57
2.3. Становление эволюционной биологии	59
Соотношение дарвинизма и альтернативных	
эволюционных концепций	59
Создание естественной системы живого.....	60
Установление закономерностей в палеонтологии	60
Эволюционные эмбриология, физиология,	
биогеография	62
Экспериментальные исследования эволюционного	
процесса	63
Трудности интерпретации.....	64
2.4. Возникновение генетики и генетический	
антидарвинизм.....	66
Открытие дискретной природы наследственности.....	66
Генетическая структура вида. «Чистые формы»	67
Антидарвинистские аргументы Иогансена	68
Причины конфронтации ранней генетики и	
дарвинизма.....	68
Мутационизм.....	69
Концепция гибридогенеза	70
Теория превосходящих адаптаций	71
2.5. Синтетическая теория эволюции.....	72
Кризис дарвинизма в начале XX века	72
С.С. Четвериков и советская школа в генетике.....	73

Создатели синтетической теории эволюции	74
Популяция — основная структурная единица вида.....	75
Поток генов в популяции.....	75
Генотип и фенотип.....	76
Источник новых генов — мутации	76
Другие факторы изменения генофонда	77
Формы естественного отбора.....	78
Популяция как элементарная эволюционирующая единица	80
Дивергентность эволюции.....	80
Постепенность эволюции	80
Соотношение макро- и микроэволюции	80
Непредсказуемость эволюции	81
2.6. Микроэволюция. Популяционная генетика	81
Общая генетика и популяционная генетика	82
Закон и равновесие Харди–Вайнберга	83
Мутационное давление на генофонд	85
Давление естественного отбора на генофонд	87
Необходимость изоляции	88
Внезапное видообразование	89
2.7. Макроэволюция	90
Макроэволюция в синтетической теории эволюции ..	91
Правило происхождения от неспециализированных предков	93
Эволюционные адаптации: алломорфозы и ароморфозы	94
2.8. История жизни на Земле	96
Первые клеточные организмы.....	96
Возникновение фотосинтеза.....	97
Возникновение эукариот и полового размножения....	98
Первые многоклеточные	99
Кембрийский взрыв эволюции животных.....	100
Ордовик: выход растений на сушу	101
Силур: первые позвоночные и наземные животные...101	
Девон: время рыб и первых лесов	102
Карбон: семена на смену спорам, рептилии на смену амфибиям.....	103
Пермь, триас, юра, мел: царство пресмыкающихся ..	104
Птицы, млекопитающие, цветковые растения.....	105
2.9. Современный биологический эволюционизм.....	107

Направления современных эволюционных исследований	107
Молекулярная генетика.....	108
Генетический код.....	109
Как возникают и развиваются гены	111
Масштабы генетической изменчивости. Теория нейтральности	112
Молекулярные часы эволюции	114
Молекулярная археология	116
Пунктуализм и градуализм.....	117
2.10. Проблема направленности эволюции	119
Существо проблемы.....	119
Концепция предопределенного развития. Номогенез.....	120
Концепция узконаправленного развития. Ортогенез.....	122
Ортоламаркизм и механоламаркизм	123
Тихогенез. Проблема возникновения направленности эволюции	125
Станислав Лем. «О невозможности жизни»	126
Случайность и закономерность в эволюционных процессах	127
Отчего вымерли динозавры?	128
2.11. Проблема происхождения жизни	132
Концепция божественного сотворения.....	133
Концепция вечности жизни во Вселенной.....	133
Концепция непрерывного самозарождения живых существ.....	134
Концепция панспермии.....	135
Концепция однократного абиогенеза	136
Научная постановка проблемы происхождения жизни.....	136
А.И. Опарин о возникновении структурной определенности живой клетки.....	138
Предбиологическая (химическая) эволюция.....	139
Самовоспроизводящиеся предбиологические структуры.....	141
М. Эйген: теория самоорганизации макромолекул	143
Хиральность живого.....	144
Понятие о гиперциклах	146
Экспериментальное моделирование химической эволюции	147
Современное состояние проблемы происхождения жизни	150

2.12. Экспериментальные результаты поисков внеземной жизни	151
Значение поисков внеземной жизни	151
Есть ли жизнь на Марсе?	152
Была ли жизнь на Марсе?	154
2.13. Литература к главе 2.....	155
Глава 3. Закон возрастания энтропии	157
3.1. Второй закон термодинамики	157
3.2. Энтропия как измеряемая физическая величина	158
3.3. Энтропия как мера некачественности энергии	160
Иерархия форм энергии по признаку их качества ...	160
Свободная энергия и энтропия	161
3.4. Вероятностный смысл энтропии	163
Энтропия системы молекул: формула Больцмана	163
Понятие статистического веса	165
Статистический вес, вероятность и энтропия.....	167
Статистический характер закона возрастания энтропии.....	168
3.5. Энтропия как мера неупорядоченности	169
Упорядоченность, структура, неоднородность.....	169
Энтропийный анализ текстов	171
Энтропия генетического текста	172
3.6. Энтропия и информация.....	173
Энтропия и количество информации по Шеннону ...	174
Энтропия, информация и «черные дыры»	175
3.7. Энтропийный баланс Земли.....	176
Источники поступления энтропии в геосферу.....	177
Пути удаления энтропии из геосферы.....	178
Энтропийный баланс развивающихся систем	179
3.8. Термодинамические ограничения экстенсивного развития.....	181
Термодинамическое условие возможности устойчивого развития	181
Стабильность потоковых составляющих энтропийного баланса Земли	182
Динамика производства энтропии в геосфере	183
Глобальный экологический кризис	184
Оценка предлагаемых путей выхода из кризиса.....	185
Информация как основной производственный ресурс.....	188
Борьба с ростом энтропии — дело дорогое	189
3.9. Проблема «тепловой смерти Вселенной»	190

Формулировка проблемы и первые попытки ее разрешения	190
Флуктуационная гипотеза Больцмана	193
Современное состояние проблемы	194
Антропный принцип	195
3.10. Литература к главе 3	197
Приложение: электронная эволюция	198
1. В. В. Свиридов. Параллели в эволюции компьютерных и биологических систем.....	198
Культура, технология и эволюция	198
Предвидения Лема и микроэволюция компьютерных программ	200
Универсальный эволюционизм	204
Макроэволюция ПК	207
Сетевое общество или глобальный муравейник?	213
2. Л. Левкович-Маслюк. Эволюционирующие интегральные микросхемы	216
Указатель имен	226

Предисловие

Книга, предлагаемая вашему вниманию, посвящена ключевому элементу любого разговора о современном естествознании — эволюционной идее. Эволюционная концепция является важнейшей концепцией **современного** естествознания, основанной на результатах всех естественных наук и обобщающей эти результаты [1, 2]. Это общее положение влечет за собой вполне практический вывод. В условиях ограниченного времени, отводимого реальными учебными планами на изучение интегрированных естественнонаучных курсов, разумно изложение материала сосредоточить вокруг эволюционной концепции или нацелить на подведение к ней слушателя. Это, с одной стороны, гарантирует, что не будет упущен главный элемент современной естественнонаучной картины мира, а с другой — позволяет затронуть практически все принципиальные вопросы фундаментального естествознания. Например, положение о статистическом характере наиболее фундаментальных законов природы может с успехом обсуждаться в ходе изучения свойств энтропии и закономерностей возникновения диссипативных структур. Основные представления современной биологической картины мира практически неизбежно привлекаются при рассмотрении эволюции живого. Аналогичным образом элементы астро- и геофизических знаний естественно вплетаются в рассказ о современных космологических и космогонических представлениях.

В Части 1 учебного пособия освещаются история формирования эволюционного естествознания в общекультурном контексте (Глава 1), история становления и современные проблемы биологического эволюционизма (Глава 2), а также важные для понимания общенаучной синергетической парадигмы аспекты понятия «энтропия» и многообразные проявления второго закона термодинамики (Глава 3). Основной акцент сделан все же на освещении вопросов эволюционной биологии. Связано это с тем, что:

- во-первых, биология является лидером современного естествознания¹, а от ее успехов и достижений зависит будущий облик не только человеческой цивилизации в целом, но и самого человека;
- во-вторых, при всей их важности, эти вопросы довольно скудно и скучно освещены в существующих учебниках и учебных пособиях;
- в-третьих, проблемы происхождения и развития живых существ вызывают широкий общественный интерес и являются в настоящее время предметом острых дискуссий между эволюционистами и креационистами — дискуссий, в которых образованный человек должен иметь сознательно выбранную позицию, основанную на знании.

В Части 2 будут изложены современные представления о происхождении и развитии Вселенной, основные положения синергетики — естественнонаучной теории самоорганизации материи, обсуждены концепции современного креационизма, их место в общей культуре и соотношение с эволюционистскими воззрениями и, наконец, будут освещены основные положения и проблемы универсального эволюционизма.

Книга построена так, чтобы быть интересной и доступной для гуманитарной аудитории, составляющей значительную часть студенческого контингента Воронежского государственного педагогического университета. Рассказ о многих специальных вопросах адаптирован под этот уровень подготовки и стиль мышления, что не могло не привести к некоторой вольности изложения. Автор вполне отдает себе отчет в этом, и пошел на снижение привычного для профессионала уровня строгости вполне сознательно. Из своего многолетнего опыта автор вынес твердое убеждение, что преподавание естествознания и преподавание отдельных естественнонаучных дисциплин — это совершенно разные вещи. Предметом рассмотрения в интегрированном естественнонаучном курсе вроде «Естественнонаучной картины мира», «Концепция современного естествознания» и аналогичных, служит не попури из физики, химии и био-

¹ Это утверждение вполне объективно и никак не связано с научно-профессиональными интересами автора — доктора *физико-математических наук*.

логии, а **естественнонаучная картина мира**. Естественнонаучная (или просто научная) картина мира — целостный феномен, возникающий на стыке естественнонаучной и гуманитарной культуры, представляющий собой сплав, амальгаму двух взаимодополняющих подходов к познанию мира. Соответственно сама методика преподавания должна носить более «гуманитаризованный» характер; в частности, изложение материала может и должно в большей степени, чем привычно для естествознателя, опираться не на доказательство, а на эмоциональное впечатление от удачной метафоры. При всем том автор старался все же не переходить черты, отделяющей картину примерную от картины неверной.

Из тех же соображений большое внимание в книге уделяется не только собственно научным проблемам эволюционного естествознания, но и истории их возникновения и разрешения в широком общекультурном контексте, а также личностям работавших над ними ученых — и не только ученых. Это направлено на достижение одной из основных целей интегрированного естественнонаучного образования: не просто ознакомиться с важнейшими накопленными в естествознании представлениями и идеями, но и показать их духовную ценность, дать представление о той бездне ума и души человеческих, которой они оплачены. Кстати говоря, иметь представление о человеческом измерении науки полезно не только гуманитариям, но и выпускникам естественных факультетов.

Несмотря на адаптацию, книга не стала развлекательным чтением. В ней встречаются формулы и специальные термины. Дело в том, что в естественных науках формулы, помимо своей основной роли вычислительного рецепта, играют не менее важную роль **средства выражения** краткой, афористичной связи между **образами** природных сущностей, и потому обойтись без них не удастся. Поясню эту мысль следующим примером. При разговоре об *импрессионистах* трудно избежать обсуждения того, что они внесли в технику живописи, поскольку во многом именно новые *технические* средства выражения позволили им создавать образы, обладающие столь сильным *художественным* воздействием. При этом обсуждение техники худож-

ника, требуя известного уровня культуры и образованности, вовсе не требует умения самому работать кистью. Точно так же культурный человек должен понимать смысл важнейших естественнонаучных «афоризмов» — формул, но не обязан уметь с ними обращаться, как профессиональный физик-теоретик.

Как и во «Введении», в настоящем издании широко используется система вставных элементов, выделяемых из общего текста. Эти вставки представляют собой цитаты и мини-истории, биографические справки, дающие представление о незаурядных личностях, создавших идейное богатство современного естествознания, а также более сложные или специальные места, которые могут быть пропущены при первом чтении (даже если оно и последнее).

«Я мог бы значительно увеличить объем настоящего труда, если бы полнее развил в каждой главе тот интелесный материал, который она содержит; но я предпочел ограничиться изложением лишь тех данных, которые были совершенно необходимы... Благодаря этому, мне удалось сберечь время моих читателей, не лишая их возможности понять меня».

Ж. Б. Ламарк. Философия зоологии.

Кроме вставок, шрифтом выделяются понятия, характеристики и имена, которые автор хотел в *меньшей* или ***большей*** степени акцентировать.

При работе над книгой было использовано множество замечательных мыслей ученых, писателей и философов, каждая из которых заслуживает указания своего автора и выражения ему глубокой признательности за ценный вклад в наше понимание красоты и гармонии мира. К сожалению, специфика жанра учебного пособия ставит на этом пути жесткие ограничения, поэтому авторство того или иного положения указывается, как правило, только при дословном цитировании. В качестве некоторой компенсации в конце книги приведен указатель упоминаемых в ней имен. При первом упоминании того или иного исторического персонажа указываются годы его жизни, что важно для соотношения описываемых научных или околонаучных событий с культурно-историческим фоном эпохи. Исключения из это-

го правила сделаны, в основном, для наших современников, которые, несмотря на свой большой вклад в науку и культуру, просто не успели попасть в энциклопедии и биографические справочники. Как правило, при первом упоминании дается полное имя (для русских — фамилия, имя и отчество), кроме тех случаев, когда оно чересчур громоздко или придает фразе нежелательную стилистическую окраску. В этом случае читатель сможет найти более полную информацию в указателе имен.

Все замечания, предложения и отзывы по книге будут приняты с благодарностью по электронной почте kafphis@mail.ru или по обычной: 394043, Воронеж, ул. Ленина, 86, Воронежский государственный педагогический университет, кафедра общей физики.

1. Рудой Ю.Г., Суханов А.Д. Место и роль эволюционных представлений (ЭП) в фундаментальном естественнонаучном образовании // Вестник РУДН, сер. «Фундаментальное естественнонаучное образование», 1996, №2 (1-2). С. 60–74.
2. Свиридов В.В., Свиридова Е.И. Эволюционные представления в курсе «Концепции современного естествознания» для гуманитариев // Вестник РУДН, сер. «Фундаментальное естественнонаучное образование», 1999, №. 4 (1–2). С. 108–114.

Глава 1. Становление эволюционного естествознания

Разве есть мастер, который создает себя сам?

Августин Блаженный (354–430)

1.1. Эволюция как естественный прогресс

Чаще всего в этой книге будет употребляться слово «эволюция». Поэтому с самого начала договоримся, какой смысл в него вкладывается.

В обыденном словоупотреблении эволюция понимается как антоним революции, то есть как процесс медленных, постепенных изменений, без катастроф, скачков и потрясений. При этом внимание не фиксируется на направлении этих изменений. Понятие эволюции как *изменения вообще* используют в своих работах и некоторые ученые.

«Эволюция — это процесс изменения, развития в природе и обществе... Эволюция может вести либо к деградации, либо представлять собой процесс самоорганизации, в ходе которого возникают более сложные и более совершенные структуры».

Ю. Л. Климонтович

Профессор Климонтович заведует в МГУ лабораторией синергетики — науки, которая изучает закономерности самопроизвольного возникновения упорядоченных структур.

Более точно понимание эволюции как последовательности *направленных изменений*. Само латинское слово **evolutio** переводится как «развертывание», то есть изменение во вполне определенном направлении.

*«Эволюция, в широком смысле синоним **развития**; в более узком смысле — один из основных типов развития: медленные, постепенные количеств. и качеств. изменения, в отличие от **революции**. При этом каждое новое состояние объекта имеет по сравнению с предшествующим более высокий уровень развития и дифференциации функций...»*

Большая Советская Энциклопедия, 3-е изд., т. 29.

Понимание (да и сам термин) эволюции как *развития* от примитивных форм *по направлению* к высшим, высокоорганизованным пришло из биологии, где уже более ста лет представляет собой основу научных представлений о происхождении и свойствах живого. Помимо *направленности* биологической эволюции, к ее важнейшим особенностям относятся **обусловленность естественными законами**, первые из которых были сформулированы **Чарлзом Робертом Дарвином (1809–1882)**, и ее **необратимый характер**.

«Эволюция — необратимое и в известной мере направленное историческое развитие живой природы... Э. определяется изменчивостью, наследственностью, естественным отбором организмов, происходящими на фоне перемен в экосистемах...»

Н. Ф. Реймерс. Популярный биологический словарь.

В XX веке выяснилось, что направленное развитие, **самоорганизация** свойственно не только биологическим, но и физико-химическим системам. Более того, было обнаружено, что закономерности эволюционных процессов на разных уровнях организации природы имеют много общего. Сформировалось общенаучное понятие **эволюции как естественного прогресса**.

Последние два слова — «естественный прогресс» — и выражают тот смысл, который будет вкладываться в термин «эволюция» в этой книге. Прогресс именно *естественный*, обусловленный и объяснимый законами природы, никем не направляемый, да и не могущий быть направляемым. И именно *прогресс*, восхождение, а не деградация. Правда, прогресс — понятие, очевидное лишь на интуитивном уровне; попытки же сформулировать строгое универсальное определение того, что есть прогресс, до сих пор были не очень удачными. Поэтому, помимо краткого определения эволюции, дадим более развернутое, не использующее слова «прогресс»:

Эволюция — это обусловленное объективными законами природы необратимое развитие материальных объектов и их систем в направлении от простого к сложному, от хаотического и од-

нородного состояния к упорядоченным высокоорганизованным структурам.

Наконец, поясним, что понимается под **эволюционной концепцией**, о возникновении и трансформациях которой пойдет речь в книге.

В самой общей форме, эволюционная концепция заключается в том, что нынешнее состояние природы и общества мыслится как результат предшествовавшего длительного естественного прогресса и как исходная точка для дальнейшей эволюции.

Можно попытаться выразить эволюционную идею в еще более сильной форме: Вселенная существует в развитии; более того, та Вселенная, которую мы знаем, не может существовать, не развиваясь.

?? Заполните следующий перечень атрибутов естественнонаучного понятия «эволюция»:

1. ...
2. ...
3. ...
4. Медленность, постепенность.

1.2. Ощущал ли Леонардо «стрелу времени»?

О, как безжалостен круговорот времён!

Омар Хайям (1048 – 1131)

Большинству наших современников эволюционная идея представляется чем-то настолько же очевидным, как утверждение, что каждый взрослый был когда-то ребенком. Однако в действительности эволюционный взгляд на мир стал элементом общечеловеческой культуры совсем недавно, лишь в Новое время. *Ни античность, ни средневековье, ни эпоха Возрождения общей идеи закономерного поступательного прогресса не знали.*

Векторное время Дело в том, что идея необратимой эволюции сопряжена с внутренним ощущением направленности времени. Время современного человека — время векторное. Оно направлено в будущее,

которое существенно отличается от прошлого *новыми, впервые возникшими* вещами и отношениями.

*Физики для обсуждения направленности времени используют удачный термин: **стрела времени**.*

Древние и средневековые культуры имели другие «модели времени», из которых можно выделить три основных, зачастую причудливым образом переплетающихся друг с другом.

Согласно **модели циклического времени**, все события в мире периодически повторяются, а мир в целом постоянно возвращается к некоему исходному состоянию. У древних греков, например, было представление о так называемых «пифагорейских эрах», по истечении которых вновь возвращаются уже жившие люди и происходят уже происходившие события. Майя считали, что мир время от времени сотворяется заново, и последнее такое сотворение относилось к 3114 году до н.э. В одном из влиятельных направлений буддизма, учения, сформировавшегося одновременно с началом расцвета древнегреческой философии, Вселенная уподобляется гигантскому колесу — Калачакре (что в переводе и означает «колесо времени»). Каждый оборот (кальпа) этого колеса длится невероятное число лет и распадается на четыре этапа: разрушение мира, пустота, новое основание мира божествами и водворение в нем живых существ и людей. Затем опять начинается деградация и разрушение, и всё повторяется вновь и вновь. Существенно то, что все миры Калачакры, в общем, одинаковы; последующий мир ничем принципиально не отличается от предыдущего.

Циклическое время

Замечательный поэтический манифест модели циклического времени можно найти в Библии:

«Род проходит, и род приходит, а земля пребывает во веки. Восходит солнце, и заходит солнце, и спешит к месту своему, где оно восходит. Идет ветер к югу, и возвращается к северу, кружится, кружится на ходу своем, и возвращается ветер на круги свои. Все реки текут в море, но море не переполняется: к тому месту, откуда реки текут, они возвращаются, чтобы опять течь... Что было, то и будет; и что делалось, то и будет делаться, и нет

ничего нового под солнцем. Бывает нечто, о чем говорят: «смотри, вот это новое», но **это** было уже в веках, бывших прежде нас».

Екклесиаст, 1.

Модель «золотого века» Еще более ранней является, по видимому, **модель «золотого века»**, варианты которой можно найти практически в каждой известной мифологии. По этой модели, в далеком прошлом (обычно, сразу после сотворения мира) мир был благодатным и гармонично устроенным, а населявшие его люди или их предки — мудрыми, здоровыми и богатыми. С течением времени мир дряхлеет и разрушается, становясь все менее пригодным для беззаботной жизни. Люди также вырождаются, деградируя как морально, так и физически.

Согласно Библии, Адам жил 930 лет. Столь же завидным долголетием отличались еще девять поколений его потомков, а имя прапрапраправнука Адама — Мафусаила — стало нарицательным для обозначения долгожителя. Дальнейшая библейская история известна, наверное, каждому: за грехи Бог наказал людей всемирным потопом, после которого продолжительность жизни потомков Ноя постепенно уменьшилась до нынешних значений.

Модель «золотого века» вложена в каждый оборот Калачакры: после очередного творения мира божества населяют его людьми гигантского роста, умеющими летать и обладающими другими сверхъестественными способностями. По мере накопления грехов люди мельчают, пока накануне очередного разрушения мира их рост не будет превышать роста 10-летнего ребенка, да и жить они будут не более 10 лет. Этот пример иллюстрирует взаимную необходимость концепций «золотого века» и циклической Вселенной: если мир с течением времени деградирует, то возродить его можно, только вернувшись к его началу.

Культура европейского Средневековья вобрала в себя обе древние хронологические концепции. Одним из наиболее популярных символов того времени было колесо Фортуны, свершавшее неотвратимый круговорот: кто сегодня возвысился, завтра падет в бездну, а ныне униженный будет

вознесен на самый верх. Стилизованное колесо Фортуны изображено на многих готических соборах, а в XIII веке, по свидетельству крупнейшего специалиста по культуре средневековой Европы Жака Ле Гоффа (р. 1924) его можно было видеть вообще повсюду. Так же гармонично вписались в христианское мировоззрение древние мифы о «золотом веке», отлитые в короткую латинскую формулу: *mundus senescit* (мир стареет).

«Золотой век средневековых людей лежал у истоков прошлого. Их будущее было давно прошедшим. И они двигались вперед с обращенным назад взором»

Ж. Ле Гофф. Цивилизация средневекового Запада.

Средневековье внесло и свою оригинальную лепту — **модель линейного времени**, времени, **имеющего начало** (сотворение мира) **и конец** (Страшный суд).

**Модель
линейного
времени**

(Страшный суд). При этом деградация мира и людей, начало которой положено первородным грехом, *необратима*: в сады Эдема не вернуться, и нового сотворения мира не будет. С наступлением конца света история прекратит течение свое. Однако говорить о *направленности* линейного времени средневековой культуры трудно. Во-первых, эта направленность определяется не внутренне присущими миру и времени свойствами, а движением их к цели, которая задана надмирной и вневременной силой. Кроме того, историческое время, заключенное между двумя не слишком отдаленными друг от друга датами (считалось, что мир был сотворен за несколько тысяч лет до Рождества Христова, а конца света в Средние века ждали чуть ли не каждый год), представляло лишь кратким, лишенным длительности мигом на фоне вневременной вечности. Отсюда вытекало своеобразное ощущение одновременности всех мировых событий, *отсутствие существенных различий между прошлым, настоящим и будущим*. Крестоносцы конца XI века считали, что они отправляются в поход, чтобы покарать не потомков палачей Иисуса Христа, а самих палачей; авторы литературных произведений указывали день недели и время суток, в которые произошло описываемое событие, но почти никогда — год. Действительно, зачем датировать событие оп-

ределенным годом, если он, в принципе, ничем не отличается от любого другого?

Античность как «золотой век» Возрождения Возрождение, став временем ярких художественных открытий, временем отказа от мизантропии и аскетизма средневековой культуры, не дало нового ощущения хода мировых событий. Титаны Возрождения уже прекрасно знали, что современные им культура и искусство очень сильно отличаются от античных. В записях Леонардо да Винчи есть рассуждения о том, что не только культура, но и сама твердь земная кардинально изменяет свои формы с течением лет. Однако воспринималось все это сквозь призму концепции «золотого века». Идеалом служило возвращение из тысячелетней тьмы невежества к светлому миру античности.

*Первый, и до сих пор один из лучших, труд по истории ренессансного (от Renaissance — Возрождение) искусства — «Жизнеописания наиболее знаменитых живописцев, ваятелей и зодчих эпохи Возрождения» Джорджо Вазари (1511–1574). Вазари, ученик Микеланджело (1475–1564), сам прекрасный живописец и архитектор, с первых же слов книги знакомит читателя со своей исторической концепцией. «Нескончаемым потоком бедствий, затопившим и низвергнувшим в бездну несчастную Италию, не только были разрушены памятники архитектуры,... но, что еще существеннее, как бы уничтожены были совершенно и все художники. И вот тогда-то, по воле божией, и родился в городе Флоренции в 1240 году, дабы возжечь первый свет искусству живописи, Джованни по фамилии Чимабуе... Он за короткое время превзошел как в рисунке, так и в колорите манеру обучавших его мастеров: ведь они, не забываясь о том, чтобы двигаться вперед, выполняли работы... не в доброй древнегреческой манере, а в неуклюжей, новой, того времени». Итак, движение вперед для Вазари означает возврат к древнегреческому мастерству, а современную Чимабуе (ок. 1240 – ок. 1302) византийскую манеру он одновременно называет «новой» и характеризует как регрессивную. Не зря Вазари назвал свою эпоху именно «*reniscita*» — **Возрождение**.*

Пиетет перед античными достижениями был в те годы характерной чертой не только художественной культуры. Приведу лишь один пример. Широко распространено мне-

ние, что первой ласточкой новой европейской науки стала книга **Николая Коперника (1473–1543)** «Об обращении небесных сфер». Взамен господствовавшей тогда геоцентрической системы мира, центром которого служит Земля, он предложил гелиоцентрическую систему (мир, в центре которого находится Солнце), более соответствующую истине. Однако если быть точным, Коперник предложил **вернуться** к гелиоцентрической системе **Аристарха Самосского** (ок. 320–230. до н.э.), а главным аргументом в ее пользу считал не лучшее соответствие результатам наблюдений, как это принято в современной науке, а логическую стройность и красоту. Таким образом, сочинение Коперника можно рассматривать, скорее, как последнее достижение античной натурфилософии.

Итак, идее поступательного естественного прогресса в человеческой деятельности и, тем более, в природе, не было места ни в античной, ни в средневековой культуре, ни даже в высокой культуре европейского Ренессанса. Очевидно, поиному вряд ли могло быть во времена, когда человек рождался и умирал в одном и том же мире. Он мог пережить несколько правителей, много войн, но в главном ни общественные отношения, ни человеческие знания, ни окружающая природа не успевали сколько-нибудь заметно измениться за краткий срок человеческой жизни.

?? Подберите примеры из мифологии, иллюстрирующие понимание древними хода времени.

1.3. Распространение идей научного, общественного и естественного прогресса в эпоху Просвещения

Ситуация изменилась в Новое время, когда ускорение общественного и культурного развития достигло такой степени, что факт существования прогресса, представление о том, что в мире **может возникнуть — и возникает! — нечто новое и более совершенное**, стали доступны человеку на основе его личного опыта.

Вначале был замечен прогресс в человеческих знаниях. **Френсис Бэкон (1561–1626)** и **Рене Декарт (1596–1650)** предложили свои методы получе-

Возникновение идеи научного прогресса

ния **новых** знаний, не сводящихся к древней мудрости. И пусть развитие науки выявило ограниченность метода Декарта, главное то, что оба утверждали возможность продвигаться вперед в познании мира. По тем временам это выглядело весьма смело и даже дерзко, поскольку для средневековой культуры характерным было представление о том, что всё доступное человеку знание *уже существует*, уже записано в Священном писании и других авторитетных источниках. Дело лишь за тем, чтобы это знание извлечь и представить в удобной форме.

История не отвела критикам Ф. Бэкона и Декарта слишком много времени. В XVII веке был достигнут невиданный ранее темп накопления знаний о природе. **Галилео Галилей (1564–1642)** открыл горы на Луне, пятна на Солнце и спутники Юпитера. После открытий **Исаака Ньютона (1643–1727)**, **Роберта Гука (1635–1703)**, **Уильяма Гарвея (1578–1657)** и **Антони ван Левенгука (1632–1723)**, о которых более подробно рассказано во «Введении», отрицать существование научного прогресса было уже невозможно.

Возникновение идеи социального прогресса

Следующей областью, в которой оформилась идея поступательного прогресса, были представления об общественном устройстве. В XVIII, а в Англии уже в XVII веке возникло идейное течение, известное как **Просвещение**, быстро ставшее весьма влиятельным. Просветители безгранично верили в возможности человеческого разума, которому — считали они, — под силу перестроить общество на **новых**, разумных началах. Один из первых вариантов рационалистической **теории общественного прогресса** предложил французский экономист и государственный деятель **Анн Робер Жак Тюрго (1727–1781)**, считавший, что, несмотря на все ужасы и трагедии истории, «нравы смягчаются, человеческий разум просвещается, изолированные нации сближаются, торговля и политика соединяют, наконец, все части земного шара». Попытка установить **закономерности развития** истории, его основные этапы и движущие силы, была сделана **Жаном Антуаном Кондорсэ (1743–1794)**; сам же факт такого развития сомнений в конце XVIII века уже не вызывал.

Мари Жан Антуан Никола Кондорсэ (Кондорсе) — весьма яркая личность, один из символов Просвещения. Дворянин, маркиз, в 26 лет он становится членом Академии наук благодаря своим математическим работам, а с 30 лет выполняет обязанности неперменного секретаря Академии. Область его интересов, однако, гораздо шире одной лишь математики. Разделяя взгляды просветителей, он сотрудничает в «Энциклопедии» Дидро, интересуется социологией и политикой, пишет художественные биографии Тюрго и **Вольтера (1694–1778)**. Когда в результате Великой французской революции король Луи XVI (1754–1793) подписывает конституцию, Кондорсэ избирают в Законодательное собрание. Там он активно работает, становится президентом Собрания, однако наибольший его законотворческий вклад — это проект организации народного образования в стране, предусматривавший всеобщность и бесплатность образования, отделение школы от церкви. Большинство положений проекта было принято и впоследствии реализовано. Будучи разумным и уравновешенным человеком, Кондорсэ пытался противостоять экстремистским выпадам против умеренных жирондистов и вместе с ними был обвинен в заговоре и приговорен к смертной казни. Ему пришлось бежать. Скрываясь в убежище, Кондорсэ написал главную работу своей жизни — «Эскиз исторической картины прогресса человеческого разума». Весной 1794 года он был схвачен и помещен в тюрьму; на следующий день его нашли в камере мертвым. «Эскиз» вышел уже после смерти Кондорсэ.

Наконец, в XIX веке эволюционная идея начинает решительно проникать в естествознание. В 1809 г. выходит «Философия зоологии» **Жана Батиста Ламарка (1744–1829)**, который решительно заявил, что все современные животные возникли путем совершенствования более примитивных форм.

Проникновение идеи прогресса в естествознание

«Не должен ли я был прийти к мысли, что природа создавала различные живые тела, постепенно переходя от самого простого к самому сложному, ибо, если подниматься по лестнице животных от самых несовершенных и до наиболее совершенных из них, мы увидим, что организация становится всё сложнее и совершеннее?» — писал он в предисловии к своей книге. Форма, в которой задан

этот вопрос, показывает, что Ламарк считал его риторическим. Однако понятие о «лестнице существ» было введено еще **Аристотелем** (384–322 гг. до н.э.), которого она вовсе не наводила на мысль о **развитии** животного мира, поскольку Аристотель принадлежал культуре, в которой идея поступательного прогресса отсутствовала в самой общей форме.

Конкретный **механизм** биологической эволюции, предложенный Ламарком (как и механизмы общественного прогресса, рассматривавшиеся просветителями), оказался, однако, неверным.

Согласно Ламарку, эволюция происходит путем унаследования признаков, приобретенных предками при их жизни. Так, дети чемпиона по бегу должны от рождения быть несколько быстрее сверстников, а дети тяжелоатлета — иметь большую мышечную массу. Все это объяснялось действием флюидов — реальных (например, кровь) и фантастических подвижных агентов, осуществляющих воздействие окружающей среды на организм и взаимодействие органов внутри него.

«По мере ускорения движения флюидов, последние преобразуют клеточную ткань, в которой они движутся, открывают себе в ней проходы, формируют там разного рода каналы и, наконец, создают в ней различные органы».

Ж. Б. Ламарк. *Философия зоологии*.

Ошибочность взглядов Ламарка на **механизм** эволюции была понятна уже его современникам. Особенно энергично критиковал их **Жорж Леопольд Кювье** (1769–1832). Однако тот же Кювье внес свой вклад в развитие эволюционной **идеи**, установив, что и животный мир, и сама поверхность Земли менялись на протяжении истории нашей планеты. Причиной этому он видел глобальные геологические катастрофы, которые, по его мнению, привели к вымиранию многих видов, знакомых нам сейчас только по ископаемым останкам.

«Если нам интересно изучать почти стертые следы исчезнувших народов на заре нашего рода, то как не заняться разысканием во тьме младенчества земли следов переворотов, предшествовавших существованию всех народов! Нас поражает мощь человеческого ума, кото-

рым он измерил движение небесных тел, казалось бы, навсегда скрытое природой от нашего взора; гений и наука переступили границы пространства; наблюдения, истолкованные разумом, сняли завесу с механизма мира. Разве не послужило бы также славе человека, если бы он сумел переступить границы времени и раскрыть путем наблюдений историю мира и смену событий, которые предшествовали появлению человеческого рода?»

Ж. Кювье. Рассуждение о переворотах на поверхности земного шара и об изменениях, которые они произвели в животном царстве.

?? Почему создателем теории эволюции считается не Ламарк, а Дарвин?

?? Выясните, почему Кювье отрицал возможность возникновения новых видов.

1.4. Открытие механизма эволюции.

Дарвинизм

Концепция катастрофизма, предложенная Кювье, в свою очередь, была опровергнута конкретными геологическими аргументами. **Чарлз Лайель (1797–1875)** в классическом труде «Основы геологии» (1830–1833) привел неопровержимые факты в пользу концепции **униформизма**, предложенной в 1785 г. **Джеймсом Хаттоном (1726–1797)**. Согласно этой концепции, поверхность Земли изменяется благодаря таким процессам, как эрозия, накопление осадков, вулканизм, которые не носят катастрофического характера, идут с очень небольшой и примерно постоянной скоростью, а их впечатляющие результаты обусловлены невообразимой длительностью геологического времени. Вопрос о том, как понимать находимые при палеонтологических раскопках останки странных существ, вновь встал на повестку дня.

В 1859 году выходит одна из книг, изменивших мир, — «Происхождение видов путем естественного отбора, или Сохранение благоприятствуемых пород в борьбе за жизнь» Чарлза Дарвина.

Эта книга более известна как «Происхождение видов путем естественного отбора» или просто «Происхождение видов». Но она узнается и по одному слову «Проис-

хождение» (*The Origin*) — именно так назвал Ирвинг Стоун (1903–1989) роман-биографию Дарвина. «Происхождение» было распродано в день выхода в свет и выдержало двадцать три прижизненных издания на семи языках, в том числе на русском. В России дарвиновский труд был с энтузиазмом воспринят демократически настроенной молодежью, которая, помимо чисто научных достоинств, находила в нем свидетельство в пользу необходимости и естественности не только биологического, но и общественного прогресса (напомню, что 60-е годы прошлого века в России — время коренных социальных реформ). Популяризацией дарвинизма занимался не только биолог **Климент Аркадьевич Тимирязев (1843–1920)**, но и публицист Дмитрий Иванович Писарев (1840–1868), опубликовавший в 1864 г. цикл статей «Прогресс в мире животных и растений». Тургеневский Базаров тоже неспроста увлекался препарированием лягушек («Отцы и дети» написаны в 1862 году).

Что же сделал Дарвин?

Заслуга Дарвина заключается, однако, не в том, что он «придумал эволюцию», как часто полагают люди, не питавшие интереса к школьной биологии. Идея биологической эволюции была сформулирована и активно пропагандировалась его предшественниками — Ламарком и некоторыми другими, например, Иоганном Вольфгангом Гёте (1749–1832) и Этьеном Жоффруа Сент-Илером (1772–1844). Нет, **Дарвин предложил естественный механизм, обеспечивающий эволюцию**, совершенствование живых организмов, без вмешательства какой-либо разумной или сверхъестественной силы; предложил и доказал многочисленными фактами и логическими доводами, что этот механизм не просто возможен, а существует и работает.

«Научное общественное мнение — одно из самых придирчивых и консервативных. Оно не раз отвергало разумные идеи, если какая-нибудь деталь была недоработана. Сочинения Ламарка считались до Дарвина несерьезной полунаучной фантастикой. Тщательная проработка Ч. Дарвином своих идей, доведение их до построения картины мира живого плюс его репутация вдумчивого натуралиста сильно способствовали тому, что теория была... нет, не признана (она была признана не сразу и не всеми),

а принята всерьез, как то, о чем стоит думать и говорить».

А. Н. Горбань, Р. Г. Хлебопрос. Демон Дарвина.

Дарвиновский механизм биологической эволюции имеет три компонента: **изменчивость, наследственность и естественный отбор.**

Изменчивость, согласно Дарвину, бывает двоякого рода: определенная и неопределенная. *Определенная изменчивость* — это то, о чем говорил Ламарк:

Изменчивость по Дарвину и по Ламарку

адекватное среде изменение организма или органа под действием упражнений или других условий жизни. Однако для процесса видообразования она не имеет значения, ибо благоприобретенные при жизни организма достоинства или недостатки по наследству не передаются, что хорошо известно селекционерам. Последователи *Т. Д. Лысенко (1898–1976)* могли сколько угодно «тренировать» растения, скажем, пшеницы в условиях дефицита влаги — получить новый засухоустойчивый сорт им так и не удалось. Именно за учение о наследовании приобретенных признаков Кювье беспощадно критиковал Ламарка и был прав.

Для *неопределенной*, не адекватной среде, *изменчивости*, которая ответственна за видообразование, сейчас используется термин, которого Дарвин не знал: *мутации*. Мутации возникают случайно и проявляются как врожденные наследуемые отклонения организма от нормы для данного вида. С современной точки зрения они есть результат сбоев, ошибок в механизме воспроизводства себе подобных. **Характер и направленность изменений, возникших в результате мутации, полностью случайны**, не зависят от того, каким воздействиям подвергались родительские организмы.

Противники эволюционного учения, которых и сейчас достаточно много, часто сводят механизм эволюции к одной неопределенной изменчивости, после чего задают вопрос: сколько времени придется трясти коробку с шестеренками, чтобы из них случайным образом сложился работающий будильник? По-видимому, что трясти придется дольше, чем существует Вселен-

Естественный отбор — творческая сила эволюции

ная, даже если не ограничивать ее возраст библейскими шестью тысячелетиями, а согласиться с современной космологической оценкой в 10–20 миллиардов лет. А ведь самое простое одноклеточное многократно сложнее будильника! При этом, однако, умалчивается, что дарвиновский механизм предусматривает **средство придать направленность процессу эволюции — естественный отбор**, который помогает выжить в борьбе за существование только носителям полезных сочетаний мутаций.

Наименее определенными были взгляды Дарвина на наследственность. По свидетельству А. Н. Горбаня и Р. Г. Хлебопроста, «высказывания Дарвина, разбросанные по его знаменитой книге, убеждают в том, что он не знал механизмов наследования и хорошо знал, что он этого не знает». Это понятно: наука о наследственности — генетика — была создана уже в следующем, XX веке. Однако на первых порах хватило не очень строгого и интуитивно понятного утверждения о том, что признаки, приобретенные благодаря неопределенной изменчивости, наследуются.

**Универсальная
формулировка
механизма
эволюции**

В XX веке выяснилось, что естественное возникновение новых упорядоченных и высокоорганизованных структур, **самоорганизация**, происходит не только в мире живого, но также в физических и химических системах. Оказалось, что наиболее общие закономерности этих процессов укладываются в схему дарвиновского эволюционного механизма, если сформулировать ее так, чтобы исключить чисто биологическую специфику:

- Во-первых, в природе имеется неисчерпаемый источник *случайных* изменений существующих форм. В физике и химии это **флуктуации**, в биологии — мутации.

Флуктуация — это случайное отклонение системы от ее среднего или наиболее вероятного состояния, вызванное хаотическим тепловым движением молекул или квантовыми эффектами.

Например, при нормальных условиях в 1 литре воздуха содержится в среднем $3 \cdot 10^{22}$ молекул. Однако из-за их

*хаотического движения число молекул в **данном** литре то больше, то меньше среднего. Это и есть флуктуации.*

- Во-вторых, имеется естественный и эффективный способ отбраковывать неудачные изменения (что такое «неудачные», уточнять не будем — это заведет слишком далеко). В физике и химии этот способ чаще всего называется отрицательной обратной связью, в биологии — естественным отбором.

Пусть в какой-то момент времени число молекул в данном объеме воздуха оказалось меньше среднего. Поскольку давление пропорционально концентрации молекул, в этом объеме оно будет меньше, чем в соседних. Разность давлений создаст направленный поток воздуха (ветер) вовнутрь этого объема, который быстро приведет к подавлению флуктуации.

- В-третьих, имеется механизм сохранения и размножения форм с удачными изменениями, которые избежали отбраковки. В физике принято говорить о положительной обратной связи, в химии — об автокатализе, в биологии — о наследственности.

*Положительная обратная связь в рассмотренном примере с флуктуациями числа молекул в заданном объеме может обеспечиваться их притяжением друг к другу. При комнатной температуре это притяжение оказывается слишком слабым на фоне быстрого теплового движения, происходящего со скоростями в сотни метров в секунду. Однако при понижении температуры ниже определенного значения происходит следующее. Пусть в некотором объеме число молекул оказалось больше среднего. Это означает, что расстояние между ними меньше среднего, и притягиваются они друг к другу сильнее. Поскольку интенсивность движения при низкой температуре невысока, то силы притяжения смогут подтянуть молекулы ближе друг к другу, в результате чего межмолекулярное притяжение станет еще сильнее, и так далее. В конечном счете исходная флуктуация сконденсируется в капельку жидкости — **структуру**, обладающую ближним порядком в расположении молекул, поверхностью, отделяющей ее от окружающей среды, и определенной формой.*

В последней четверти XX века возникли подозрения, что изложенный механизм самоорганизации применим (конечно, в самом общем виде) к процессам общественного развития. Появилось новое научное направление — синергетика социальных процессов, ставшее составной частью программы исследований **универсального эволюционизма**.

?? Какая из составляющих дарвиновского механизма эволюции отсутствовала у Ламарка?

?? В чем различие представлений об изменчивости у Дарвина и Ламарка?

?? Выясните, что такое «автокатализ».

?? Придумайте примеры действия механизмов положительной и отрицательной обратной связи, присущих обществу.

1.5. Решение проблемы возраста Земли

Победа дарвинизма была тесно связана с достижениями в геологии. Учение о биологической эволюции позволило обосновать **стратиграфию**, основанную на идее Уильяма Смита (1769–1839) о датировке слоев горных пород по характеру содержащихся в них окаменелых останков древних организмов. Коль скоро с течением времени возникают все более совершенные формы животных и растений, то чем более примитивные формы окаменелостей мы нашли в данном слое, тем он древнее. Такой способ позволяет, правда, судить лишь об *относительном* возрасте тех или иных пород: какая из них образовалась раньше, какая позже. Но и абсолютный, выраженный в годах, возраст Земли и продолжительность основных этапов ее истории также довольно скоро перестали быть тайной.

**Время,
необходимое для
образования
геологических
слоев**

Во «Введении» рассказывалось о бурных дебатах относительно возраста Земли, кипевших в первой половине XIX века. Наиболее убедительные аргументы представил тогда Лайель, который показал, что образование известных геологических слоев должно было занять несравненно более длительный отрезок времени, чем те несколько тысяч лет, которые, согласно Священному писанию, прошли с сотворения мира. Но *насколько* более длительный — остава-

лось неизвестным. Как ни странно, уже к середине XIX века большинство геологов, не веря в божественное сотворение, считало, что Земля существовала либо вечно, либо в течение столь длительного времени, которое никакими практическими средствами нельзя отличить от вечности.

В 1860 г. выдающийся английский физик **Уильям Томсон (1824–1907)**, впоследствии лорд **Кельвин**, сломал ногу и был вынужден провести несколько месяцев в постели. За это время он прочитал недавно вышедшую модную книгу, которая называлась «Происхождение видов». Книга навела его на мысль, что время существования Солнца и Земли, требуемое теорией Дарвина, должно быть очень велико — но все же *насколько* велико? Размышляя об этой проблеме, он придумал способ физической оценки возраста Земли. Способ основывался на предположении, что наша планета образовалась в горячем состоянии с температурой около 1000°C. Рассчитав, как долго должен остывать шар таких размеров с учетом его подогрева излучением Солнца и приливным трением, Кельвин пришел к выводу, что Земля образовалась приблизительно 25 миллионов лет назад.

**Время,
необходимое для
остывания
Земли**

Эта оценка не удовлетворила геологов и биологов-эволюционистов, которые полагали, что для возникновения сложных организмов требовалось еще больше времени — и намного больше.

**Время,
необходимое для
засоления
океанов**

Однако убедительных контраргументов они не находили вплоть до 1899 г., когда ирландский геолог **Джон Джоли (1857–1933)** обратил внимание на то, что образование соленых океанов должно было занять не менее 100 миллионов лет. Его идея была очень проста: океаны солонны из-за химических соединений, которые приносятся в них реками. Взяв известную концентрацию солей натрия в морской воде и разделив ее на годовое поступление этих солей со стоком всех рек Земли, Джоли получил свою оценку.

Окончательную ясность в вопрос о возрасте Земли внес уже XX век. В 1896 году **Анри Беккерель (1852–1908)** открыл явление радиоактивности — само-

**Остывание
Земли с учетом
ее
радиоактивного
подогрева**

произвольного распада некоторых атомных ядер, — а в 1903 году **Пьер Кюри (1859–1906)** и независимо от него **Эрнест Резерфорд (1871–1937)** обнаружили, что этот процесс сопровождается выделением тепла (благодаря чему работают современные атомные электростанции). Но если Земля содержит радиоактивные ядра (а это действительно так), значит у нее имеется внутренний источник тепла. В 1904 г. Резерфорд выступил с докладом в лондонском Королевском институте, в котором показал, что внутренний радиоактивный подогрев мог удлинить время остывания Земли до миллиардов лет. Однако для получения точного результата требовалось точно знать, сколько и каких радиоактивных элементов содержит в себе наша планета, а эти данные и сейчас носят весьма приблизительный характер.

По разным оценкам, выделение тепла в результате процессов радиоактивного распада в недрах Земли составляет от 1 до $4 \cdot 10^{20}$ джоулей в год. Для сравнения можно указать, что от Солнца Земля получает примерно $5 \cdot 10^{24}$ джоулей в год, то есть в 10 000 – 50 000 раз больше. Фокус, однако, заключается в том, что относительно небольшое количество «радиоактивного» тепла не успевает отводиться к поверхности планеты, и поэтому земные недра даже в современную эпоху продолжают нагреваться!

Радиометрические методы датировки пород

В дальнейшем Резерфорд со своими учениками изобрел более точные способы датировки горных пород, основанные на анализе радиоактивных превращений. Совокупность таких способов образует сейчас целую научную дисциплину — **радиометрию**. Например, известно, что одна из разновидностей (*изотопов*) ядер атомов калия, распадаясь, образует ядра атомов аргона. Скорость этого процесса хорошо известна и не зависит от внешних условий: спустя 1 миллиард 300 миллионов лет от исходных ядер калия остается ровно половина. Аргон — газ, и дальнейшая судьба его зависит от состояния породы, в которой он образуется. Если она представляет собой расплавленную магму, то аргон выделяется из нее при извержениях. Однако после того как изверженная магма затвердела, возникающие атомы аргона остаются связанными

в ней. Чем больше времени проходит с момента затвердевания, тем больше накапливается аргона. Таким образом, анализ содержания аргона и калия в породе позволяет судить о ее возрасте.

*Аргон является третьей после азота (78%) и кислорода (21%) основной составляющей воздуха, которым мы дышим (около 1%). О радиоактивном происхождении атмосферного аргона говорит тот факт, что его атомная масса составляет 40 единиц, в то время как в космосе наиболее распространенным является изотоп аргона с атомной массой 36. Большое содержание **радиогенного** (не радиоактивного, не бойтесь!) аргона в атмосфере — еще одно свидетельство почтенного возраста нашей планеты.*

Сам Резерфорд нашел геологические образцы, возраст которых достигал двух миллиардов лет. В настоящее время известны породы из Северной Канады (гнейсы Акаста) и Западной Австралии (цирконы Маунт-Наррьер) возрастом от 4 миллиардов до 4 миллиардов 200 миллионов лет. Это говорит о том, что уже в те далекие времена Земля имела твердые участки поверхности, сохранившиеся до наших дней. Современная же оценка времени формирования самой Земли, основанная на данных радиометрического анализа земных пород, а также метеоритов, составляет 4,65 миллиарда лет.

?? Почему для установления возраста Земли понадобилось изучать метеориты?

?? Почему вычисления Кельвина дали слишком маленькое значение возраста Земли?

?? Как получилось, что пресная речная вода сделала океан соленым?

1.6. Основной естественнонаучный парадокс эволюционной картины мира

Первая научная эволюционная картина мира — дарвинизм — в XIX веке так и осталась частной биологической картиной. Физика, бывшая тогда безусловным лидером естествознания, смотрела на мир совершенно иными глазами. Важнейшие физические и биологические концепции того времени не были даже взаимно нейтральными, поскольку

вытекавшие из них выводы о тенденциях развития природных процессов в корне противоречили друг другу. Это противоречие в конце концов и оформилось в **основной естественнонаучный парадокс эволюционной картины мира**.

Обратимость и детерминизм механической Вселенной

Вплоть до конца XIX века в физике преобладало **механистическое мировоззрение**, возникшее благодаря успехам классической ньютоновской механики и электродинамики **Джеймса**

Клерка Максвелла (1831–1879). Оно вообще отрицало существование какого-то выделенного направления природных процессов. В рамках этого мировоззрения все перемены, происходящие в мире, сводятся к перемещению тел и распространению электромагнитных волн. Механическое перемещение описывается уравнениями динамики, главное из которых — второй закон Ньютона — все проходили в школе; электромагнитные процессы — уравнениями Максвелла. И те, и другие безразличны к направлению, в котором течет время. Если направление времени в них изменить (в теории это делается очень просто: надо везде вместо символа t , обозначающего время, поставить $-t$), то их решения не изменятся. Уравнения, скажем, небесной механики будут предсказывать то же вечное движение планет по тем же орбитам и с теми же скоростями, только в обратном направлении. Таким образом, **в рамках механистического мировоззрения будущее ничем принципиально не отличается от прошлого**.

Кроме того, метод классической механики и электродинамики предполагал возможность, по крайней мере, потенциальную, решить уравнения движения точно и однозначно. Другими словами, **считалось принципиально возможным точно предсказать любое будущее событие** — хватило бы вычислительных способностей. Отсюда следовал философский вывод о том, что **если механическая картина мира справедлива, будущее не возникает, а осуществляется, будучи полностью определено прошлым**, подобно тому, как фотографическое изображение со всеми своими деталями уже есть на экспонированной, но еще не проявленной пленке.

Таким образом, мир классической физики существовал как бы сразу во все моменты времени в одной и той же неизменной форме, знакомой нам по нынешнему состоянию Вселенной.

В середине XIX века физическая тождественность прошлого и будущего впервые была поставлена под вопрос. Речь идет о целом ряде полученных тогда результатов, известных под собирательным названием второго начала (или закона) термодинамики.

Термодинамика и ее законы

Термодинамика — это физическая дисциплина, изучающая наиболее общие закономерности взаимного превращения различных форм энергии.

Физики сравнивают термодинамику со старой занудливой тетушкой, которая вечно брюзжит, учит всех жить и потому не пользуется ничьей любовью; но самое ужасное в том, что она всегда оказывается права. Нет хуже приговора для новой теории, к какому бы разделу физики она ни относилась, чем «Это противоречит законам термодинамики!». Никто из серьезных ученых больше не обратит на нее внимания — и правильно сделает. Во всем багаже достоверных научных фактов нет ни одного, который противоречил бы термодинамике. Так, термодинамика не допускает возможности вечного двигателя — и его нет, хотя изобретательством в этой области вот уже сотни лет занимаются одержимые всех стран.

Первый закон термодинамики был сформулирован в 40-х годах XIX века и широко известен — **это закон сохранения энергии**. Он гласит, что физическая величина, которая называется энергией и которая является мерой количества движения (движения в широком смысле, не только механического перемещения), не может бесследно исчезать, равно как не может возникать ниоткуда.

Первый закон термодинамики играет роль своего рода бухгалтера — он следит за тем, чтобы в любом процессе сошелся энергетический баланс: было энергии столько-то, отдано туда-то столько-то, осталось столько-то. Сумма чисел во второй и третьей колонках должна быть равна числу в первой колонке. Однако в любой фирме бухгалтер — лишь второе лицо; главным же

является тот, кто определяет **направление** расхода-
ния средств. Так вот,

общее направление превращений энергии во всех природных процессах определяется вторым законом термодинамики.

Второй закон термодинамики был впервые сформулирован **Рудольфом Юлиусом Клаузиусом (1822–1888)** в 1850 г. Именно «впервые сформулирован», поскольку — редкий случай! — второй закон имеет множество формулировок, на первый взгляд весьма различных. На самом деле все они полностью эквивалентны между собой. Если попытаться передать их общий смысл, получится примерно следующее:

Неизбежным результатом любых процессов, идущих в любой замкнутой системе, является сглаживание неоднородностей, разрушение упорядоченных структур, понижение сложности устройства системы и качества запасенной в ней энергии.

Подчеркнем, что этот закон — физический, и потому должен выполняться для любых материальных систем, в том числе для живых организмов и их сообществ. Вот тут и возникает парадокс.

Формулировка парадокса

С одной стороны, эволюционное учение утверждает, что с течением времени закономерно возникают все более сложные и целесообразно построенные системы — живые организмы. Учение обосновано фактами и логикой и является основой самого способа мышления в биологии. С другой стороны, имеется не менее обоснованная физическая теория, согласно которой все должно происходить наоборот, и «на самом деле» в развитии процессов в мире преобладает деградация, разрушение. Правота и Дарвина, и Клаузиуса — каждого по отдельности — подтверждается всей совокупностью накопленных научных знаний. И вместе с тем эволюционное учение и второе начало термодинамики кажутся противоречивыми, взаимоисключающими. В

этом заключается **основной естественнонаучный парадокс эволюционной картины мира.**

Осознание основного естественнонаучного парадокса эволюционной картины мира послужило поводом для воскрешения **виталистических** взглядов, согласно которым в живых организмах есть нечто такое, что обуславливает непреодолимую пропасть между ними и косной материей и позволяет им не подчиняться законам физики. Подобной точки зрения придерживался, например, такой выдающийся ученый, как основоположник геохимии и учения о биосфере **Владимир Иванович Вернадский (1863–1945).**

**Воскрешение
вигализма.
Взгляды
Вернадского**

Вернадский постулировал, что второй закон термодинамики (он называл его законом рассеяния энергии) действует только в неживой природе, а живым организмам присущ противоположный закон концентрации энергии. Он считал, что в силу этого закона живое вещество повышает качество проходящей через него энергии и способствует возникновению неоднородностей (например, рудных тел) и упорядоченных структур. Поскольку неживое вещество, согласно этим взглядам, такими свойствами принципиально не обладает *и не может их приобрести*, то отсюда логически вытекало, что жизнь является вечным, неуничтожимым и невозникшим явлением, что в свою очередь требовало признания вечности и неизменности Вселенной в целом.

Развитие конкретных научных знаний опровергло как гипотезу о неизменности Вселенной, так и представления о способности живого вещества нарушать физические законы — этого не было обнаружено ни в одном из бесчисленных экспериментов.

На самом деле парадокса, понимаемого как противоречие между **буквой** закона возрастания энтропии и закона биологической эволюции, не существует. Дело в том, что второй закон термодинамики устанавливается для **замкнутых** систем, то есть таких, которые не обмениваются с окружающим миром ни веществом, ни энергией. Однако **ни один живой организм принципиально не может рассматриваться как замкнутая система.**

**Разрешение
парадокса**

Непрерывный обмен веществ является необходимым атрибутом жизни. Если лишить живой организм возможности питаться, дышать, избавляться от отходов своей жизнедеятельности, он очень скоро перестанет быть живым.

То же самое можно сказать и о любом сообществе живых существ. Замкнутые экологические системы космических кораблей, которые часто описываются в фантастических романах, на самом деле не могут существовать бесконечно долго — по той же причине, по которой нет вечных двигателей. Если лишить их подпитки от внешнего источника, они, в полном соответствии с термодинамикой, деградируют. Вопрос лишь в том, на сколько растянется этот процесс деградации.

В экологии известен закон однонаправленности потока энергии сквозь экосистему. В формулировке Н. Ф. Реймерса он гласит: «Энергия, получаемая сообществом (биогеоценозом, экосистемой) и усваиваемая продуцентами, рассеивается или вместе с их биомассой необратимо передается консументам первого, второго и т.д. порядков, а затем редуцентам с падением ее потока на каждом из трофических уровней... [В результате] говорить о круговороте энергии нельзя». Не имея возможности здесь разобрать смысл каждого из употребленных специальных терминов, обращаю лишь внимание на устойчивый мотив: «однонаправленность», «рассеяние», «необратимо»...

Стоит отметить, что появление деградационных теорий характерно для ранних этапов формирования эволюционных взглядов в любой области человеческих знаний. Прежде чем стала общепринятой идея исторического прогресса, весьма популярным было убеждение, что обнаруженные в эпоху великих географических открытий дикие племена представляют собой выродившихся потомков некогда цивилизованных людей, и такая же судьба ждет все ныне культурные нации. Прежде чем биологической картиной мира стал дарвинизм, преобладали взгляды Кювье о неуклонной деградации изначального биологического разнообразия. Прежде чем физика, вслед за биологией и геологией, восприняла эволюционный подход к окружающему миру,

она также пережила этап абсолютизации роли деградиационных процессов.

- ?? Почему неприемлем механистический вывод о полной обратимости всех процессов?
- ?? Почему неприемлем механистический вывод о полном детерминизме всех процессов?
- ?? Почему невозможен вечный двигатель?
- ?? В чем суть второго закона термодинамики?
- ?? Выясните область научных интересов и значение трудов В.И. Вернадского.
- ?? Как формулируется и разрешается основной естественнонаучный парадокс эволюционной картины мира?

1.7. Эволюционное естествознание XX века и универсальный эволюционизм

История естествознания XX века — это история преобразования картины статичного, неизменного, а то и дряхлеющего мира в картину мира молодого, находящегося в процессе интенсивного развития, в процессе непрерывного появления новых форм и уровней организации материи; мира, в котором невозможно остановить мгновение, ибо тогда оно, лишённое движения и развития, теряет свою прелесть.

В 1912 году метеоролог **Альфред Вегенер (1880–1930)** на собрании Немецкого геологического общества сделал доклад, в котором доказывал, что движение земной коры не сводится к вертикальным смещениям и местным сжатиям, поднимающим горы. Нет, считал Вегенер, на протяжении истории Земли континенты перемещались по всей ее поверхности, дробились на фрагменты и объединялись вновь... Немецкие геологи, убежденные в том, что самым существенным изменением нашей планеты со времени ее образования было небольшое уменьшение размеров (контракция), обусловленное остыванием Земли и сопровождавшееся «сморщиванием» земной коры, подвергли доклад жесткой критике. Ответом на нее стала книга «Происхождение континентов и океанов», вышедшая в 1915 году и содержавшая целый комплекс геодезических, геологических и биологических аргументов в пользу концепции **мобилизма** (подвижности материков). Так, Вегенер обра-

**Теория
подвижности
материков**

щал внимание на то, что точные геодезические измерения свидетельствовали об изменении географических координат Гренландии, Европы, Мадагаскара и в современную эпоху. Он указывал на сходство, если не совпадение, геологического строения Африки и Южной Америки, а также на общность ископаемой *фауны* (животного мира) этих ныне разделенных материков. Вегенер показал, что палеонтологические данные свидетельствуют о значительном отличии климата прошедших геологических эпох от современного. Например, в южной Индии были обнаружены следы оледенения возрастом около **250** миллионов лет. Он объяснил это тем, что, дрейфуя по поверхности Земли, материка проходили разные климатические пояса.

Уточненная концепция Вегенера была встречена геологами благожелательно. Однако она имела большой недостаток по сравнению с дарвиновской теорией: она не предлагала реального **механизма**, который обеспечивал бы столь интенсивную эволюцию облика планеты. Поэтому, начиная с **20-х** годов, она постепенно отодвинулась на задний план и стала считаться скорее романтической фантазией, чем серьезной научной гипотезой.

В 1951 году редакция журнала «Известия Академии наук СССР», действуя в духе того времени, решила установить геологическую истину путем голосования. Ведущим советским геологом был задан ряд вопросов, в том числе: «Существовали ли горизонтальные перемещения материков как целого?». Ответ, опять-таки, в духе времени оказавшийся единогласным, был таким: «Большие горизонтальные перемещения материков в свете идей А. Вегенера заведомо не существовали».

Начиная с **60-х** годов, концепция мобилизма переживает свое второе рождение. Были, наконец, получены прямые доказательства того, что материка движутся, и весьма быстро. Точные измерения, выполненные со специально запущенного спутника **LAGEOS**, показали, что Австралия удаляется от Антарктиды на **7** сантиметров в год, Южная Америка от Африки — на **4**, Северная Америка от Европы — на **2**. Эти цифры кажутся ничтожно малыми, но будучи умножены на миллиарды лет геологической истории, они превращаются

в десятки тысяч километров и становятся сравнимыми с окружностью Земли.

На борту LAGEOS находится стальная пластинка, на которой выгравированы три карты земных континентов: как они располагались 225 миллионов лет назад, современная карта и предполагаемая картина через 8,4 миллиона лет. Спутник запущен на орбиту, на которой просуществует 8–9 миллионов лет, так что далекие потомки смогут проверить, насколько правы современные ученые.

Но самое главное заключается даже не в установленном факте движения материков, а в том, что был, в общих чертах, найден **геотектонический механизм**, обеспечивающий их подвижность. За счет работы этого механизма Земля представляет собой сложную динамическую (то есть существующую в движении) структуру, возникшую и развивавшуюся естественным путем — еще один пример широкомасштабного эволюционного процесса.

Прежде чем переходить к краткому обсуждению геотектонического механизма, напомним, что внутреннее строение Земли неоднородно. Под верхним, тонким и твердым, слоем земной коры находится мантия, свойства которой можно охарактеризовать как свойства невероятно вязкой жидкости — настолько вязкой, что если бы нам удалось зачерпнуть немного вещества мантии в банку, то вылить его из банки, наклонив ее, не удалось бы и за тысячу лет. Таким образом, с точки зрения человека, живущего всего несколько десятков лет, мантия находится в твердом состоянии. Однако если мыслить геологическими периодами длительностью в миллионы лет, мантия состоит из весьма текучего вещества.

Ниже мантии находится внешнее ядро, обладающее свойствами обычной жидкости, а в самом центре Земли — твердое внутреннее ядро. Чем глубже от поверхности, тем выше температура. В центре планеты она достигает **6500°C**.

Расслоение первоначально однородной планеты происходило за счет того, что более плотные вещества «тонули» и опускались к центру, а более легкие всплывали. Этот процесс продолжается и сейчас. На границе между мантией и ядром за счет высокой температуры происходят химические

процессы, похожие на те, что человек использует в металлургических печах: из соединений железа восстанавливается чистое железо. Будучи тяжелым веществом, железо тонет (так что внутреннее ядро нашей планеты в основном железное), а более легкий «шлак», образующийся в тех же реакциях, всплывает вверх, к земной коре. Возникает *конвекция* — явление, которое наблюдал каждый, кто заглядывал в чайник, подогревающийся на плите. И точно так же, как в чайнике, восходящие потоки более легкого и нагретого вещества должны компенсироваться нисходящими потоками более тяжелого и холодного, которое заполняет освобождающееся вниз место.

Восходящие и нисходящие потоки в мантии пространственно разделены. Поэтому у верхней ее границы, под земной корой, возникают горизонтальные потоки, направленные от точек выхода восходящих движений к зонам опускания вещества. Вот на этих-то горизонтальных потоках скользят *плиты*, на которых расположены материки Земли, подобно льдинкам, увлекаемым течением реки.

Всю мантию можно представлять себе как систему *конвективных ячеек*, в каждой из которых вдоль одной стенки вещество поднимается из недр и течет вдоль поверхности к другой стенке. Там оно опускается вниз и вновь возвращается к первой стенке. Таким образом, ***движение вещества в земных недрах упорядочено в пространстве***, и упорядоченность эта возникла естественным путем.

Размеры конвективных ячеек не могут быть ни слишком большими, ни слишком маленькими; как показывают уравнения, которыми в физике описывают течение жидкостей, они должны быть сравнимы с толщиной мантии. Но отсюда вытекает, что существовали они не всегда, ибо расчленение Земли на ядро, мантию и т.д. заняло какое-то время после формирования нашей планеты. По расчетам геофизиков, интенсивность конвективных потоков в мантии стала достаточно интенсивной, чтобы разломать первичную земную кору на отдельные плиты, когда Земле исполнился почти миллиард лет. И последующая геологическая история Земли отражает конвективные движения в мантии, которые, как выясняется, обладают достаточно строгой периодичностью. ***А периодичность — это упорядочен-***

ность во времени. Вновь мы сталкиваемся с самопроизвольным, естественным возникновением упорядоченности из однородного неупорядоченного состояния!

Итак, земная твердь оказалась вовсе не твердью, а скорее льдинкой, которая носится по воле волн, тает с одного края и растет с другого, — в общем, чем-то очень подвижным и изменчивым. Но в XX веке было выяснено, что не является вечной и неизменной и вся Вселенная.

Самым замечательным достижением великого ученого **Альберта Эйнштейна (1879–1955)** было, пожалуй, создание **общей теории относительности**, которую правильнее называть общей физической теорией пространства и времени. Выведя уравнения, описывающие свойства этих двух фундаментальных сущностей, Эйнштейн попытался применить их к описанию Вселенной в целом, ибо пространство и время охватывают всю протяженность Вселенной и всю длительность ее существования. Каково же было его удивление, когда обнаружилось, что его уравнения просто *не имеют решения, соответствующего стационарному миру*, миру, который не меняется с течением времени и существует вечно.

**Развивающаяся
Вселенная**

Эйнштейн был человеком достаточно консервативной закваски. До конца жизни он сохранил приверженность классической физической картине мира, в которой не было места естественному развитию, эволюции. Поэтому во имя спасения концепции вечной и неизменной Вселенной он сделал то, что впоследствии назвал величайшей ошибкой своей жизни. Он изменил свои уравнения, введя в них дополнительное слагаемое, которое не оправдывалось никакими известными тогда фактами, но позволяло получить решение с желаемыми свойствами.

Эта история лишний раз показывает, что и в науке человек остается человеком, со своими слабостями и с правом на ошибки. Величие же ученого проявляется в способности признать свою неправоту, если на первом месте для него стоит истина. Эйнштейн смог это сделать.

В естествознании никакое заблуждение не вечно. Тот же Эйнштейн говорил, что «господь бог изощрен, но не злонамерен», имея в виду, что природа, при всей ее слож-

ности, дает возможность получения истинных знаний о ее устройстве и законах. В 1929 году американский астроном **Эдвин Хаббл (1889–1953)** опубликовал результаты своих наблюдений, из которых однозначно следовало, что Вселенная действительно не остается неизменной, а расширяется. Отсюда вытекало и то, что в прошлом мог быть такой момент времени, когда ее размеры были равны нулю (или мало отличаться от нуля), и который естественно считать **моментом возникновения Вселенной**. Необходимость в изобретении искусственных подпорок для теории неизменного мира отпала, поскольку реальный мир оказался в самых больших масштабах изменчивым, развивающимся. Возникла новая естественнонаучная дисциплина — **космология**, — которая **изучает историю и механизмы развития Вселенной**.

Самоорганизация в простейших системах

В XX веке эволюционные представления проникли, наконец, в физику и химию. Было выяснено, *во-первых*, что даже простейшие физические и химические системы, описываемые несложными уравнениями, могут обладать весьма *сложным и непредсказуемым* поведением. Это обеспечивает разнообразие и случайность изменения существующих форм, необходимые для развития по дарвиновскому механизму. *Во-вторых*, были обнаружены многочисленные конкретные примеры **самоорганизации**, самопроизвольного возникновения упорядоченных структур на добиологическом уровне. Например, лазерное излучение, отличающееся от обычного света именно своей упорядоченностью (физики говорят — *когерентностью*), возникает именно в результате такого процесса самоорганизации, подчиняющегося естественным законам.

Иногда в ответ на пример с лазером можно услышать возражение: но ведь лазер придуман и построен человеком — какая же это самоорганизация? С таким же успехом можно назвать самоорганизацией строительство дома!

На самом деле степень участия человека в генерации лазерного излучения очень скромна. Если бы мы смогли до такой же степени уменьшить роль строителей в возведении здания, то технология строительного дела выглядела бы примерно так: привозим сто тонн порошка опре-

деленного состава, высыпает кучей, втыкаем в нее электроды, подаем высокое напряжение, и через несколько минут перед нами готовый дом.

Кстати, астрономы обнаружили, что некоторые яркие источники на звездном небе, регистрируемые радиотелескопами, представляют собой лазеры естественного происхождения — так называемые космические лазеры.

Наконец, в-третьих, в XX веке сформировалась новая научная дисциплина, **синергетика**, которая занялась

Предмет синергетики

систематизацией и построением общей теории процессов самоорганизации в живой и неживой природе. К настоящему времени в синергетике разработан универсальный язык описания эволюционных процессов, выяснены необходимые для них условия и установлен целый ряд присущих им общих закономерностей. Как водится, появление нового теоретического языка привело к тому, что самоорганизацию в окружающей природе стали видеть повсеместно — не потому, что раньше она не происходила, а потому, что раньше не было соответствующей концепции.

Многие вещи нам непонятны не потому, что наши понятия слабы, но потому, что сии вещи не входят в круг наших понятий.

К. Прутков. Афоризмы.

Водоворот, возникающий вокруг сливного отверстия ванны — это пример самоорганизации, с которой мы сталкиваемся на бытовом уровне. Похожие процессы в земной атмосфере приводят к возникновению циклонов и антициклонов — сложных упорядоченных структур, имеющих тысячи километров в поперечнике. А вот размеры циклона в атмосфере Юпитера, известного как Большое Красное пятно, составляют уже десятки тысяч километров, а существует он более двухсот лет.

По большому счету, и Солнце, и Солнечная система, и Земля с ее гео- и атмосферой — всё это сложные структуры, *самоорганизовавшиеся* в результате естественных физических, химических, а затем и биологических процессов из первоначальной бесформенной и бесструктурной газопылевой туманности.

Итак, наиболее интересные нам в окружающем мире вещи, да и мы сами, есть результат естественного закономерного развития. **Естественный прогресс оказывается всеобщим и подчиненным универсальным закономерностям.** Более того, эволюция не просто один из возможных типов процессов во Вселенной; она оказывается *способом существования* Вселенной — по крайней мере, той Вселенной, которую мы знаем. Эти фундаментальные выводы привели к формированию в конце XX века новой научной картины мира, в которой роль несущей конструкции и объединяющего начала играет **эволюционно-синергетическая парадигма.**

Парадигма — термин, введенный американским философом и историком науки **Томасом Куном** (1922–1996) в его знаменитой книге «Структура научных революций», вышедшей в 1963 г. Кун считает, что в истории науки можно выделить периоды революционные и периоды «нормальной» научной деятельности. Научные революции, согласно Куну, дают не только решения проблем, но и образцы постановки этих проблем и методов их решения. Вот эти образцы, схемы мышления он и назвал парадигмами. Термин оказался удачным, прижился и стал одним из наиболее употребительных в философии науки.

Универсальный эволюционизм Установленная в естествознании всеобщность эволюции и универсальность ее законов и механизмов не могла не привести к постановке вопроса о том, в какой мере развитие человеческого общества — наиболее сложной и совершенной из известных нам форм организации — подчиняется этим законам и использует эти механизмы. Данный вопрос является основным для нового научного направления, сформировавшегося в последние двадцать лет — **универсального эволюционизма.**

Универсальный эволюционизм исходит из того, что соотношение между социальной и предшествовавшими ей формами движения материи в главном такое же, как между биологической и химической, химической и физической формами движения. А именно, возникновение нового уровня организации:

- во-первых, не отменяет фундаментальных законов, управляющих процессами на более низких уровнях;
- во-вторых, из всех возможных процессов низкого уровня отбирает более узкий класс таких, которые обеспечивают максимально широкое разнообразие свойств однотипных элементов;
- в-третьих, на новом уровне организации возникают свои специфические законы, выражающие необходимые отношения между структурами этого уровня.

Например, химические реакции и возникновение сложных веществ стали возможными благодаря тому, что физические законы допускают существование нескольких десятков разновидностей атомов — однотипных по структуре, но весьма разных по свойствам «строительных кирпичиков» вещества. В свою очередь, возникновение живых организмов выделило из всех химических веществ несколько десятков органических соединений (аминокислоты и азотистые основания) — «строительных кирпичиков» для огромного количества разнообразных белков и ДНК, — а из всех химических реакций — реакции каталитические, причем такие, в которых основную роль играет не столько химический состав катализатора-фермента, сколько форма его молекулы. При этом фундаментальные законы физики и химии сохраняют свое значение и для живых организмов. Уверенность в этом позволяет ставить осмысленные вопросы, например, о том, в какой форме живая клетка запасает необходимую для ее жизнедеятельности энергию.

Возникновение социальной формы организации связано с превращением однотипных *особей* в яркие, неповторимые *личности*. Отношения между личностями описываются законами уже не химии и биологии, а психологии и обществоведения. Однако коль скоро естественное саморазвитие является фундаментальной природной закономерностью, то она должна работать и на социальном уровне. Признание этого положения позволяет ставить осмысленные вопросы о том, как общие закономерности самоорганизации, установленные в естествознании, проявляются в общественных процессах, и как здесь проявляется социально-психологическая специфика.

?? Каковы свидетельства в пользу подвижности земных континентов?

?? Каков механизм перемещения материков?

?? Почему Вселенная не может быть статичной?

?? Что такое «парадигма»?

?? В чем заключается основной вопрос универсального эволюционизма?

1.8. Литература к главе 1

1. Назаретян А. П. Интеллект во Вселенной. Очерки междисциплинарной теории прогресса. – М.: Недра, 1991. – 222 с.
2. Ле Гофф Ж. Цивилизация средневекового Запада. – М.: Изд. группа «Прогресс», 1992. – 376 с.
3. Свиридов В. В. Концепции современного естествознания. – СПб.: Питер, 2005. – 349 с.
4. Жизнь науки. Антология вступлений к классике естествознания. Сост. С. П. Капица. – М.: Наука, 1973. – 598 с.
5. Горбань А. С., Хлебопрос Р. Г. Демон Дарвина: Идея оптимальности и естественный отбор. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
6. История биологии с древнейших времен до начала XX века. Под ред. С. Р. Микулинского. – М.: Наука, 1972. – 564 с.
7. Лункевич В. В. От Гераклита до Дарвина: очерки по истории биологии. Тт. 1,2. – М.: Гос. учебно-педагогическое изд-во Министерства просвещения РСФСР, 1960 г.
8. Фишер Д. Рождение Земли. – М.: Мир, 1990. – 264 с.
9. Войткевич Г. В. Рождение Земли. – Ростов-на-Дону: Феникс, 1996. – 480 с.
10. Гаврилов В. П. Загадки геотектоники. – М.: Наука, 1988. – 192 с.
11. Гельфер Я. М. История и методология термодинамики и статистической физики. – М.: Высшая школа, 1969. – 475 с.

Глава 2. Биологический эволюционизм

Биология должна увлекать не меньше, чем какая-нибудь таинственная история, потому что она и есть некая таинственная история.

Р. Докинз

Эволюционная идея, согласно которой живые организмы, их строение и отношения между собой являются результатом длительного исторического развития, образует фундамент всей современной биологии. В свою очередь, современный биологический эволюционизм сам возник в результате эволюции своей первоначальной формы — дарвиновской теории происхождения видов путем естественного отбора. Пройденный при этом путь научного познания был достаточно извилист, и немало отошло от него тупиковых ветвей. Знакомство с ним позволяет составить представление о том, как непросто рождается даже самая стройная теория.

2.1. Возникновение дарвинизма

Дарвиновское учение относится к тем немногочисленным примерам фундаментальных научных теорий, которые были приняты большинством ученых практически сразу после своего возникновения. Этому способствовали как тщательность проделанной Дарвином работы по обобщению и синтезу огромного массива фактов из области геологии, биогеографии, зоологии, сравнительной анатомии, ботаники, сельскохозяйственной селекции, эмбриологии так и готовность общей европейской культуры середины XIX века к восприятию эволюционных идей.

*Над эволюционным учением Дарвин начал работать еще в начале 1840-х годов. Основная же идея о борьбе за существование как основной движущей силе прогресса в мире живого возникла, как он пишет в своей «Автобиографии», в 1838 году при чтении трактата «Опыт о законе народонаселения в связи с будущим совершенствованием общества» **Томаса Роберта Мальтуса (1766–1834)**. В своем труде, который можно считать первым научным сочинением по демографии, Мальтус доказывал,*

что скорость роста населения определяется только биологическими способностями человека и подчиняется закону геометрической прогрессии: каждый год численность людей увеличивается в определенное число раз. Между тем, средства к существованию растут лишь в арифметической прогрессии, то есть каждый год количество производимых продуктов питания и других предметов потребления увеличивается **на** одну и ту же величину. Это обстоятельство Мальтус объяснял действием **закона убывающей отдачи труда**, который подтверждается хозяйственным опытом (например, для увеличения урожая вдвое вложения в сельское хозяйство приходится увеличивать в гораздо большей степени, да еще получать при этом неизбежное ухудшение экологии). В результате рано или поздно ресурсов начинает не хватать на всех, что приводит к голоду, болезням и войнам, сокращающим народонаселение и приводящим его в соответствие с имеющимися средствами к существованию. Массовая гибель людей при этом рассматривалась Мальтусом не только как неотвратимое, но и как необходимое и даже желательное явление, обеспечивающее сносное существование выжившим. Эта позиция, справедливо квалифицированная как человеконенавистническая, получила широкую известность и заслонила собой те действительно ценные идеи, которые содержались в трактате. Кстати говоря, эти идеи оказались в большей степени применимы к миру неразумных созданий. Человек менее подвержен действию закона убывающей отдачи, поскольку способен, изобретая новые технологии, обеспечивать опережающий рост производительности труда. Кроме того, оказалось, что на по мере развития общества преобладающими становятся иные, не биологические ограничители естественного прироста. Благодаря им население развитых стран сейчас если и растет, то лишь за счет иммиграции.

Первоначально Дарвин планировал изложить свои взгляды в многотомном капитальном труде. Неизвестно, когда он был бы завершен, но в 1858 году выяснилось, что молодой натуралист **Альфред Рассел Уоллес (1823–1913)** независимо пришел к той же идее о механизме возникновения новых видов, хотя и не успел разработать ее так же основательно. Интересно, что и для Уоллеса одним из толчков к формулированию идеи естественного отбора послужило знакомство с книгой Мальтуса. Дарвин был вынужден поторопиться с опубликованием того,

что уже было готово, и в результате в 1859 году «*On the origin of species...*» увидела свет.

Эта история лишь раз иллюстрирует, что к тому времени создание эволюционной теории в биологии действительно созрело, а во-вторых, что оно было тесно связано с распространенными тогда более общими идеями о прогрессе, в том числе общественном, и его механизмах.

Несмотря на огромный объем проделанной Дарвином работы, он не мог, в силу ограниченности тогдашних знаний, дать одинаково убедительные доказательства всех положений своего учения. Так, например, он не располагал фактами, которые *прямо* подтверждали бы существование естественного отбора. Ему пришлось ограничиться рассмотрением искусственного отбора при выведении пород домашних животных, теоретическими соображениями о существовании аналогичного, но вызываемого естественными причинами, отбора в дикой природе и мысленными экспериментами, призванными иллюстрировать большое правдоподобие гипотезы о действии естественного отбора.

Что Дарвин не знал

Раздел, озаглавленный «Примеры действия естественного отбора», Дарвин в своей книге начинает так: «Для того, чтобы выяснить способ действия естественного отбора, как я его понимаю, я попрошу разрешения привести несколько вообразаемых примеров».

Как уже говорилось, Дарвин почти ничего не знал о наследственности и ее законах. Поскольку в своих работах он тщательно следил за тем, чтобы использовать лишь необходимый минимум предположений (иногда даже в ущерб своей теории и на руку не столь добросовестным оппонентам), то в «Происхождении видов» он ограничился общими представлениями о том, что особенности, присущие родительскому организму, в основном точно передаются потомству. На этом фоне он допускал двоякого рода изменчивость: *определенную*, в духе Ламарка, когда каждый организм меняется в одном и том же направлении, определяемом условиями жизни, и *неопределенную* индивидуальную изменчивость. Главную роль в процессе образования новых видов Дарвин отводил последней. Вопрос о природе и ме-

ханизмах наследственности продолжал его беспокоить до конца жизни, заставив выдвинуть идею *пангенезиса*. Согласно этой идее, передача наследственных признаков осуществляется за счет того, что все клетки тела выделяют микроскопические частички, которые собираются в половых клетках, ответственных за размножение. Похожих взглядов придерживался еще *Гиппократ* (ок. 460–377 до н.э.). Несостоятельность идеи выяснилась довольно быстро, и Дарвин, всегда внимательно прислушивавшийся к возражениям, отказался от нее.

По тому же слабому месту противники эволюционных представлений нанесли в 1867 году сильный удар, получивший название «*кошмара Дженкина*». *Флимин Дженкин (1833–1885)* указал, что, если даже благодаря неопределенной изменчивости организм приобретет новый полезный с точки зрения естественного отбора признак, то в каждом из его потомков этот признак, учитывая вклад другого родителя, должен быть выражен вдвое слабее, в следующем поколении — еще вдвое слабее, и так далее.

О чрезвычайно широком интересе всех образованных людей того времени к дебатам вокруг эволюционного учения говорит тот факт, что Ф. Дженкин был крупным специалистом по физике и технике изоляции морских кабелей. Он приложил немало усилий для введения стандартной единицы электрического сопротивления — ома. Через год после выхода своей работы, вошедшей в историю дарвинизма, Дженкин занял должность профессора технических наук в Эдинбурге.

За два года до выступления Дженкина была опубликована работа основоположника экспериментальной генетики *Грегора Иоганна Менделя (1822–1884)*, которая давала возможность убедительно опровергнуть возражение о «размывании» новых признаков. К сожалению, труды Менделя оставались неизвестными научному сообществу вплоть до начала следующего века. А тогда чуть ли не единственным способом избавления от «кошмара Дженкина» выглядело предположение, что для возникновения нового вида небольшая группа изменившихся особей обязательно должна быть изолирована от «нормальных» особей, на-

пример, за счет миграции на другую территорию. Этот вывод породил еще одно направление в теории эволюции, которое считало изоляцию единственным необходимым условием видообразования.

?? В чем заключался вклад Дарвина в теорию эволюции в мире живого?

?? Какие вопросы теории ему не удалось разрешить в то время?

2.2. Развитие эволюционной идеи в XIX веке

Как следствие быстрой победы общей идеи биологической эволюции и указанных выше неизбежных пробелов в ее дарвиновской формулировке, в течение второй половины XIX века было выдвинуто несколько десятков вариантов эволюционной теории. Иногда отношения между теорией Дарвина и ними представляют как борьбу единственно верного и непогрешимого учения против недобросовестных ересей. В действительности все эти теории внесли, в конечном счете, свой вклад в формирование современного биологического эволюционизма: одни — дополняя и развивая далее эволюционное учение, другие — заставив более строго и четко доказывать основные положения дарвинизма, третьи — поставив вопросы и проблемы, исследование которых ускорило формирование эволюционной биологии.

Множественность эволюционных теорий

Даже между наиболее верными последователями Дарвина имелись разночтения в понимании эволюционного процесса.

«Как каждая большая планета имеет своих спутников, так и каждое крупное учение имеет своих апостолов. Верные учению его основателя, они намечают в то же время те пути, по которым в дальнейшем пойдет это учение, а также те толки, на которые оно разобьется в будущем. Это замечание вполне приложимо и к учению Дарвина».

Ю. А. Филипченко.

Альфред Уоллес, чья работа с изложением идеи об образовании новых видов путем естественного отбора была

Альфред Уоллес и неodarвинизм

опубликована в том же выпуске журнала, что и первая печатная заметка Дарвина по этому вопросу, безоговорочно признал приоритет Дарвина и всю свою жизнь последовательно защищал и разрабатывал далее основы дарвинизма. Сам термин «дарвинизм» во многом обязан вышедшей под этим названием в 1889 году монографии Уоллеса.

Он нашел факты в пользу существования естественного отбора *в природе*, обратив внимание, что возникновение покровительственной окраски у животных и растений не может быть объяснено практически никак иначе. Уоллес категорически отрицал возможность прямого (по Ламарку) влияния условий окружающей среды на возникновение полезных признаков, в то время как сам Дарвин осторожно говорил лишь о меньшей роли «упражнений» по сравнению с естественным отбором. Другими словами, если для Дарвина естественный отбор был главным фактором эволюции, то для Уоллеса — единственным. Дополненные исследованиями **Августа Вейсмана (1834–1914)**, согласно которым наследование приобретенных признаков «не только не доказано, но и не мыслимо теоретически», взгляды Уоллеса стали основой **неодарвинизма** — направления, которое считало единственно возможным механизмом эволюции через естественный отбор признаков, возникших благодаря неопределенной изменчивости.

Эрнст Геккель и ламаркодарвинизм Большую роль в распространении дарвиновского учения сыграл **Эрнст Геккель (1834–1919)**. Геккель особенно ценил в эволюционном учении его мировоззренческую сторону — возможность логичного и последовательного объяснения причин целесообразности живого, многообразия форм живых существ и одновременно очевидной общности их строения и состава. Характерно название его книги, посвященной этим вопросам: «Естественная история мироздания».

Однако Геккель считал, что общая теория эволюции была создана Ламарком, а Дарвин лишь дополнил ее теорией естественного отбора. Вместо термина «изменчивость» он предпочитал говорить «приспособление», причем понимал его по Ламарку: «Все признаки, которые организм приобрел путем приспособления во время своей жизни и кото-

рыми не обладали его предки, при благоприятных условиях могут передаваться потомкам». Движущую силу эволюции Геккель сводил к борьбе между наследственностью, заставляющей организм быть во всем похожим на предков, и изменчивостью, которая, будучи поддержана действием естественного отбора, заставляет приспособляться к изменяющимся условиям жизни. Подобные взгляды, согласно которым естественный отбор лишь *способствует* прямому формированию организмов окружающей средой, получили название **ламаркодарвинизма**.

Склонность к общетеоретическим рассуждениям позволяла Геккелю не замечать слабости фактических свидетельств в пользу наследования приобретенных признаков. Другим примером того же рода является выдвинутый им без достаточного обоснования *биогенетический закон*, согласно которому зародыш любого высшего животного в своем развитии проходит стадии, отвечающие формам его далеких предков. Эмбриологи уже тогда знали, что зародышей можно сравнивать лишь с зародышами же, а не со взрослыми организмами. Тем не менее, на основе биогенетического закона, а также сравнительной анатомии и палеонтологии сформировалось целое направление т.н. *филогенетических* исследований, ставившее своей целью построить полное «генеалогическое древо» всех животных и растений. Сам Геккель насчитывал **22** стадии в эволюционной истории, приведшей от гипотетического элементарного микроорганизма — монеры — через амёбу к лемурам, длиннохвостым, человекообразным обезьянам и к человеку.

*Натурфилософский подход Геккеля тогда не вызывал особых возражений. В первые годы после выхода «Происхождения видов» внимание биологов было занято не столько скрупулезной проверкой деталей дарвиновской и других эволюционных теорий, сколько прослеживанием их далеких следствий. Подобные исследования можно сравнить с попытками сбора урожая с дерева, которое еще не пустило корней. Тем не менее, богатство выдвинутых Геккелем идей заслуживает уважения. Их разработка (которая иногда превращалась в их опровержение) принесла много ценных результатов. Между прочим, именно Геккель ввел в 1869 году понятие **экологии** как науки об общих отношениях организма к окружающему миру.*

Ламаркизм

Довольно многие биологи второй половины XIX века, приняв общую идею эволюции, по тем или иным причинам не признавали главенствующей роли естественного отбора, считая, что последнего либо вообще не существует, либо он не играет существенной роли. Поскольку в дарвинизме двигателем прогресса служит именно естественный отбор, отказ от его рассмотрения приводил к необходимости найти какие-то другие движущие силы эволюции, и чаще всего для этого воскрешались идеи Ж. Ламарка. Так возникло направление, известное как **ламаркизм**.

Согласно ламаркистской концепции, организмы изменяются только в «полезном» направлении, причем слово «полезный» часто употреблялось в смысле, близком к общепринятому: «удовлетворяющий осознанную потребность». Сам Ламарк считал, например, что для видоизменения животного большое значение имеют его желания, привычки и усилия воли. Некоторые из его последователей шли дальше, наделяя психикой и сознанием (а, значит, и способностью «хотеть») всё живое. Эти **психоламаркисты** полагали, что сознание предшествовало возникновению жизни и рассматривали биологическую эволюцию как процесс простого увеличения роли сознания в управлении материей. Те же, кто не впадал в такие крайности, для объяснения прогрессивного характера и необратимости эволюции обычно принимали гипотезу о наличии в каждом организме некоей внутренней силы, которая вынуждает его изменяться в сторону совершенствования, повышения уровня организации. К ламаркизму обычно относят концепции, в которых эта гипотетическая сила мыслится как природный фактор, задающий лишь общее направление эволюции. Однако логическое развитие таких представлений неизбежно приводило к **телеологическим концепциям**, согласно которым эволюция есть движение к заранее заданной и строго определенной цели (например, к созданию венца творения — человека), причем в крайних вариантах и путь к этой цели объявлялся заданным и единственным. Естественно, автором грандиозного плана развития мог быть только Бог; поэтому в эволюционизме телеология (учение о

цели), как и обычно, оказалась тесно связана с теологией (учением о Боге).

Ламаркистские представления о постоянном приспособлении всех организмов к условиям существования почти неизбежно влекли за собой вывод о том, что видообразование — процесс постепенный и непрерывный, происходящий без ускорений, замедлений и скачков. Но тогда кто скажет, начиная с какого момента можно считать, что возник **новый** вид? Сколько и каких отличий между разновидностями должно накопиться, чтобы они стали разными видами? Поэтому ламаркисты пытались доказать относительность самого понятия «вид», доказать, что **таксоны**¹ переходят друг в друга настолько незаметно, что любые границы между ними можно провести лишь условно.

**Проблема
определенности
вида**

Дарвин относился к таким попыткам отрицательно. Он разделял идею своего сподвижника **Томаса Генри Гексли (1825–1895)** о *персистировании* (англ. **persist** — упорствовать, продолжать существовать, сохраняться), согласно которой за эволюционными находками, приводящими к образованию нового таксона, следует более спокойный период, когда темп эволюции снижается. Найденный удачный комплекс признаков оказывается достаточным для эффективного выживания в течение длительного времени.

Существование четко различающихся систематических групп отстаивали и сторонники тех недарвиновских эволюционных концепций, в которых считается, что изменение признаков, приводящее к возникновению новых видов или более крупных таксонов, происходит резко, скачком. Такие концепции объединяются термином «**сальтационизм**».

Сальтационизм

*Слово «сальтационизм» — производное от латинского корня, обозначающего прыжок, подпрыгивание. От того же корня произошло «сальто». Известно латинское выражение **natura non facit saltum** («природа не делает скачков»), которое использовал Дарвин.*

¹ Таксон — общее название для систематических единиц: видов, родов, классов, типов¼

Так, немецкий эмбриолог **Рудольф Альберт Кёлликер (1817–1906)**, в работе 1864 г. предложил *теорию гетерогенного зарождения*, согласно которой новые таксоны возникают, когда время от времени «живые существа производят из своих зачатков других, отличающихся от них», и отличающихся существенно.

*...Родила царица в ночь
Не мышонка, не лягушку,
А неведому зверушку.*
А. С. Пушкин

В обоснование своей теории он приводил эмбриологические данные: «Например, зародышу млекопитающего достаточно сделать лишь небольшой шаг в том или другом направлении при его развитии, чтобы произвести совсем другую форму, имеющую более крупный череп, больший мозг и т.д.». Кроме того, Кёлликер обращал внимание на известные биологам факты нарушения принципа «подобное из подобного»: родителем гидроидной медузы, например, является полип, который, в свою очередь, порождается медузой. Время и обстоятельства событий, приводящих к возникновению новых форм живого, согласно Кёлликеру, определяются неким неизвестным, но господствующим над всей природой законом развития.

В 1871 году вышла книга английского зоолога *Сент Джорджа Джексона Майварта (1827–1900)* «Об образовании видов», в которой теория Дарвина была подвергнута критике. Во-первых, говорил автор, естественный отбор не может объяснить начальных стадий возникновения полезных приспособлений у животных, поскольку слабо выраженные изменения не могут быть полезными. Во-вторых, есть такие приспособления (например, крыло птицы), для которых вообще трудно представить начальные или промежуточные стадии развития. Наконец, в-третьих, по его мысли, если допустить неопределенный, случайный характер изменчивости, то каждое изменение в одном направлении вскоре должно быть нейтрализовано противоположно направленными изменениями. Единственный возможный путь разрешения этих проблем Майварт видел в признании того, что новая форма живого сразу приобретает все свои

отличительные особенности в законченном виде. Поскольку при этом неизбежно возникает вопрос о причине очевидной приспособленности организмов к условиям жизни, Майварту пришлось допустить существование пресловутой внутренней силы, толкающей эволюционный процесс в сторону совершенствования.

Сегодня возражения Майварта против дарвиновской теории почти буквально повторяют креационисты. Правда, в отличие от него, они делают отсюда вывод о невозможности эволюции вообще. Самое интересное заключается в том, что несостоятельность аргументов Майварта успел подробно и убедительно показать сам Дарвин, включив соответствующий раздел в одно из последних прижизненных изданий «Происхождения видов».

Подводя итог, можно сказать, что и общество в целом, и научное сообщество к моменту выхода книги Дарвина были готовы к восприятию идеи естественного прогресса в природе. Именно поэтому сама концепция эволюции очень быстро получила общее признание, а выступления ее противников были сравнительно немногочисленны, несоординированы и неубедительны. Однако восприятие эволюционной идеи не столько как предмета научного исследования, сколько как общекультурного и философского феномена имело и свои оборотные стороны. Вместо наблюдений и экспериментов, многочисленные эволюционные теории того времени зачастую обосновывались общими соображениями, рассуждениями по аналогии и чрезмерно широкими обобщениями отдельных фактов.

?? Какие недарвиновские эволюционные концепции высказывались в XIX веке?

?? Что можно возразить на аргументы сторонников лamarкизма? Сальтационизма?

?? Найдите в книге «Происхождение видов», как Дарвин отвечал на аргументы Майварта.

2.3. Становление эволюционной биологии

В то время как кипели страсти вокруг высоких материй, эволюционная идея проникала и в более конкретные биологические исследования. При этом

Соотношение дарвинизма и альтернативных эволюционных концепций

эволюционный подход позволял систематизировать ранее разрозненные факты, что способствовало решению узкоспециальных проблем. С другой стороны, результаты специальных исследований пополняли копилку доказательств правоты Чарлза Дарвина. Полуторавековая история биологического эволюционизма показывает, что многие известные факты можно объяснить и с помощью недарвиновских эволюционных теорий, но только дарвинизм и его преемница — **синтетическая теория эволюции** — согласуются со всем массивом наблюдений и экспериментов.

«Ни один из новейших естествоиспытателей, пытавшихся выступить со своей теорией на смену дарвинизма, не охватывал вопрос во всей его совокупности,... как это сделал Дарвин. Каждый останавливался на одной какой-нибудь стороне вопроса, умышленно или неумышленно упуская из вида остальные».

К. А. Тимирязев, 1910 г.

Создание естественной системы живого **Филогенетические исследования**, вдохновленные Э. Геккелем и ставившие целью проследить крупномасштабную эволюцию, которая привела к формированию современных видов, реализовали мечту основателя биологической систематики (**таксономии**) **Карла Линнея (1707–1778)** о разработке *естественной системы* живых организмов. Таксономическая классификация стала пониматься как генеалогическое древо; принадлежность видов к одному роду, семейству, классу и т.д. — как свидетельство их более или менее близкого родства. Естественное объяснение многих своих закономерностей получила **сравнительная анатомия**.

Установление закономерностей в палеонтологии Вторая половина XIX века — время крупных палеонтологических открытий. Пополняются ряды ископаемых организмов. Становится возможным детально проследить изменение форм древних существ с течением времени. В **1861** году находят *археоптерикса*, имевшего признаки как пресмыкающегося, так и птицы, а в **1897** — останки обезьяночеловека, *питекантропа*.

Русский зоолог **Владимир Онуфриевич Ковалевский (1842–1883)** закладывает основы *эволюционной па-*

леонтологии. В серии статей 1873–1877 гг. он, исходя из теории Дарвина, реконструирует эволюцию копытных животных.

Ковалевский не просто отмечает, как именно они изменялись, но прослеживает, как вынужденная смена лесного местообитания на степное закономерно, через естественный отбор, приводит к эволюции мелких четырехпалых животных с зубами, приспособленными к кусанию, в одно- и парнопалых крупных животных со сложными перетирающими зубами. Он показывает, что уменьшение числа пальцев, увеличение размеров тела и некоторые другие изменения могли возникнуть только как реакция на постоянную угрозу нападения хищников на открытой местности.

Ковалевский показал, что при не слишком жесткой борьбе за существование эволюция наиболее важных для выживания органов (для копытных это были пальцы и зубы) сопровождается согласованной перестройкой всех остальных частей организма (скелета, мускулатуры, нервной и пищеварительной систем). Такое преобразование он назвал **адаптивной эволюцией**. Если же интенсивность естественного отбора возрастает, эволюция может приобрести темп, слишком высокий, чтобы весь организм успевал изменяться вслед за критическим органом. При такой, по терминологии Ковалевского, **инадаптивной эволюции** нарушается согласованность организма в целом, что в перспективе отрицательно сказывается на судьбе вида. Такой вид (например, тапиры), может просуществовать долго, лишь если случайно останется без конкурентов и врагов.

При изучении палеонтологического материала был сформулирован (1893) один из важнейших эволюционных законов — **закон необратимости эволюции Луи Доло** (1857–1931):

Организм (вид) не может хотя бы частично вернуться к предшествующему состоянию, уже осуществленному в ряду его предков, даже вернувшись в среду их обитания.

Когда предки современных морских млекопитающих вернулись в водную среду обитания, у них произошло не

восстановление рыбьих плавников, а формирование принципиально новой системы передвижения с использованием, например, лап. Жабры также не восстановились, зато значительной и сложной перестройке подверглась физиология организма, что дало возможность надолго задерживать дыхание.

**Эволюционные
эмбриология,
физиология,
биогеография**

Были заложены основы **эволюционной эмбриологии** животных, основанной на факте удивительного сходства в строении и путях развития зародышей совершенно разных организмов. Наиболее простое объяснение этого обстоятельства заключается в признании общего происхождения всех животных.

Илья Ильич Мечников (1845–1916) стал основателем **эволюционной физиологии**, открыв внутриклеточное пищеварение у низших беспозвоночных и проследив развитие пищеварительной функции от деятельности отдельных специализированных подвижных клеток до образования истинного пищеварительного тракта у более высокоорганизованных животных. Он же показал, что параллельная ветвь этого процесса привела к формированию одной из систем иммунной защиты организма — фагоцитов, которые поглощают болезнетворных бактерий.

В те же годы эволюционной наукой стала **биогеография**. Состав и особенности современного животного и растительного мира регионов Земли начали толковаться на основе эволюционно-экологического подхода, с прослеживанием истории приспособления живущих в регионе видов к его географическим условиям и их взаимодействия друг с другом.

*Очень многие вопросы в биологии приобретают смысл только в рамках эволюционной гипотезы. Почему, например, заяц летом серый, а зимой белый? Естественный ответ: «Чтобы быть менее заметным на окружающем фоне». Однако заяц не может менять окраску осознанно! Поэтому ответ будет содержательным, только если мы сможем объяснить, как **возникло** это приспособление.*

Вообще, вопросы «почему?» и «зачем?» в биологии правомерны лишь при условии, что мы согласны с идеей эволюционного развития. Есть, конечно, альтернатива,

предлагаемая креационистами, которые считают, что всё живое (и неживое) создано Богом. Но тогда ответы на все вопросы «почему?» звучат однообразно и не слишком интересно: потому, что так предусмотрено Богом. Дарвин, человек верующий, в одном из писем восклицал: «Не верится, что всемогущий и милосердный всевышний нарочно создал ихневмонов для единственного предназначения: паразитировать в организмах гусениц и пожирать их изнутри, а кошек — чтобы охотиться за мышами».

Стали предприниматься попытки экспериментального исследования деталей эволюционного процесса. Одним из первых экспериментаторов-эволюционистов был сам Дарвин,

Экспериментальные исследования эволюционного процесса

высоко ценивший прямые доказательства, основанные на конкретных фактах. Огромный фактический материал по строению растений содержится в его книге «Действие перекрестного опыления и самоопыления в растительном мире». Этот материал позволил объяснить многие особенности строения цветков, которые оказались приспособлениями для переноса пыльцы. Изучив с этой точки зрения цветки орхидей, Дарвин предсказал существование на Мадагаскаре бабочек с хоботком длиной до 30 см, ибо только таким хоботком можно было добраться до нектара, спрятанного в цветке звездной орхидеи. Спустя несколько лет такая бабочка действительно была обнаружена!

Опытную проверку вопроса о том, действительно ли наблюдаются отклонения от статистической нормы, предпринял **Френсис Гальтон (1822–1911)**. Он собрал большой материал о росте родителей и детей в современных ему семьях. Кроме того, он поставил опыт по выяснению того, как зависят размеры семян душистого горошка от размеров семян родительских растений. Для обработки своих данных Гальтон применил методы математической статистики, заложив основы *биометрии*. Оказалось, что отклонения и роста людей, и размера семян горошка от средних значений наследуются, но наследуются частично (**закон регрессии Гальтона**): например, детям в среднем передается две трети отклонения родительского роста. Этот результат предполагал необходимость естественного отбора для образования новых форм, поскольку только постоянная отбра-

ковка «среднестатистических» особей может обеспечить рост числа особей с отклонением от нормы, которое, в конце концов, становится новой нормой.

Интересно, что именно Гальтон экспериментально опроверг гипотезу Дарвина — своего двоюродного брата — о пангенезисе (стр. 52). Он переливал кровь от белых кроликов черным. Если бы в ней, как предполагал Дарвин, содержались микрочастички, переносящие информацию о клетках всего организма в половые клетки, то у черных кроликов должно было бы рождаться белое потомство, чего ни разу не наблюдалось.

В самом конце XIX века развернулось экспериментальное изучение естественного отбора. В. Уэлдон обнаружил, что ширина головогруды крабов Плимутской бухты уменьшилась после постройки мола. В классической работе, опубликованной им в 1898 году, была высказана гипотеза, что это вызвано меньшей выживаемостью особей с широкой головогрудью в условиях, когда ил, поднимаемый со дна винтами кораблей, застаивается в замкнутой акватории бухты. Проверка гипотезы на крабах, помещенных в специальный аквариум, в котором постоянно взмучивался ил, показала, что у крабов с узкой головогрудью действительно гораздо меньше шансов погибнуть из-за того, что их жаберные полости забиваются илом.

Опыты других авторов продемонстрировали, что куколки бабочки-крапивницы менее всего истребляются птицами, если помещаются на листья крапивы, а не, скажем, на древесную кору. Этот результат сейчас может показаться банальным, но в то время споры о значении защитной окраски протекали настолько бурно, что такие эксперименты оказались необходимыми.

Трудности интерпретации

Надо отметить, что результаты экспериментальных исследований не всегда были столь прозрачны. Часто в них обнаруживались явления и эффекты, для понимания которых еще не имелось теоретической базы. Например, исследования показали, что при пониженной температуре из куколок одного вида выводятся бабочки с окраской, характерной для другого вида. Сейчас биологам понятно, что в этих опытах было обнаружено проявление так называемого сезонного поли-

морфизма, не связанное с видообразованием, а тогда подобные данные толковались в ламаркистском духе, как свидетельства возникновения нового вида в результате прямого действия окружающей среды и без участия естественного отбора.

К подобным выводам пришел и В. И. Шманкевич, изучавший влияние изменения солености воды в одесских лиманах (вызванного прорывом плотин в результате весеннего паводка) на живущих там рачков. В своей работе 1875 г. он сообщил, что содержание соленоводных рачков в течение нескольких недель в опресненной воде приводит к появлению у них признаков, характерных для пресноводных видов (изменяются размеры тела, число и форма сегментов брюшка). Лишь в 1912–1913 гг. более аккуратная проверка выяснила, что эти признаки не являются устойчивыми и наследуемыми: помещение измененных рачков опять в соленую воду восстановило их исходную форму. Поскольку одним из основных атрибутов эволюционного процесса является **необратимость**, такие видоизменения лишь иллюстрируют большую пластичность живых организмов, их способность к **обратимым модификациям**, не выходящим за пределы **нормы реакции** на изменение внешних условий. Однако дело было сделано, и несколько десятилетий данные Шманкевича рассматривались как убедительный аргумент в пользу ламаркистских взглядов на проблему происхождения видов.

Еще большую известность приобрели опыты французского физиолога **Шарля-Эдуарда Броун-Секара (1817–1894)**, который искусственно вызывал различные заболевания и травмы у морских свинок, а затем среди потомства наблюдал отдельных больных или дефектных особей. Хотя прямой зависимости между характером повреждений родительского организма и вероятностью появления потомства с определенным дефектом не было установлено, эти результаты также были объявлены свидетельством наследования экспериментальных повреждений и вызвали целый поток аналогичных работ.

- ?? В каких направлениях развивались эволюционные исследования в XIX веке после Дарвина?
- ?? В каких условиях происходит адаптивная, а в каких – инадаптивная эволюция?
- ?? В чем заключается закон необратимости эволюции?
- ?? Как разворачивались экспериментальные исследования эволюционных процессов?

2.4. Возникновение генетики и генетический антидарвинизм

Понимание законов наследственности и изменчивости к началу XX века основывалось, главным образом, на спекулятивных¹ умозаключениях, слабо подкрепленных прямыми доказательствами. Положение дел здесь мало изменилось после выхода книги Дарвина. Однако если в середине XIX века это не вызывало ощущения неудобства, то спустя полвека данная проблема уже воспринималась как ключевой момент эволюционных исследований — будь то «за Дарвина» или «против».

Открытие дискретной природы наследственности История экспериментальной генетики начинается с имен Менделя, *Карла Эриха Корренса (1864–1933)*, *Эриха фон Чермак–Зейзенегга (Чермака, 1871–1962)* и голландского ботаника *Гуго де Фриза (1848–1935)*.

Де Фриз в конце восьмидесятых годов XIX века пришел к заключению, что существует два вида неопределенной изменчивости: индивидуальная, или флуктуирующая, благодаря которой хоть немного, да отличаются друг от друга даже близнецы, и «видообразовательная», или мутационная, изменчивость, которая и ответственна за образование новых видов. Для проверки этой гипотезы он в течение 15 лет разводил растение, известное как энотера (или свеча) Ламарка, отделяя в каждом поколении нетипичные особи и проверяя затем устойчивость присущих им признаков в следующих поколениях. В опытах по гибридизации нетипичных форм с нормальными он переоткрыл законы Менделя, установив тем самым **дискретный характер наследственности — главное положение генетики**.

Благодаря этому открытию дарвиновская теория навсегда избавилась от «кошмара Дженкина». Новый признак не растворяется среди нормальных особей, подобно щепотке соли в океане. Нет, новый признак ведет себя как черная

¹ Слово «спекулятивный» здесь не имеет отношения к перепродаже по повышенной цене, а является калькой с английского **speculative** (умозрительный). Ср. **speculate** — делать предположение, размышлять.

фасолина в мешке с белой фасолью: рано или поздно она будет вынута из мешка ничуть не побелевшей.

Новые признаки, которыми обладают устойчивые нетипичные формы, возникают в результате *мутаций*. Де Фриз дал первое определение этого понятия: **мутация** — **элементарное, внезапное, качественное, устойчивое изменение единицы наследственности**. Мутации **дискретны**, они не бывают частичными или незавершенными.

Среди выращенных им пятидесяти тысяч растений энотеры де Фриз смог выделить семь разных форм, стойко передающих своему потомству высоту куста, форму и окраску листьев и жилок.

Исследовав множество других растительных видов и получив похожие результаты, он пришел к выводу, что каждый природный вид на самом деле представляет собой смесь «чистых» форм, каждая из которых в процессе смены поколений воспроизводит только присущие ей признаки — пока не случится та или иная мутация.

**Генетическая
структура вида.
«Чистые
формы»**

*Эти «чистые» формы назывались подвидами, элементарными видами, или жорданонами (по имени французского ботаника Алексиса Жордана (1814–1897), впервые выдвинувшего гипотезу о том, что особенности строения конкретного растения являются сочетанием признаков из некоторого неизменного набора, не зависящего от окружающей среды). Современные биологи предпочитают пользоваться более точным термином: **гомозиготы**.*

Представление о том, что каждый вид в генетическом смысле состоит из множества элементарных видов и их гибридов позволило по-новому взглянуть на результаты многих экспериментов, толковавшихся в пользу ламаркистских концепций. То, что считалось свидетельством непосредственного влияния условий жизни на возникновение новых видовых признаков, зачастую оказывалось изменением численных соотношений между подвидами в пользу того из них, для которого изменившиеся условия оказались наиболее благоприятными. Однако тем же орудием был нанесен удар и по дарвинизму.

Антидарвинистские аргументы Иогансена

В 1903 году появилась работа датского биолога **Вильгельма Людвиг Иогансена (1857–1927)** «О наследовании в популяциях и в чистых линиях». В ней, на основе тщательно поставленного эксперимента по отбору фасоли на размеры семян в 6–7 поколениях, было показано, что если используется генетически однородный материал (представители чистого элементарного вида), то никакого сдвига признаков в направлении отбора не происходит. Средний размер фасолин, выращенных как из мелких, так и из крупных семян, оказывается одним и тем же, а весь разброс их размеров — обусловленным индивидуальными обстоятельствами жизни.

Расхождение своих данных с результатами Гальтона (с. 63) Иогансен объяснял тем, что Гальтон работал со случайным собранием особей одного вида. Отбор на таком материале просто приводит к постепенному выделению одного из элементарных видов, более других удовлетворяющего критерию отбора. После того как процесс выделения завершится, прекратится и обусловленный отбором сдвиг среднестатистической нормы. Таким образом, заключал Иогансен, **в пределах генетически однородного материала отбор бессилён создать что-то новое**, и, следовательно, генетика отрицает дарвиновскую теорию.

Работа Иогансена произвела большое впечатление на биологов. Его результаты вскоре были подтверждены экспериментами на других растениях, а также на простейших, кишечнополостных, насекомых... Многие согласились и с выводом, что эти результаты отвергают творческую роль естественного отбора, хотя он опирался на **недоказанное** и, как выяснилось впоследствии, **не соответствующее действительности предположение, что природные виды генетически однородны**. И это была только первая ласточка двадцатилетней острой конфронтации между генетикой и дарвинизмом. Впрочем, в равной мере генетики не жаловали и ламаркистские концепции.

Причины конфронтации ранней генетики и дарвинизма

В чем же причины неприятия представителями новой биологической дисциплины классического эволюционного учения?

Общий ответ хорошо известен из истории познания. Всякий раз, как человек создавал новый мощный метод, открывал принципиально новый, богатый возможностями подход к исследованию окружающего мира, первое время возможности этого подхода абсолютизировались и преувеличивались. Древним грекам, открывшим абстрактное теоретическое мышление, казалось, что все истины можно и должно вывести чисто логическим путем. Последователи Ньютона считали возможным всё в мире свести к механике, рассчитав траекторию движения каждого атома. А пионеры генетики полагали, что строгие и простые, проверяемые числом и проверяемые беспристрастным экспериментом законы генетики делают ее независимой от «устаревших» классических представлений и самодостаточной для решения любых биологических проблем, в том числе проблемы развития мира живых существ.

Де Фриз предложил собственную **Мутационизм** эволюционную теорию, заявив, что для эволюции достаточно одних *видообразовательных мутаций*. Новые виды, утверждал он, появляются не путем накопления и отбора мелких изменений, а сразу, в результате «больших» мутаций, происходящих редко и внезапно, под действием особой «созидательной силы». Поскольку направление мутаций определяется случаем, новый вид не обязан быть лучше приспособленным. Борьба за существование и естественный отбор у него играют не созидательную, а разрушительную роль, приводя к исчезновению уже готовых видов, оказавшихся приспособленными к условиям жизни менее других.

Де Фриз полагал, что «способность к мутациям наступает периодически» (восьмой закон де Фриза), и даже привел оценку длительности межмутационного периода: 4000 лет. Обоснованием этой оценки было соображение о том, что целый ряд известных нам видов не изменился со времен египетских фараонов. Полагая, что возраст Земли, по Кельвину, составляет 24 миллиона лет, он вывел, что за это время могли сменить друг друга 6000 поколений живых существ, — вполне достаточно, по его мнению, для возникновения сложных современных организмов из начальных простейших форм. Уже современники де Фриза (например, русский зоолог Михаил Алексан-

дрович Мензбир (1855–1935)) критиковали эти рассуждения, указывая, что они являются отходом от научного принципа опоры только на точные проверенные факты.

Предложенная де Фризом теория эволюции относится к разновидности сальтационизма — **мутационизму**. Мутационистские воззрения, помимо признания только внезапных, скачкообразных видоизменений, характеризуются сведением процесса развития к видообразовательной изменчивости.

Концепция гибридогенеза

На основе ранних представлений генетики были предложены еще две эволюционные теории, которые, по мысли их авторов, должны были прийти на смену дарвинизму, ламаркизму и другим классическим концепциям. Теория **гибридогенеза**, предложенная **Уильямом Бэтсоном** (1861–1926) и **Яном Паулусом Лотси** (1867–1931), принимала в качестве постулата положение об абсолютной неизменности гена (которое, как сейчас установлено, не соответствует действительности).

Термин «ген» для обозначения элементарной дискретной единицы, «атома» наследственности, существование которой вытекало из дискретного характера видообразовательных мутаций, был введен В. Иогансеном в работе 1909 года.

Коль скоро гены не подвержены изменению, то можно считать их элементарными строительными кирпичиками, из которых путем комбинирования получаются все существующие и существовавшие формы живого. Лотси сравнивал гены с химическими элементами, а виды — с устойчивыми химическими соединениями. То, что воспринимается как мутации и видообразование, тогда лишь проявления процесса **гибридизации**, комбинирования генов. На самом же деле, как считал Лотси, число «истинных видов» неизменно, подобно тому, как с течением времени не изменяется число химически возможных окислов железа. Точка зрения Бэтсона была более пессимистической: он полагал, что в ходе эволюции происходит постоянное обеднение изначально богатого генофонда за счет вымирания видов-носителей редких генов.

Более гибкой и впоследствии использованной при создании современной теории эволюции оказалась **теория преадаптации**, в первоначальной

Теория предвосхищающих адаптаций

форме предложенная **Люсьеном Клодом Кено (1866–1951)**. Он обратил внимание на то, что ряд признаков у существующих видов очевидно бесполезен с точки зрения естественного отбора. Поскольку в классическом варианте дарвинизма существование «бесполезных» признаков игнорировалось, Кено заявил, что в таком случае дарвиновская теория неверна в принципе. Взамен он предположил, что к образованию новых видов приводят достаточно крупные мутации, образующие органы, которые поначалу организму не нужны. Лишь *впоследствии*, при изменении условий жизни, может выясниться полезность этих органов, и тогда они будут сохранены естественным отбором. Суть идеи преадаптации выражается краткой формулой: «структура возникает раньше функции».

Преадаптационизм фактически является развитием мутационной теории де Фриза: мутационно возникают не только виды целиком, но и отдельные структуры организмов. И в том, и в другом случае естественный отбор не отрицается, но играет скромную роль отбраковщика неудачных **готовых результатов**. В дарвинизме же отбор участвует **в процессе возникновения** вида.

Существовали и такие варианты мутационистских взглядов, согласно которым мутации происходят не случайно, а в строгом порядке, согласно некоему грандиозному плану развития: возникающие сейчас новые признаки отвечают необходимости, которая должна появиться в будущем. Появление таких взглядов еще раз свидетельствует, что **естественный отбор остается единственной концепцией, способной объяснить естественными причинами целесообразность устройства существующих организмов и прогрессивный характер эволюции**. Любая попытка отказаться от признания ключевой роли естественного отбора неизбежно приводит к возникновению не поддающихся объективной проверке и научному анализу концепций «направляющей силы», «изначального плана развития», и т.д.

?? Что такое ген? Мутация? Жорданон?

?? В чем состоят основные положения генетики?

?? Перечислите разновидности антидарвинистских эволюционных концепций ранней генетики. В чем заключались ошибки их создателей?

2.5. Синтетическая теория эволюции

Кризис дарвинизма в начале XX века

Первая четверть XX века — это период серьезного кризиса дарвинизма. Некоторые его ключевые моменты (существование и характер действия естественного отбора, механизмы наследственности, природа и проявления неопределенной изменчивости) оставались все еще гипотезами, весьма правдоподобными теоретически, но недостаточно подкрепленными наблюдениями и экспериментами. Более того, ввиду сложности и многофакторности эволюционного процесса экспериментальные результаты с трудом поддавались однозначному толкованию, даже когда их удавалось получить.

Например, биометрические исследования изменчивости обыкновенных ос показали, что трудные условия жизни (зимовка) уменьшают размах отклонений выживших особей от статистической нормы. Это было воспринято как свидетельство против способности естественного отбора вызывать образование новых форм. Потом стало понятно, что естественный отбор имеет различные формы и может, в частности, проявляться именно как стабилизирующий фактор, когда форма вида соответствует занимаемой им экологической нише. Но, как говорит Михаил Жванецкий, «все бы были такие умные, как моя жена потом».

С другой стороны, отношения между классическими эволюционными концепциями и генетикой, зарекомендовавшей себя как математически точная дисциплина, дающая надежные и воспроизводимые экспериментальные результаты, поначалу были весьма напряженными. Лишь в 30-х годах обозначился перелом, который в конечном счете привел к **интеграции дарвиновского эволюционного учения, генетики и экологии в синтетическую теорию эволюции.**

Начало поворота от конфронтации между дарвинизмом и генетикой к их объединению обычно связывается с работой отечественного энтомолога и генетика **Сергея Сергеевича Четверикова (1880–1959)** «О некоторых моментах эволюционного процесса с точки зрения современной генетики», вышедшей в 1926 году. В ней было показано, что плодовая мушка дрозофила — любимый объект генетиков — в природе представляет собой вид, очень неоднородный с генетической точки зрения, причем генофонд его не только очень богат, но и постоянно включает в свой состав всё новые мутации, прошедшие сито естественного отбора. Четвериков привел убедительные доказательства того, что это не случайность, а нормальное состояние для любого вида. Тем самым была продемонстрировано, что заключение о бессилии естественного отбора на генетически однородном материале (с.68) не имеет отношения к реальным природным популяциям.

**С.С. Четвериков
и советская школа
в генетике**

*В 20-е и 30-е годы советская школа генетиков вместе с американской занимала ведущие позиции в мире. Помимо С. С. Четверикова, в СССР работали первоклассные генетики **Николай Константинович Кольцов (1872–1940)**, **Николай Владимирович Тимофеев-Ресовский (1900–1981)**, **Феодосий Григорьевич Добжанский (1900–1975)**, **Николай Иванович Вавилов (1887–1943)**. К сожалению, на пути развития науки встали политические обстоятельства. Стали возникать трудности у тех, кто не мог похвастаться пролетарским происхождением. В 1927 г. покидает страну Добжанский (в современных энциклопедиях он — «американский генетик»). В 1929 г. ссылают в Нижний Новгород ошельмованного Четверикова. Дальнейшие несчастья отечественной генетики связаны с именем ловкого политического приспособленца Т. Д. Лысенко, сумевшего в течение 30 лет быть в фаворе у высших руководителей страны. В ходе развернутых Лысенко интриг был расстрелян самый влиятельный из советских генетиков Н. И. Вавилов, а после печально известной сессии ВАСХНИЛ (Академии сельскохозяйственных наук) 1948 года генетика была просто запрещена партийным постановлением. Интересно, что, по свидетельству историка науки Лорена Грэхэма, большую роль в неприязни Лысенко к генетике сыграло полное*

отсутствие у него математических способностей, необходимых для понимания результатов этой науки.

**Создатели
синтетической
теории
эволюции**

Четвериков оказался не одинок. В начале тридцатых годов выходят одна за другой фундаментальные работы американского статистика и генетика **Рональда Эйлера Фишера (1890–1962)**

«Генетическая теория естественного отбора», английского биохимика и генетика **Джона Бердона Сандерсона Холдейна (1892–1964)** «Факторы эволюции», советских генетиков **Николая Петровича Дубинина (1907–1998)** и **Дмитрия Дмитриевича Ромашова (1899–1963)** «Генетические основы строения вида и его эволюции», американского генетика **Сьюэлла Райта (1889–1982)** «Эволюция в менделевских популяциях»... В этих работах с использованием генетических законов и математических методов была намечена постановка задачи о **микроразвитии** (с. 81), то есть об элементарных процессах видообразования, и получены первые результаты ее решения. Обобщение этих результатов и увязка их с достигнутыми успехами в понимании **макроразвития** (эволюции, рассматриваемой в более крупном масштабе, чем изменение отдельного вида), выполненные в трудах Ф. Добжанского, **Ивана Ивановича Шмальгаузена (1884–1963)**, Н.В. Тимофеева–Ресовского, **Джулиана Сорелла Хаксли (1887–1975)**, **Эрнста Уолтера Майра (1904–2005)**, **Джорджа Гейлорда Симпсона (1902–1984)**, **Джорджа Ледьярда Стеббинса (1906–2000)**, позволили вывести дарвиновское учение из кризиса и, обогатив его новыми идеями и результатами, создать классическую **синтетическую теорию эволюции (СТЭ)**. С начала 1940–х гг. стартует период триумфального распространения СТЭ, напоминающий столь же быстрое признание ее предшественницы — теории Дарвина — после выхода «Происхождения видов».

Случайно или нет, но синтетическую теорию эволюции создавали исключительно яркие незаурядные личности. Перипетии жизненного пути Н.В. Тимофеева-Ресовского побудили известного писателя Данила Гранина создать увлекательный роман «Зубр». Когда в Ис-

паници произошел фашистский путч, профессор Дж. Б. С. Холдейн бросил работу в своей лаборатории и отправился защищать Мадрид от франкистов. Английский биолог Джулиан Хаксли, внук сподвижника Дарвина Т. Гексли (изменилась не фамилия, а нормы передачи иностранных имен в русском языке), был первым генеральным директором ЮНЕСКО — Организации Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*). Когда Хаксли занял этот пост, организация называлась ЮНЕКО: буквы «С», представляющей науку (*science*), в названии не было. Хаксли стоило большого труда доказать, что наука — необходимая часть культуры и поставить букву «С» на законное место. Кстати, своим названием синтетическая теория эволюции обязана Хаксли: его книга с изложением основ СТЭ, вышедшая в 1942 году, имела заглавие «Эволюция: современный синтез».

Основные положения классической СТЭ заключаются в следующем.

1. Каждый биологический вид имеет сложную иерархическую структуру. Основная структурная единица вида — популяция.

Популяция — основная структурная единица вида

Популяция — совокупность особей одного вида, свободно скрещивающихся между собой, в течение большого числа поколений населяющих определенное пространство с относительно однородными условиями обитания и отделенная от подобных групп той или иной формой изоляции.

В свою очередь, популяция тоже имеет сложную структуру. В ней можно выделить половые и возрастные группы; возможны также пространственные и близкородственные объединения особей, а также морфы (группы особей, отличающихся по внешнему облику).

2. **Целостность и замкнутость вида поддерживаются его репродуктивной изоляцией:** особи

Поток генов в популяции

одного вида могут скрещиваться и давать потомство, особи разных видов — как правило, нет. При скрещивании произ-

ходит комбинирование генов родительских особей, благодаря чему внутри вида поддерживается общий поток генов. Новый ген, возникнув у отдельной особи, вливается в этот поток и может распространиться по всем популяциям и подвидам данного вида.

**Генотип
и фенотип**

3. Соотношение между **генотипом** и **фенотипом** особи сложное и непрямолинейное.

Генотип — это совокупность всех наследственных задатков особи.

Фенотип — это совокупность всех внешних и внутренних признаков и свойств особи, сформировавшихся в процессе индивидуального развития

Во-первых, генотип содержит по два варианта (**аллеля**) каждого гена, но на фенотип влияние оказывает, в основном, только **доминантный** аллель. **Рецессивный** аллель при наличии доминантного остается «молчащим», не проявляется в фенотипе организма, но, будучи передан потомству, может проявиться в последующих поколениях.

Во-вторых, путь развития яйцеклетки во взрослый организм настолько сложен и извилист, что даже при одинаковом генотипе возможны бесчисленные варианты фенотипа, обусловленные индивидуальными обстоятельствами жизни.

В-третьих, естественный отбор идет по фенотипу. Это ограничивает влияние отбора на «молчаливые» рецессивные аллели и обеспечивает разнообразие генофонда популяции и вида. За исключением редких особых случаев (**клонов**), не существует двух особей с идентичным генотипом.

Источник новых генов — мутации

4. Генофонд вида постоянно пополняется новыми генами, возникающими в результате случайных, мелких, дискретных изменений наследственности — мутаций.

Экспериментальные исследования показали, что отдельный ген действительно весьма устойчив к мутациям. Так, мутация, обуславливающая устойчивость кишечной палочки к стрептомицину, возникает менее чем у одной бактерии из миллиарда. Однако поскольку число генов у особи достаточно велико (десятки тысяч для не слишком

примитивных организмов), вероятность того, что взятая наугад особь несет *какую-нибудь* мутацию, довольно высока. Например, вновь возникшие в данном поколении мутации у дрозофилы несут 25% половых клеток, у львиного зева — 15%, у мышей и крыс — около 10%.

Частота возникновения мутаций *в расчете на особь* стабильна, если только популяция не начинает вдруг испытывать действие *мутагенных факторов* (ионизирующие излучения, химические вещества, вирусные инфекции). Поэтому количество мутантных генов возрастает с ростом численности особей данного вида.

5. Помимо мутаций, генофонд популяции может изменяться также благодаря периодическим колебаниям численности особей (*популяционным волнам*) или *генетическому дрейфу*.

Другие факторы изменения генофонда

С популяционными волнами люди знакомы издавна. Например, численность мышей-полевков каждые 4 года возрастает, а затем падает почти до нуля. Известны записи одной канадской компании, скупавшей у охотников шкурки зайцев и рысей в течение почти ста лет. По этим записям очень хорошо видны резкие (в диапазоне от 5 до 150 тысяч добытых заячьих шкурок) колебания численности животных с периодичностью 10–12 лет. Впервые оценил значение популяционных волн для эволюции С.С. Четвериков в своей работе 1905 года, называвшейся «Волны жизни». С развитием генетики идеи Четверикова были уточнены.

В период резкого спада численности популяции, некоторые мутации полностью исчезают вместе с гибелью их носителей. В то же время те редкие мутации, которые *случайно* сохранились в генотипах выживших особей, становятся менее редкими, поскольку «растворены» теперь в значительно уменьшившейся популяции. Аналогичный механизм работает, когда малочисленные популяции возникают по другим причинам, например, в новых местах обитания при расширении *ареала* вида. В этом случае *изменение относительных распространенностей аллелей, вызванное усилением роли случайных факторов в малой популяции, называют генетическим дрейфом.*

Изменение генофонда вида благодаря мутациям, волнам численности и генетическому дрейфу — это чисто случайный процесс, не имеющий какого-либо выделенного, предпочтительного направления.

Формы
естественного
отбора

6. Единственный направляющий фактор эволюции — естественный отбор.

Существуют различные формы отбора. Классическая форма, которую имел в виду Дарвин, — **движущий отбор**, выступающий как творческая сила эволюции. При движущей форме отбора происходит отсеивание особей, соответствующих среднестатистической норме, по определенному признаку. Они замещаются особями, которые имеют другое среднее значение этого признака. В результате с течением времени изменяется само понятие нормы. Именно движущим отбором обусловлено быстрое возникновение у болезнетворных микроорганизмов устойчивости к любому новому антибиотику.

Если условия жизни длительное время остаются неизменными, то отбор, наоборот, отсеивает отклонения от найденной в ходе эволюции оптимальной формы. Это — **стабилизирующий отбор**, благодаря которому сохранились такие реликтовые формы, как близкая родственница первых динозавров гаттерия и кистеперая рыба латимерия — живой образец древних переходных форм между рыбами и наземными животными, которые (формы) считались исчезнувшими **300** миллионов лет назад.

Предельной формой стабилизирующего отбора является абсолютная нежизнеспособность носителей особенно нежелательных мутаций. По некоторым медицинским данным, у человека до двух третей зародышей гибнут до рождения (более половины начавших развиваться эмбрионов не доживают до двухнедельного возраста). При этом большинство выкидышей вызвано наличием у плода мутаций в числе и форме хромосом. В наименее тяжком варианте такой мутации ребенок может появиться на свет живым, но будет страдать неизлечимым заболеванием — синдромом Дауна. Именно благодаря такой форме стабилизирующего отбора, как внутриутроб-

ная смертность, рождаются в основном генетически здоровые дети.

Дестабилизирующий отбор позволяет виду приспособляться к расширению занимаемой экологической ниши за счет большего разнообразия фенотипов принадлежащих к нему особей. **Разрывающий, или дизруптивный, отбор** возникает, когда отклонения от средней нормы как в одну, так и в другую сторону оказываются лучше приспособленными, чем особи со средними характеристиками. При этом возникают две или более отчетливо различающиеся формы внутри вида, которые со временем

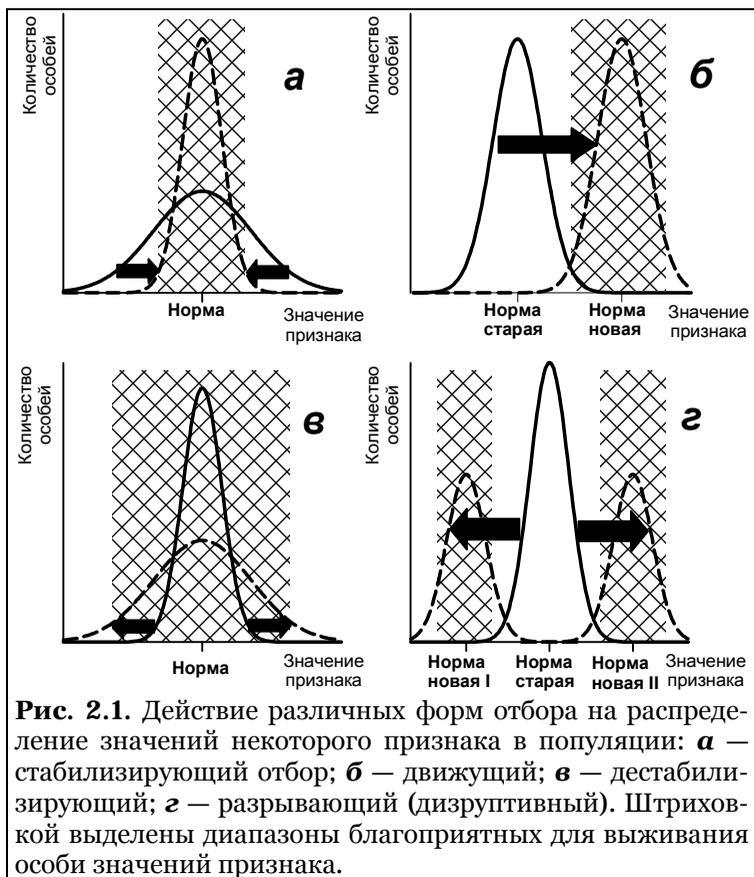


Рис. 2.1. Действие различных форм отбора на распределение значений некоторого признака в популяции: **а** — стабилизирующий отбор; **б** — движущий; **в** — дестабилизирующий; **г** — разрывающий (дизруптивный). Штриховкой выделены диапазоны благоприятных для выживания особи значений признака.

могут, с помощью **изоляции**, образовать независимые популяции, а впоследствии — и виды.

Популяция как элементарная эволюционирующая единица

7. Наименьшая структурная единица живого, которая может эволюционировать — популяция.

Это одно из наиболее существенных отличий СТЭ от классических эволюционных концепций. В ламаркистском подходе способностью к развитию с последующим закреплением в потомстве приобретенных признаков обладает *каждый организм*. Да и само понятие вида, как уже говорилось (стр. 57), Ламарк и его последователи считали достаточно условным. Мутационистские концепции предполагали, что новый вид возникает, как только появляется *особь*, несущая видообразовательную мутацию. В классическом дарвинизме *организмоцентричность* эволюционного процесса не защищалась, но и не отрицалась особо.

В СТЭ в качестве элементарного эволюционного процесса рассматривается изменение генного состава популяции. Изучением этого процесса занимается особая биологическая дисциплина — *популяционная генетика*.

Дивергентность эволюции

8. Эволюция носит дивергентный характер («дивергенция» означает «расходимость»). Это означает, что,

в отличие от большинства *организмов*, каждый *вид* происходит от единственного предкового вида. Сам же он может стать предком нескольких разных видов.

Постепенность эволюции

9. Эволюция — длительный и постепенный процесс.

Видообразование представляет собой процесс последовательной смены длинной череды популяций.

Соотношение макро- и микроэволюции

10. В отличие от ряда ранних эволюционных концепций, в СТЭ считалось, что макроэволюция, то есть возникновение таксонов более

высокого ранга, чем вид, идет лишь путем микроэволюции, то есть путем возникновения новых видов, все более отличающихся от предковых форм и, как следствие, друг от друга. Это положение

ние имеет и более обязывающую формулировку: не существует закономерностей макроэволюции, отличных от микроэволюционных.

11. Эволюция непредсказуема и ненаправлена. Она не имеет какой-то заданной конечной цели.

Непредсказуемость эволюции

Этот вывод СТЭ основан на положениях о случайном и ненаправленном характере процессов, поставляющих материал для естественного отбора (мутации, популяционные волны, генетический дрейф).

Перечисленные основные положения синтетической теории эволюции были сформулированы в тридцатых–сороковых годах XX века и оказались, в основном, верными. Дальнейшее развитие биологических знаний внесло в них лишь некоторые уточнения. Главным же вкладом второй половины XX века в теорию биологической эволюции стало *расширение* последней за счет лучшего понимания молекулярных основ жизни и наследственности (с.108).

- ?? В каком отношении находятся между собой классический дарвинизм и синтетическая теория эволюции?
- ?? Почему работа С.С. Четверикова 1926 г. считается поворотным пунктом от конфронтации генетики и дарвинизма к их объединению?
- ?? Что такое популяция? Генотип? Фенотип?
- ?? Какие факторы определяют изменение генофонда популяции?
- ?? Какую роль играют различные формы естественного отбора?
- ?? В чем заключается положение СТЭ о дивергентном характере эволюционного процесса? Попытайтесь представить себе, какого рода данные могли бы поставить это положение под сомнение.

2.6. Микроэволюция. Популяционная генетика

Ядром, вокруг которого кристаллизовалась синтетическая теория эволюции, стало учение о микроэволюции. Вот как определяет это важнейшее понятие Н. Ф. Реймерс в «Популярном биологическом словаре»:

Микроэволюция — эволюционные преобразования внутри вида на уровне популяций..., ведущие к внутривидовой дивергенции и видообразованию.

Происходит на основе мутационной изменчивости под контролем естественного отбора. Масштаб времени микроэволюции — сотни, чаще тысячи лет.

Общая генетика и популяционная генетика

В свою очередь, теория микроэволюции опирается, прежде всего, на **популяционную генетику**.

История **общей генетики** начинается с момента, когда Мендель обнаружил расщепление гибридов гороха по признаку окраски семян в постоянном соотношении **3:1**. Объяснение этого факта сейчас известно каждому школьнику. Генотип гороха содержит два аллеля гена окраски семян. Если в генотипе одного родительского организма присутствуют два одинаковых аллеля *A*, дающих желтую окраску, а у второго — два аллеля *a*, приводящих к зеленой окраске, то у их прямого потомка с **равной вероятностью** возможны четыре варианта генотипа: *AA*, *Aa*, *aA* и *aa*. Первый и четвертый варианты — это **гомозиготы**, имеющие желтую и зеленую окраску семян соответственно. Цвет семян у **гетерозигот** *Aa* и *aA* определяется доминантным аллелем, которым для гороха является аллель *A*. Поэтому все гетерозиготы будут иметь желтые семена, что и приводит, в конечном счете, к соотношению **3:1** в пользу растений с желтыми семенами.

Популяционная генетика в качестве начальных условий рассматривает не два гомозиготных организма, а популяцию, состоящую из многих особей, среди которых в определенной пропорции присутствуют как гомозиготные, так и гетерозиготные, и которые к тому же скрещиваются неконтролируемым образом. Тем не менее, оказывается, что и в этом случае несложно определить численную пропорцию между ними.

*Пусть, например, в популяции имеются лишь два возможных аллеля определенного гена: доминантный *A* и рецессивный *a*. Пусть генетический состав популяции таков, что случайно выбранный аллель этого гена у наугад взятой особи с вероятностью $p = 0,9$ является доминантным, *A*. Соответственно имеется вероятность $q = 1 - p = 0,1$ того, что этот аллель окажется рецессив-*

ным, а. Величины p и q называются частотой встречаемости соответствующего аллеля.

Для того, чтобы особь имела гомозиготный генотип AA , в нем должны случайно сойтись два аллеля A . По теории вероятностей, вероятность сложного события AA равна произведению вероятностей составляющих его элементарных событий A , то есть $p \cdot p = 0,81$. Таким образом, **81%** всех особей популяции будут гомозиготами AA . Аналогично, вероятность гомозиготы aa будет равна $q \cdot q = (1-p)^2 = 0,01$, то есть таких особей в популяции всего **1%**. Оставшиеся **18%** популяции ($1 - p \cdot p - q \cdot q = 2pq = 0,18$) будут гетерозиготами Aa .

Между числом гомозигот и гетерозигот в популяции имеет место пропорция

$$AA : (Aa + aA) : aa = p^2 : 2pq : q^2,$$

**Закон
и равновесие
Харди–
Вайнберга**

где p и q — частоты встречаемости аллелей A и a данного гена в популяции. Это соотношение называется законом Харди–Вайнберга.

Закон назван в честь независимо сформулировавших его английского математика **Годфри Харолда Харди (1877–1947)** и немецкого генетика **Вильгельма Вайнберга (1862–1937)**.

Г. Харди придерживался взглядов, согласно которым математика представляет собой чистую абстракцию, возникающую в человеческом разуме и не обязанную описывать объекты реального мира. Известны его высказывания о том, что настоящая математика должна быть бесполезной. История сыграла с Харди довольно злую шутку, сделав наиболее широко известным из его достижений закон Харди–Вайнберга, который он сам считал тривиальным решением элементарной задачи. Говорят, что о проблеме численного соотношения разных генотипов в популяции ему рассказал один из пионеров генетики Реджиналд Крэндолл Пеннет (1875–1967) во время совместной игры в гольф, и Харди решил эту задачу между двумя ударами, не подозревая, что именно в этот момент обессмертил свое имя среди биологов.

Применить закон Харди–Вайнберга для непосредственного расчета доли гомо- и гетерозигот в популяции уда-

ется не часто, поскольку частоты встречаемости аллелей, p и q , все равно заранее неизвестны. Однако из него вытекают очень важные следствия.

Следствие 1. В отсутствие внешних воздействий численное соотношение между различными генотипами в популяции остается неизменным из поколения в поколение.

Действительно, рассмотрим вопрос о том, какой будет частота встречаемости аллеля A в нашей популяции в следующем поколении. При половом способе размножения организм производит половые клетки — **гаметы**, — каждая из которых обладает лишь одним аллелем из двух, имеющихся в генотипе организма. Поэтому аллель A будут нести все гаметы гомозигот AA , что составляет **81%** от общего числа гамет, и половина гамет, произведенных гетерозиготами Aa и aA , то есть **18%:2=9%**. В общей сложности получаем **81%+9%=90%**, то есть частота встречаемости аллеля A и в следующем поколении останется равной **0,9**.

Следствие 1 дает основание говорить о равновесии Харди–Вайнберга.

Следствие 2. Частота встречаемости редкого рецессивного аллеля всегда больше доли особей, у которых соответствующий признак проявляется внешне.

Действительно, пусть частота встречаемости рецессивного аллеля a составляет $q = 0,1$ (**10%**). Тогда доля гомозигот aa , у которых он только и проявится внешне, будет равно $q^2 = 0,01$ (**1%**). Остальные **99%** особей в популяции будут иметь фенотип, определяемый доминантным аллелем A . Таким образом, рецессивный аллель будет очень незначительно проявляться внешне. Однако его носителями будут многие особи: к **1%** гомозигот aa прибавляются **18%** гетерозигот aA , что дает в общей сложности почти пятую часть популяции. Различие между распределением генотипов и фенотипов тем больше, чем реже встречается рецессивный аллель в общем генофонде популяции.

Реальным примером редкого рецессивного аллеля является аллель **a** человеческого гена пигментации, приводящий к альбинизму (отсутствию пигментации). По статистике, один альбинос (с генетической точки зрения представляющий собой гомозиготу **aa**) приходится на 20000 человек. Другими словами, частота генотипа **aa** в данном случае составляет $q^2 = 1/20000 \approx (1/141)^2$. Отсюда $q = 1/141$, то есть в генофонде человеческой популяции рецессивным является 1 аллель данного гена из 141. Поскольку же в генотипе каждого человека имеются два аллеля, это означает, что носителем гена альбинизма (не альбиносом!) является каждый семидесятый.

Закон Харди–Вайнберга является основой (физик сказал бы — нулевым приближением) популяционной генетики, но он в точности выполняется лишь для идеализированной ситуации, когда:

- популяция бесконечно велика, и потому случайными отклонениями от средних частот встречаемости генов и генотипов можно пренебречь;
- существует свободное скрещивание особей в пределах популяции;
- отсутствует естественный отбор, из-за которого выживаемость и плодовитость особи зависит от ее генотипа;
- не происходит возникновения новых аллелей и новых генов в результате мутаций;
- отсутствует миграция особей из других популяций.

В природе таких ограничений не существует. Поэтому в реальных популяциях постоянно происходят изменения генофонда, изучение которых и составляет предмет популяционной генетики. О факторах, вызывающих такие изменения, принято говорить, что они **оказывают давление** на популяцию. Давление внешних факторов в конечном счете приводит к **элементарному эволюционному явлению — длительному и направленному изменению генофонда популяции.**

Исходный материал для микроэволюции обеспечивается постоянным **давлением мутационного процесса** на генофонд популяции. В упоминавшейся на с. 73 работе С. С. Четвериков, исходя из закона

**Мутационное
давление на
генофонд**

Харди–Вайнберга, показал, что любая популяция, как губка, впитывает в свой генофонд все возникающие рецессивные мутации, оставаясь при этом внешне неизменной.

*Действительно, если в большой популяции появился один гомозиготный мутант **aa**, то все его потомки будут гетерозиготами **Aa**, внешне неотличимыми от преобладающей формы **AA**. В дальнейшем аллель **a** сможет «выплыть наружу» только в случае нового появления гомозиготы **aa**. Однако для этого требуется, чтобы случайно скрестились два носителя аллеля **a**, а вероятность такой встречи очень мала из-за редкости аллеля. Другие рецессивные мутации тоже сразу переходят в гетерозиготное состояние и остаются в генофонде популяции, поддерживаемые равновесием Харди–Вайнберга и не подвластные естественному отбору, поскольку они не проявляются в фенотипе.*

Мутации происходят непрерывно. Кроме того, количество *разных* возможных мутаций ограничено, хотя и велико. Широко известен такой пример: генетики изучили в общей сложности более двух миллиардов дрозофил, и ни у одной мухи не наблюдалось синей или зеленой окраски глаз. Другим проявлением *дискретной* природы наследственности является то, что одни и те же мутации *повторяются* и с течением времени накапливаются в популяции. До поры они будут присутствовать, в основном, в скрытом, гетерозиготном состоянии. Однако по мере их накопления появятся и гомозиготные особи, имеющие мутантные признаки в фенотипе. Начиная с этого момента, мутация подвергается **давлению естественного отбора**.

*Реальная картина сложнее описанной схемы, хотя бы потому, что абсолютно доминантных аллелей не бывает. Например, у человека один из генов групп крови имеет два аллеля — **A** и **B**. Гомозиготы **AA** и **BB** обладают, естественно, разными группами крови — второй и третьей, в общепринятых обозначениях. Но гетерозиготы **AB**, оказывается, имеют не вторую, и не третью, а свою особую — четвертую — группу крови. Это означает, что ни один из аллелей **A** и **B** нельзя назвать доминантным.*

*Другой популярный пример — аллель серповидноклеточной анемии **S**. У гомозигот **SS** он вызывает нарушение формы гемоглобина и хрупкость эритроцитов, приво-*

дя к тяжелому заболеванию и, как правило, гибели в раннем возрасте. Гетерозиготы **AS**, как и гомозиготы **AA**, не больны, и с этой точки зрения можно было бы сказать, что аллель **A** — доминантный, а **S** — рецессивный. Однако присутствие «рецессивного» аллеля **S** легко обнаруживается и у гетерозигот: при воздействии углекислого газа эритроциты у них приобретают характерную серповидную форму. Самое же интересное — гетерозиготы **AS** заметно устойчивее к малярии, чем гомозиготы **AA**.

Если попросить первого встречного объяснить, что такое естественный отбор, он, скорее всего, скажет: «выживание самых приспособленных». Это, кстати, почти в точности вторая часть полного названия книги Дарвина («...или Выживание благоприятствуемых пород в борьбе за жизнь»). Популяционная генетика понятие естественного отбора уточняет. С ее точки зрения **сущность отбора в том, что он повышает вклад наиболее приспособленных особей в генофонд популяции**. Сам факт выживания не имеет никакого значения, если особь не передала потомству те особенности своего генотипа, которые, проявившись в фенотипе, позволили ей достичь успеха.

Давление естественного отбора на генофонд

Известный современный генетик, этолог (специалист по поведению животных) и эволюционист Ричард Докинз вообще считает, что упоминание об особях и организмах можно опустить и говорить, что естественный отбор — это сохранение и размножение наиболее эффективных в данных условиях генов. С этой точки зрения, животное или растение — лишь способ размножения гена, «генная машина». А ведь когда-то фраза: «Курица — это способ, с помощью которого яйцо производит другое яйцо» считалась просто шуткой!

Наиболее сильное давление естественного отбора испытывают доминантные аллели, поскольку они проявляются в фенотипе. От доминантных летальных (то есть приводящих к безусловной гибели организма) мутаций популяция избавляется сразу. В этом проявляется стабилизирующая форма отбора.

Отбор против рецессивных мутаций менее эффективен. Например, если частота встречаемости летального рецес-

сивного аллеля составляет **0,01**, то можно подсчитать, что за сто поколений она уменьшится лишь вдвое — и то если пренебречь повторным возникновением этого аллеля в результате мутаций.

Движущая форма отбора вступает в игру, если вследствие изменившихся условий жизни уменьшаются шансы у особей с преобладающим фенотипом (рис. 2.1). Частота встречаемости наиболее распространенных аллелей при этом понижается, зато увеличивается частота тех скрытых в генофонде мутаций, которые дают признаки, полезные в новых условиях. В конечном счете этот процесс приводит к стойкому направленному изменению генофонда популяции и связанному с этим изменению нормы фенотипа.

Необходимость изоляции

Давление мутаций и естественного отбора, таким образом, может привести к изменению нормы, характерной для данного вида, но оно еще не достаточно для видообразования. Чтобы возник *новый* вид, необходимо, чтобы скрещивание между особями нового и предкового видов стало невозможным. Для этого различие между их генотипами должно достичь некоторой критической величины. Однако если между популяциями вида постоянно происходит интенсивный обмен генами, вид сохраняет относительную генетическую однородность, достаточную для того, чтобы оставаться единым целым. Таким образом, ключевым фактором **дивергенции**, то есть расхождения видов, должна служить **изоляция** популяций, то есть возникновение любых препятствий для свободного скрещивания.

Вывод о необходимости изоляции для видообразования подтверждает, что синтетическая теория эволюции действительно заслуживает названия «синтетической». В этом пункте она вобрала в себя и нашла правильное место для ранних концепций (с. 52), которые, еще без достаточного фактического обоснования и в излишне категоричной форме, рассматривали изоляцию как единственное необходимое условие для возникновения нового вида.

Все известные формы изоляции можно свести к двум основным типам: географическому и биологическому. При *географической изоляции* скрещивание особей разных популяций невозможно или затруднено из-за естественных

или искусственных особенностей ландшафта: рек, горных хребтов, населенных пунктов и дорог, и т.д. Биологическая изоляция затрудняет скрещивание из-за различий в образе жизни, поведении или строении тела особей из разных популяций.

Например, известна плодовая мушка раголетис помонелла, которая паразитирует на боярышнике. Весь ее жизненный цикл (ухаживание, спаривание, откладывание яиц, питание личинок) приспособлен к созреванию плодов боярышника. Однако 160 лет назад раголетис начала поражать и яблони, что было описано одним из однокашников Дарвина. Современные исследования выяснили, что время выведения мушек из куколок различно для боярышниковой и яблонево́й популяций и является наследуемым признаком. Существуют и другие генетические различия между двумя расами раголетис, которые, как показывает математический анализ, были бы невозможны при свободном спаривании особей.

Таким образом, хотя в данном случае обе популяции обитают на одной и той же территории, между ними существует эффективная биологическая изоляция, обусловленная привязкой жизненного цикла насекомого-паразита к жизненному циклу растения-хозяина. Биолог, который анализировал генетические различия между расами раголетис, полагает, что при наблюдаемом темпе их накопления потребуется около двух тысяч лет, чтобы яблонево́я и боярышниково́я мушки потеряли способность скрещиваться и превратились в отдельные виды.

Изоляция ускоряет процесс видообразования и благодаря рассмотренному на стр. 77 явлению генетического дрейфа, которое способствует проявлению редких мутаций в малых популяциях.

Существует, как выяснилось, и **внезапное видообразование**, которое в мутационистских концепциях эволюции рассматривалось как единственно возможное и противопоставлялось дарвиновскому механизму *постепенного видообразования*. Внезапное видообразование обусловлено возможностью мутаций, которые, с одной стороны, сохраняют жизнеспособность мутантов, а с другой — делают невозможным их скрещивание с нормальными особями. К та-

ким мутациям относится, например, *полиплоидия*, когда количество хромосом у мутанта увеличивается в целое (2, 4, 6 и т.д.) число раз. Полиплоидия может возникать не только благодаря мутациям, но и благодаря гибридизации разных видов, если она сопровождается удвоением числа хромосом. Полиплоидов много среди цветковых растений (по некоторым оценкам, почти половина всех видов, в том числе картофель, клубника, пшеница), но практически нет среди животных.

При внезапном видообразовании изоляция возникает вместе с самой мутацией, однако последующее расселение возникших таким образом видов и их адаптация к среде обитания занимают, как обычно в естественных условиях, тысячи поколений.

?? Что такое микроэволюция?

?? Каковы основные положения популяционной генетики?

?? Что такое равновесие Харди–Вайнберга? Почему оно называется равновесием? Достижимо ли оно в реальности?

?? Что в популяционной генетике рассматривается в качестве элементарного эволюционного события?

?? Через какие основные этапы, согласно популяционной генетике, проходит формирование нового вида?

2.7. Макроэволюция

Микроэволюционная составляющая СТЭ ограничивается рассмотрением элементарных эволюционных процессов, приводящих к образованию нового вида. Однако для широкой публики биологический эволюционизм ассоциируется, прежде всего, с историей возникновения более крупных таксонов.

Особый интерес, который значительно усилился после нашумевшего фильма Стивена Спилберга «Парк юрского периода», вызывают динозавры — эффектные и разнообразные древние представители класса пресмыкающихся. В настоящее время известно около пятисот видов динозавров (естественно, ископаемых). Первые из них возникли около двухсот миллионов лет назад. За геологически небольшое время динозавры стали и в течение целой эпохи оставались полными хозяевами суши. Около

шестидесяти пяти миллионов лет назад они быстро (по геологическим понятиям) и загадочно вымерли, освободив дорогу для развития млекопитающих, которое в конце концов привело к возникновению человека разумного. Причины вымирания динозавров составляют одну из самых волнующих загадок истории Земли. О некоторых современных гипотезах на этот счет рассказывается на стр. 128.

Эволюционные преобразования, происходящие на надвидовом уровне, обуславливающие формирование всё более крупных таксонов (от родов до типов и царств природы) и занимающие миллионы лет, называются макроэволюцией.

Создание синтетической теории эволюции не было связано с каким-то революционным прорывом в понимании закономерностей макроэволюции. Как и при жизни Дарвина, основные данные предоставлялись исследованиями ископаемых организмов (палеонтология), индивидуального развития зародышей современных животных (эмбриология) и строения организмов, принадлежащих к близкородственным таксонам (сравнительная анатомия). Конечно, к середине XX века эти данные стали более полными и точными, но сами по себе они не могли служить доказательством истинности именно дарвиновской эволюционной концепции.

**Макроэволюция
в синтетической
теории
эволюции**

Некоторые современные биологи разделяют высказанное еще Т. Гексли мнение о том, что данные палеонтологии совместимы с любой формой учения об эволюции (в том числе, с ламаркизмом и всеми вариантами сальтационизма) и позволяют отбросить лишь креационистские утверждения об одновременном возникновении всех животных и растений.

Принципиально новые возможности исследования исторического развития земных организмов открылись лишь со становлением молекулярной биологии и генетики, которое произошло во второй половине XX века и рассматривается в следующем разделе.

Сказанное не означает наличия противоречий между СТЭ и установленными закономерностями макроэволюции. Соотношение между ними определяется тем, что:

1. Не существует ни одного установленного факта, относящегося к макроэволюции, который находился бы в противоречии с микроэволюционной теорией.
2. Палеонтологические данные неизбежно являются неполными. Мы, например, очень мало знаем о самых древних земных организмах, поскольку они еще не имели твердых панцирей или скелетов. Кроме того, в палеонтологических исследованиях невозможно использовать наиболее строгий критерий вида — запрет межвидового скрещивания. Поэтому даже в наиболее полных последовательностях ископаемых форм всегда есть опасность проглядеть момент возникновения нового вида или, наоборот, принять за видообразование ту или иную *обратимую* модификацию.
3. Эмбриологические данные, основанные на биогенетическом законе Геккеля (с. 55), не дают прямых указаний на исторический путь развития данной группы организмов, поскольку, как выяснилось, повторение этого пути в развитии зародыша может быть неполным и искаженным.
4. Закономерности макроэволюции представляют собой **эмпирические обобщения**, то есть формулировки тенденций, проявившихся при наблюдениях более или менее ограниченного круга объектов. Большинство из них имеет частный характер, то есть справедливо лишь в некоторых (заранее неизвестно, в каких) случаях.

Так, например, известно «правило Депере», согласно которому в макроэволюции каждой группы организмов преобладает тенденция к увеличению размеров тела, с течением времени приводящая к гигантизму, нарушению пропорций организма и вымиранию группы. Действительно, история некоторых вымерших животных развивалась по этому сценарию. Но вот тщательное исследование эволюции древних моллюсков, для которых имеются весьма подробные палеонтологические коллекции, показало, что в течение геологически длительного времени их средние размеры не менялись или даже уменьшались несмотря на существенные эволюционные преобразования.

Еще одно эмпирическое обобщение данных палеонтологии — так называемое правило Копа, которое сформулировал в свое время выдающийся американский палеонтолог **Эдуард Дринкен Коп (1840–1897)**.

Оно гласит, что обычно новые группы организмов происходят не от высших, наиболее продвинутых представителей предкового класса, а от сравнительно примитивных, неспециализированных форм. Так, млекопитающие возникли не от динозавров, а от более мелких и древних пресмыкающихся. Причины этого, в общем-то, понятны. Во-первых, неспециализированные формы являются более пластичными, более способными к изменениям. Во-вторых, они ведут, как правило, жесткую борьбу за существование, что приводит к более частому появлению у них новых способов адаптации, среди которых оказываются и очень перспективные. Интересно, что можно привести немало примеров, подтверждающих правило Копа, и из истории техники.

Правило происхождения от неспециализированных предков

5. Те закономерности макроэволюции, которые имеют действительно общий характер и подтверждаются всем массивом накопленных фактов, как правило, допускают истолкование на основе представлений микроэволюционного учения. Таков, например, закон необратимости эволюции (стр. 61). С точки зрения генетики, если возможна мутация в одном направлении, с такой же вероятностью возможна и обратная мутация. Обратные мутации действительно встречаются и описаны в научной литературе. Так, например, у кашалотов до сих пор иногда (примерно у одного из десяти тысяч) возникают задние конечности, отчетливо видимые как выступы на туловище. Однако в ходе эволюционного развития изменяется не один ген, а весь генный комплекс организма или существенная его часть. Ясно, что одновременная обратная мутация всех изменившихся генов — это статистически совершенно невероятное событие.

Здесь можно провести аналогию с необратимостью некоторых физических процессов. Если в помещении открыть флакон с духами, молекулы ароматического вещества, совершая беспорядочное тепловое движение, в конце концов покинут флакон (духи испарятся). Продолжая бес-

*порядочно двигаться, каждая отдельная молекула имеет шанс вернуться во флакон. Необходимое для этого время примерно равно времени распространения запаха по комнате, умноженному на отношение объемов комнаты и флакона, то есть не является непомерно большим. Однако ожидать одновременного возвращения во флакон **всех** молекул ароматического вещества — совершенно безнадежное дело, даже если помещение не проветривается.*

Из приведенных соображений вытекает, что теория микроэволюции может служить объяснительной базой макроэволюционных явлений. В силу одного из основных методологических принципов научного исследования — **«бритвы Оккама»** (не следует искать новых причин, если не исчерпаны возможности объяснения, исходящего из причин известных), — **этого достаточно, чтобы рассматривать макро- и микроэволюцию как разные стороны, точнее, разные уровни одного и того же эволюционного процесса.** Именно на этом условии макроэволюционные представления, разработанные разными учеными, начиная с Ламарка и Геккеля, принимаются в СТЭ. Естественно, при выходе на такой крупномасштабный уровень рассмотрения эволюционных процессов возникают новые понятия и обобщения.

Эволюционные адаптации: алломорфозы и ароморфозы

Между эволюционными процессами на микро- и макроуровне имеется важное различие. Микроэволюционные процессы можно рассматривать как **случайное ненаправленное блуждание** в «генном пространстве». Макроэволюционное развитие носит преимущественно характер **направленной адаптации**, обуславливающей приспособленность живых организмов к окружающей среде. История жизни на Земле — это история постоянных адаптаций живого к постоянно изменяющимся «правилам игры».

Все эволюционные адаптации можно разбить на два больших класса: **алломорфозы и ароморфозы**, разница между которыми такая же, как между стандартным инженерным решением и крупным изобретением.

«Алло...» происходит от греческого корня «аллос» со значением «иной, другой». «Аро...» — от греческого же «аиро», что значит «повышаю».

Алломорфозы — это частные приспособления организмов к конкретной экологической нише, не влияющие на общий уровень их организации.

В процессе возникновения алломорфозов уже имеющиеся функции одних органов развиваются и усиливаются (например, при смене водной среды обитания на наземную укрепляются и усложняются конечности), функции других ослабевают или даже утрачиваются, часто вместе с самими этими органами (в приведенном примере исчезают ненужные более спинные плавники).

Ароморфоз — это приспособление общего характера, поднимающее уровень биологической организации на принципиально новую ступень.

Примеры возникновения ароморфозов (арогенеза) — появление многоклеточных или теплокровных организмов. Арогенез открывает широкие возможности для возникновения частных приспособлений уже на новом достигнутом уровне общей организации. Говоря другими словами, если возникновение алломорфозов — это развитие вширь, горизонтальный прогресс, то арогенез — развитие ввысь, прогресс в «вертикальном» направлении. Крупнейшие ароморфозы являются своего рода верстовыми столбами в истории развития жизни на Земле.

?? Что такое макроэволюция?

?? Каково соотношение теорий микро- и макроэволюции?

?? Что такое эмпирическое обобщение?

?? В чем заключается правило происхождения от неспециализированных предков?

?? Что такое микроэволюция?

?? В чем разница между алломорфозами и ароморфозами?

2.8. История жизни на Земле

Первые клеточные организмы

Первый крупный ароморфоз в истории жизни, следы которого доступны для наблюдения, — возникновение клеточной мембраны, отделившей «внутренности» организма от окружающей среды. Собственно говоря, только с момента возникновения химических различий между внутренней и внешней средой можно определенно употреблять сам термин «организм».

У вирусов, например, хотя и имеется белковая оболочка, но внутри нее ничего нет, кроме молекулы ДНК или РНК, несущей вирусную программу. Поэтому ни один вирус не способен к самостоятельному активному существованию. Будучи выделенными в чистом виде, вирусы образуют кристалл — форму, характерную для неживой природы. Совсем недавно было обнаружено, что возбудителями некоторых тяжелых заболеваний (например, губчатой энцефалопатии, более известной как «болезнь бешеных коров») являются так называемые прионы, с химической точки зрения представляющие собой просто белковые молекулы. Хотя по своему воздействию на организм прионы подобны болезнетворным микробам, сами они организмами определенно не являются.

Древнейшие достоверные окаменелости имеют возраст 3,5 миллиарда лет. Они представляют собой остатки микроорганизмов с клеточной оболочкой, подобной оболочке современных бактерий. Известны и осадочные породы возрастом более 3 миллиардов лет, которые явно представляют собой продукт жизнедеятельности. Таким образом, уже через один миллиард лет после формирования планеты Земля на ней существовали первые клеточные организмы. Проследить историю предшествовавших событий очень трудно, поскольку само формирование сплошной твердой земной коры к этому времени едва успело завершиться, и более древние следы были переплавлены в недрах молодой планеты.

Уже самые первые организмы — одноклеточные сине-зеленые водоросли и бактерии — не представляют собой однородной группы. До сих пор точно не установлено, независимо ли они возникли или бактерии произошли от сине-

зеленых. Обе группы дожили до наших дней и играют большую роль в современной биосфере.

Бактерии научились использовать энергию, выделяющуюся при окислении неорганических соединений в бескислородных условиях, характерных для молодой Земли. Другими словами, первые обитатели Земли не ели (питание — это процесс усвоения органических веществ из окружающей среды) и не дышали. Азот, составляющий 78% современной атмосферы, залежи самородной серы, курские и криворожские железорудные месторождения — всё это результаты жизнедеятельности бактерий. Однако более эффективной и перспективной впоследствии оказалась другая биоэнергетика, основанная на использовании свободного кислорода.

Довольно неопределенной остается датировка следующего крупнейшего ароморфоза — появления **фотосинтеза** у сине-зеленых. С помощью фотосинтеза стало возможным получать питание прямо из воздуха (использовать углекислый газ для производства сложных органических веществ), отдавая взамен молекулярный кислород. Все дальнейшее развитие земной жизни было определено этим великим изобретением природы.

Поначалу накопление кислорода в атмосфере шло медленно из-за низкой скорости обмена веществ у примитивных микроорганизмов. Потребовалось около полутора миллиардов лет, чтобы содержание кислорода в воздухе достигло 1% от современного значения. Но этот рубеж — так называемая *точка Пастера* — был, наконец, достигнут, что имело целый букет важнейших последствий.

Во-первых, начиная с точки Пастера дыхание становится эффективным способом обеспечения организма энергией. Возникновение дыхания многократно ускорило обмен веществ, а с ним и темпы эволюции.

Во-вторых, из кислорода O_2 в верхних слоях атмосферы образуется озон O_3 , играющий роль щита против жесткого ультрафиолетового излучения Солнца. Это дало возможность организмам сначала подняться в приповерхностный слой океана, наиболее богатый питательными веществами и солнечной энергией, а затем и выйти на сушу, не боясь «обжечься».

Наконец, в-третьих, накопление свободного кислорода увеличило давление отбора на первые организмы, которые за два миллиарда лет неплохо было приспособились. Дело в том, что для них химически активный кислород атмосферы был токсичен! Можно сказать, что **около двух миллиардов лет назад разразился первый в истории Земли глобальный экологический кризис** — загрязнение окружающей среды ядовитыми отходами жизнедеятельности в виде газообразного кислорода. Борьба за существование в таких жестких условиях оказалась еще одним фактором, подстегнувшим эволюцию.

Примитивные одноклеточные — *прокариоты* — были хозяевами Земли более двух миллиардов лет. Как часто бывает, они сами создали себе проблемы и подготовили путь для их разрешения, но пошли по этому пути уже другие.

**Возникновение
эукариот
и полового
размножения**

Следующим крупным эволюционным шагом, совершенным примерно 1,3 миллиарда лет назад, было возникновение *эукариот* — организмов, клетка которых имеет ядро. В ядре сосредоточена наследственная информация и аппарат для ее передачи. Это, в свою очередь, чуть менее 1 миллиарда лет назад сделало возможным *половое размножение*.

Половой способ размножения, перемешивая гены разных особей, обеспечивает мгновенный переход любого «индивидуального» изобретения в общественную собственность — в генофонд популяции. При этом повышается гибкость реагирования популяции и вида в целом на изменение условий жизни, возрастает скорость эволюции. В популяционной генетике доказано, что при условии перемешивания генов скорость эволюционных процессов пропорциональна богатству генофонда.

История возникновения эукариот представляет собой иллюстрацию того факта, что классический механизм постепенного накопления мелких мутаций — не единственный, но лишь наиболее частый путь эволюции.

Характерной особенностью эукариот является «разделение труда» между ядром и другими органеллами клетки. Так, митохондрии обеспечивают клетку энергией, хлоропласты с помощью фотосинтеза производят са-

хара, на рибосомах синтезируются белки, необходимые для функционирования клетки... В 1910 году русский биолог Константин Сергеевич Мережковский (1855–1921) высказал предположение, что органеллы происходят от свободно живущих бактерий, когда-то проникших в клетку в качестве паразитов. Паразитические отношения постепенно превратились в симбиотические, а затем симбиоз разных прокариотических организмов перерос в единый эукариотический организм. Поначалу к теории Мережковского отнеслись со скепсисом, поскольку в то время она была чисто спекулятивной («так могло бы быть»). Однако с развитием молекулярной биологии были найдены биохимические свидетельства в пользу того, что митохондрии и хлоропласты первоначально были симбионтами. Более того, обнаружилось, что митохондрии и некоторые другие органеллы обладают своей собственной «молекулой наследственности» — ДНК, независимой от ДНК клеточного ядра и очень похожей на ДНК прокариот.

Если теория Мережковского верна, то это значит, что эукариоты возникли не классическим путем дивергенции одного исходного вида, а наоборот, как результат слияния нескольких независимых видов. В дальнейшей истории жизни известен лишь еще один такой пример: в результате симбиоза между грибом и водорослями возникли лишайники, но сколько-нибудь значительного эволюционного успеха они не добились.

Следующий после возникновения эукариот крупный ароморфоз — многоклеточность. Первые попытки прорыва на этот уровень организации предприняли еще синезеленые водоросли. Известны окаменевшие отпечатки их колоний, возраст которых оценивается от **2,8** до **3** миллиардов лет. Однако в полной мере использовали преимущества многоклеточности (крупные размеры тела, специализация разных групп клеток на выполнении разных функций) лишь эукариоты. Произошло это от **1** миллиарда до **700** миллионов лет назад, в конце **докембрийского** отрезка истории Земли.

Первые многоклеточные

Докембрий — собирательное название геологического времени от возникновения нашей планеты до начала кембрийского периода (570 миллионов лет назад). Докембрийская жизнь не отличалась богатством форм и быстро-

той эволюционных преобразований. Однако изучение докембрия важно не только потому, что он занимает 88% всей истории Земли, но и потому, что в это время происходили события фундаментального значения — например, возникновение жизни.

Детали возникновения настоящих многоклеточных организмов мы не знаем. В геологической летописи здесь слишком много пробелов. Палеонтологические находки позволяют с уверенностью говорить лишь, что 650 миллионов лет назад докембрийские моря уже были населены кораллами, медузами, плоскими и кольчатými червями и некоторыми другими организмами, по остаткам которых трудно судить, к какому классу или хотя бы типу они относятся. Общей чертой докембрийских существ было отсутствие твердых элементов (панциря, скелета, каких-либо зубов или шипов). По-видимому, природа еще не создала тогда хищников. Докембрийские растения по-прежнему представлены, в основном, одноклеточными водорослями. Отсутствие скелетных форм плюс длительность протекшего с тех пор времени и обусловило сравнительную бедность палеонтологии докембрия.

Долгое время практически единственным источником докембрийских окаменелостей многоклеточных организмов была так называемая формация Эдиакара (Южная Австралия). В 80-х годах XX века богатая ископаемая фауна эдиакарского типа была обнаружена на российском побережье Белого моря, на Берегу Зимы (формация Усть-Пинега). Большое количество найденного палеонтологического материала позволило установить, что уже в докембриии появились существа, очень близкие к моллюскам — одной из высших групп беспозвоночных.

Кембрийский взрыв эволюции животных

Около 600 миллионов лет назад в истории жизни на Земле происходит крупнейшее событие, которое иногда называют «большим взрывом эволюции животных». После трех миллиардов лет неспешного развития, природа, словно спохватившись, в течение одного кембрийского периода (от 570 до 500 миллионов лет назад) создает все известные и по сегодняшний день планы строения тела, почти все из 35 ныне живущих и вымерших типов

животных. В течение последующих **100** миллионов лет эволюция шла по пути усовершенствования и специализации форм, возникших в кембрии.

Ни один из других геологических периодов не может сравниться с кембрийским по масштабам эволюционного творчества. Основные ароморфозы, возникшие в это время, трудно даже перечислить. Пожалуй, наиболее характерным из них был жесткий скелет (поначалу в виде внешнего панциря, в который были закованы широко распространенные в кембрийских морях трилобиты, составлявшие около **60%** кембрийской фауны). Возникновение защитных приспособлений свидетельствует о появлении хищников и ужесточении борьбы за существование, что придало эволюции дополнительное ускорение. Произошли серьезные изменения и в растительном мире: широко распространились многоклеточные водоросли, которые перешли к прикрепленному образу жизни.

К концу **ордовикского периода** (от **500** до **440** миллионов лет назад) относится выход на сушу растений **псилофитов**. Они были близкими родственниками зеленых водорослей и напоминали их отсутствием листьев и настоящих корней. Жили псилофиты по берегам пресных водоемов. Чтобы уцелеть вне водной среды, древнейшим наземным растениям пришлось развить целый ряд ароморфозов: расчленение тела на специализированные органы, жесткий несущий стебель, сосудистую систему и покровную ткань. Совместно с бактериями они начали формировать *почву*.

Ордовик: выход растений на сушу

В последнее время появились свидетельства в пользу того, что псилофиты не были пионерами освоения суши. В кембрийских и даже докембрийских породах были обнаружены споры более примитивной группы растений, впоследствии вымершей.

Следующий, **силурийский период** (от **440** до **410** миллионов лет назад) знаменуется появлением первых позвоночных — это были панцирные рыбы — и выходом на сушу животных. Первые животные, приспособившиеся к воздушному дыха-

Силур: первые позвоночные и наземные животные

нию, относились к типу членистоногих и напоминали современных скорпионов. Как это не раз было в истории жизни на Земле, первая попытка принесла почетное место в палеонтологических коллекциях, но не эволюционный успех. Не паукообразным суждено было начать главный путь эволюции сухопутных животных.

**Девон: время
рыб и первых
лесов**

Девонский период (от 410 до 360 миллионов лет назад) был периодом рыб и первых лесов. Девонские леса не были похожи на нынешние. В них преобладали примитивные споровые растения, предки нынешних папоротников, достигавшие зато 12 метров в высоту. Благодаря им содержание кислорода в атмосфере к концу девона достигло современного значения — 21%.

Интересен вопрос, почему доля кислорода в атмосфере не стала увеличиваться далее. Среди механизмов стабилизации имеется отрицательная обратная связь, основанная на том обстоятельстве, что при содержании кислорода выше 25% горит и мокрая древесина. Тогда лесной пожар, однажды начавшись, не погаснет даже под тропическим ливнем и не закончится, пока не выгорит весь лес. В столь агрессивной атмосфере с течением времени пожары значительно сократили бы площадь лесов, что, в свою очередь, уменьшило бы концентрацию кислорода в воздухе.

*Такой механизм стабилизации содержания кислорода может рассматриваться как проявление **самоорганизанной критичности**, свойственной развивающимся системам. Концепция самоорганизованной критичности, предложенная физиком П. Баком (1948–2002), утверждает, что эволюция сложной неравновесной системы всегда приводит ее в критическое состояние, состояние «балансирования на краю». С этой концепцией перекликается принцип устойчивого неравновесия, выдвинутый венгерско-советским биологом Эрвином Симоновичем Бауэром (1890–1942), согласно которому главной отличительной особенностью живых систем является постоянное и активное поддержание ими достигнутого неравновесного состояния.*

Первые представители позвоночных, рыбы достигают в девоне расцвета. Все позднейшие позвоночные, в том числе и человек, пользуются такими великими изобретениями

рыб, как череп, позвоночник — несущая конструкция легкого, но сильного тела, парные конечности (развившиеся из рыбьих плавников), челюсти и соответствующая мускулатура, позволившие совместить возможность открывания и закрывания рта с его использованием в качестве эффективно-го твердого орудия. О степени совершенства и приспособленности, достигнутой рыбами, говорит тот факт, что некоторые из них (например, акула) мало изменились за последние сотни миллионов лет. Группа современных *лучеперых рыб* включает больше видов, чем все остальные современные позвоночные вместе взятые. Однако дальнейшая эволюция оказалась связанной с малочисленной, менее приспособленной и ныне почти вымершей группой *кистеперых рыб*. Их короткие и мясистые плавники — два грудных и два брюшных — были не очень эффективны при плавании, зато позволяли хорошо ползать по дну, что особенно помогало выжить в пересыхающих водоемах. Новый способ передвижения позволял удаляться от воды в поисках пищи — наземных растений и насекомых, потомков первого десанта на сушу. В результате уже в конце девонского периода появились первые представители нового класса *земноводных*. От рыб земноводные отличаются наличием удлинённых и подвижных пятипалых конечностей с шарнирными сочленениями в суставах, дыханием через нос с помощью легких, увеличенным размером головного мозга.

Первостепенные ароморфозы **каменноугольного периода, или карбона** (от 360 до 285 миллионов лет назад), словно являются решениями изобретательской задачи: как сделать процесс размножения независимым от водной среды? Первые наземные растения размножались, разбрасывая споры, а земноводные животные — откладывая икру. Оплодотворение и спор, и икры осуществляется подвижными сперматозоидами и происходит только в воде. В результате жизнь оказывалась привязанной к прибрежной полосе морей и озер, в то время как на Земле еще столько места! В начале и середине карбона эта проблема ощущалась не слишком остро ввиду высокой влажности и широкого распространения болот. Однако постепенно климат

Карбон: семена на смену спорам, рептилии на смену амфибиям

становился прохладнее и суше, и независимость от наличия водоемов становилась все более ценным преимуществом в борьбе за жизнь.

Растения решили эту задачу, изобретая *семена*, снабженные защитной оболочкой и оплодотворяемые *до* отделения от родительского организма. Так возникли голосеменные (в частности, хвойные) растения. Животные пошли схожим путем. Во-первых, было изобретено *внутреннее оплодотворение* (внутри женского организма); во-вторых, возникло *амниотическое яйцо*, представляющее собой миниатюрный индивидуальный водоем для эмбриона, защищенный прочной скорлупой. Эти два ароморфоза стали главными признаками нового класса позвоночных — *пресмыкающихся*.

**Пермь, триас,
юра, мел: царство
пресмыкающихся**

Новый уровень общей организации, достигнутый пресмыкающимися, оказался настолько высок и открывал столь широкие возможности для формирования частных приспособлений, что рептилии¹ оставались полновластными хозяевами Земли на протяжении четырех геологических периодов: **пермского** (от 285 до 235 миллионов лет назад), **триасового** (235–195 миллионов лет), **юрского** (195–137 миллионов лет) и **мелового** (137–67 миллионов лет назад). Сравните с продолжительностью каменноугольного периода — временем расцвета земноводных!

Пресмыкающиеся дали огромное число самых разнообразных и удивительных форм. Они не только полностью освоили сушу, но заставили потесниться исконных обитателей других сред. В юрских и меловых морях плавали ихтиозавры и плезиозавры. В воздух поднялись рамфоринхи, птеродактили и птеранодоны. К земноводному образу жизни приспособились крокодилы и черепахи. По земле ползали утратившие конечности змеи. Ничто, казалось, не мешало пресмыкающимся оставаться и далее на вершине эволюции, ничто не вынуждало напряженно изобретать какие-то принципиально новые черты строения организма. Ничто, за исключением пустяка: пресмыкающиеся холоднокровны.

¹ Рептилии — то же, что пресмыкающиеся.

Интенсивность их жизненных процессов сильно зависит от температуры окружающей среды, а холод заставляет впадать в оцепенение. Пока на Земле было достаточно тепло, холоднокровность была действительно пустяком. Об этом свидетельствует тот факт, что первые теплокровные животные — мелкие примитивные *млекопитающие* — появились одновременно с *динозаврами*, еще в триасовом периоде, однако в течение 150 миллионов лет оставались незаметной малочисленной группой.

Постепенно теплокровность становилась все более важным признаком. В юрском периоде, приобретя оперение, от пресмыкающихся отделились *птицы*. Все современные птицы теплокровные, причем эту особенность они приобрели независимо от млекопитающих. На рубеже мелового и *третичного* (от 67 до 1,5 миллиона лет назад) периода подавляющее большинство видов пресмыкающихся вымирает. Независимость от температуры окружающей среды резко возрастает в цене, и на опустевшую главную арену битвы за жизнь врываются млекопитающие.

**Птицы,
млекопитающие,
цветковые
растения**

Столь быстрое падение царства пресмыкающихся дало основание для многочисленных эмоциональных высказываний. Один из создателей СТЭ Дж. Симпсон привел такое сравнение: «Впечатление как на спектакле, в котором все главные роли исполняли рептилии, и особенно толпы самых разнообразных динозавров; занавес падает на миг и вновь поднимается, открывая ту же декорацию, но совершенно новых актеров: ни одного динозавра, а остальные рептилии на заднем плане, как статисты».

Интересно задуматься, а как бы развивался спектакль, если бы не столь внезапная смена труппы. В конце концов, теплокровность не является монопольной собственностью млекопитающих. В канадской провинции Альберта нашли останки динозавра, который, по-видимому, был теплокровным, ходил на задних конечностях и имел хорошо развитые передние, а также мозг большого объема и бинокулярное зрение, вел стадный образ жизни... Кто знает, если бы не массовое вымирание пресмыкающихся шестьдесят пять миллионов лет назад, может быть сейчас скамьи в студенческих аудиториях имели отверстия для хвостов.

Помимо физиологических особенностей, связанных с регулированием температуры тела (теплокровность, шерстный покров), млекопитающие отличаются приспособлениями, способствующими нервно-психической деятельности. Они имеют развитый мозг, их детеныши появляются на свет живыми, но беспомощными, требующими родительской опеки и вскармливания. В результате становится возможным и приобретает большую роль процесс *воспитания и обучения*. В какой-то степени воспитание реализует ламарковский механизм эволюции: родители передают потомству опыт, приобретенный при жизни. Развиваются зачаточные формы *социальной организации* (стадо, стая), которые требуют достаточно сложной сигнальной системы. В наиболее отчетливой форме эти особенности млекопитающих проявляются у возникших в начале третичного периода *приматов* (лат. **Primates** — князья) и особенно у представителей рода **Homo** (Человек), первые из которых появились на Земле 3–4 миллиона лет назад.

Млекопитающие были последним возникшим в ходе эволюции *классом* животных (новых *типов* животных, как говорилось ранее, не появлялось практически с кембрийского периода). Изобретенное ими живорождение обеспечивает более высокую выживаемость потомства (у млекопитающих до годового возраста доживает вдвое больше молодняка, чем у пресмыкающихся).

У растений аналогичное достижение датируется началом мелового периода, когда возникают *цветковые*, или *покрытосеменные*, обеспечивающие семя запасом питательных веществ и защищающие его околоплодником. В отличие от млекопитающих, цветковые очень быстро стали преобладать в растительном мире (к середине мелового периода уже 90% видов наземных растений относились к цветковым). Особенно важную роль в эволюции биосферы сыграла группа злаковых покрытосеменных растений. Злаки возникли в конце мелового периода, во время заката пресмыкающихся. Их отличительные черты — приспособленность к существованию в сухом климате и высокие питательные свойства — помогли формированию степных млекопитающих и сыграли большую роль в биологической, а затем и социальной эволюции человека.

- ?? Когда возникли первые клеточные организмы? Что они собой представляли?
- ?? Что такое фотосинтез? Какова его роль в развитии жизни на Земле?
- ?? Перечислите основные ароморфозы докембрийского периода.
- ?? Когда возникли основные типы животных?
- ?? Назовите главные эволюционные «изобретения» рыб, земноводных, пресмыкающихся, млекопитающих.
- ?? Составьте таблицу, сопоставляющую продолжительность геологических периодов и основные макроэволюционные события. При необходимости используйте дополнительную литературу.

2.9. Современный биологический эволюционизм

Синтетическая теория эволюции сформировалась к середине XX века. Прошедшее с тех пор время стало свидетелем быстрого прогресса биологии и превращения ее в лидера современного естествознания. Даже если бы весь этот прогресс был достигнут минуя исследование эволюции как таковой, уточнение и детализация общей биологической картины мира сами по себе несомненно привели бы к более глубокому пониманию закономерностей развития мира живого. На самом деле, конечно, был выполнен и огромный объем исследований, специально посвященных эволюционной концепции. Среди основных направлений работы современных биологов-эволюционистов можно отметить следующие.

Развитие полевой эволюционной биологии, в задачи которой входит точное изучение характеристик природных популяций. В полевых условиях определяются частота встречаемости наследуемых признаков, динамика колебаний численности особей в популяции и ее связь с динамикой других природных факторов, устанавливаются точные пространственные границы популяций, наиболее часто встречающиеся генотипы, и т.д.

Направления современных эволюционных исследований

Развитие фено- и геногеографии, изучающих распространение отдельных фенотипических и генотипиче-

ских признаков в пределах ареала вида и их изменение с течением времени.

Развитие теоретической популяционной генетики, иногда называемой «эволюционной математикой». Математические модели современной популяционной генетики позволяют рассчитывать и анализировать распределения генотипов для популяции и вида в целом, проверять гипотезы о влиянии факторов окружающей среды (по отдельности и в комплексе) на характер и темп микроэволюционных процессов, устанавливать количественные экологические соотношения в биосфере.

Дальнейшее развитие палеонтологических исследований, ликвидация пробелов в геологической летописи, уточнение датировок палеонтологических находок с помощью современных физико-химических методов, анализ и даже критический пересмотр уже накопленного огромного материала с позиций популяционной генетики и микроэволюционной теории.

Самые важные изменения в современной эволюционной теории связаны с **успехами молекулярной биологии**, открывшей возможность изучения механизмов эволюции на атомно-молекулярном уровне.

Молекулярная генетика

Прежде чем обсуждать молекулярные механизмы эволюции, напомним базовые представления молекулярной генетики.

Носителем наследственной информации являются молекулы ДНК (*дезоксирибонуклеиновой кислоты*), находящиеся в *хромосомах* клеточного ядра¹. Каждая молекула ДНК представляет собой длинный полимер («поезд»), составленный из четырех **нуклеотидов** (четырёх типов «вагонов»), обозначаемых А, Т, Ц и Г. Точнее говоря, ДНК образуют два таких параллельных «поезда», связанных соотношением *комплементарности* (дополнительности): напротив нуклеотида А в одном «поезде» всегда стоит нуклеотид Т в другом, а напротив Ц — Г. Поэтому длину молекулы ДНК и ее фрагментов принято измерять в *парах нуклеотидов (пн)*.

¹ У безъядерных микроорганизмов ДНК находится просто внутри клетки.

Типичный **ген** представляет собой группу из нескольких тысяч пн, расположенных в определенном порядке. Порядок нуклеотидов в гене так же важен, как порядок букв в слове. Количество разных генов, в совокупности составляющих **геном**, колеблется от сотен у бактерий до десятков тысяч у высших растений и животных и, в общем, возрастает пропорционально степени сложности и совершенства организма.

Роль гена заключается в том, что он представляет собой запись — на «нуклеотидном» языке — строения одного из необходимых для данного организма **белков**.

Белки, важнейший класс биохимических соединений, играют основную роль в построении и функционировании любого земного организма. С помощью белков—**ферментов** осуществляются почти все химические реакции, поддерживающие жизнедеятельность. Например, молекулы белка гемоглобина присоединяют кислород в легких и отдают его клеткам тела. Молекулы белков иммуноглобулинов участвуют в работе защитной системы организма, химически связываясь с проникшими в него чужеродными соединениями и микробами, и т.д.

Белки, как и ДНК, являются природными полимерами, но собираются не из четырех нуклеотидов, а из двадцати типов **аминокислот**. Трансляция (это специальный термин, буквально означающий «перевод») с «нуклеотидного» языка генов на «аминокислотный» язык белков осуществляется с помощью **генетического кода**, который каждой тройке нуклеотидов гена ставит в соответствие определенную аминокислоту в синтезируемом белке. Поскольку различных троек из четырех нуклеотидов существует, как нетрудно подсчитать, $4^3=64$, что втрое больше числа различных аминокислот, то одна и та же аминокислота может кодироваться различными тройками нуклеотидов.

Генетический код

Вопрос о характере соответствия между генетической информацией, записанной в ДНК, и строением белков организма был впервые поставлен выдающимся американским физиком Г. А. Гамовым в 1953 году. Гамов заявил, что соответствие должно быть однозначным, и ввел понятие генетического кода, то есть правила, задающего

это соответствие. Он указал, что код должен быть **триплетным** (то есть аминокислоты должны кодироваться именно тройками нуклеотидов): двойных сочетаний из четырех нуклеотидов существует всего 16, что меньше потребного числа аминокислот, а четверные сочетания были бы излишеством, коль скоро достаточно и тройных. Биохимические исследования, выполненные Маршаллом Уорреном Ниренбергом (1927–2010) и Харом Гобиндом Кораной (1922–2011) в начале 60-х годов, позволили раскрыть «шифровальную таблицу» Природы и были, естественно, удостоены Нобелевской премии.

Сам Георгий Антонович Гамов так и остался без высшей научной награды, хотя совершил, по крайней мере, три достойных ее открытия: построил квантовомеханическую теорию туннельного эффекта, позволившую объяснить загадочное явление альфа-распада атомных ядер, сформулировал задачу о расшифровке генетического кода и предложил концепцию горячей ранней Вселенной, предсказав существование реликтового излучения (см. Часть 2). Он был весьма незаурядной личностью, типичным генератором идей; обладал ярким образным мышлением (рекомендую почитать его научно-популярные книги из серии «Приключения мистера Томкинса») и огромным чувством юмора. Известен случай, когда, подготовив со своим аспирантом по фамилии Альфер серьезную научную статью, он уговорил известного физика Ганса Бете поставить под ней свою подпись, чтобы фамилии авторов звучали как парафраз начала греческого алфавита: Альфер, Бете, Гамов. Знаменитый гамовский юмор родом из Одессы, где Жора Гамов родился и вырос. Получив высшее образование в университетах Одессы и Ленинграда, Гамов вскоре начал тяготиться сгуцавшейся в стране атмосферой несвободы и даже попытался нелегально перейти границу, уплыв на лодке из Крыма в Турцию. Попытка оказалась неудачной: через пару дней шторм выбросил лодку с полуживой четой Гамовых обратно. В 1933 году, получив приглашение на международную конференцию, он добивается разрешения взять с собой жену и покидает страну уже навсегда.

Первый и важнейший для эволюционной теории результат молекулярной генетики заключался в том, что **генетический код един для всех земных организмов**: и вирусы, и бактерии, и клетки человеческого тела переводят с «нуклеотидного» на «аминокислотный» по одному и

тому же словарю. Это очень веское свидетельство в пользу того, что всё живое на Земле произошло, в конечном счете, от одного общего предка путем дивергентной эволюции.

Молекулярная генетика доказала, что в процессе эволюции не только мутируют, видоизменяются имеющиеся гены, но и возникают новые, о чем свидетельствует хотя бы увеличение их числа от одноклеточных к высшим организмам. Это подтверждает, что эволюция — действительно процесс постоянного созидания нового, не существовавшего ранее, а не развертывание некоей изначально заложенной в живые существа программы.

В общих чертах стал понятен процесс возникновения новых генов. Чаще всего, по-видимому, новый сложный ген формируется по принципу увеличения размеров или умножения числа существующих более простых генов с последующим изменением в результате мутационного процесса.

Например, ген коллагена (белка, образующего кости, хрящи, кожу) у цыплят состоит примерно из 38 тысяч пн (пар нуклеотидов). В этом гене можно выделить примерно 50 «говорящих» фрагментов — экзонов. Их разделяют «молчащие» фрагменты — интроны, которые ничего не кодируют, играя роль пробелов в тексте. Каждый из экзонов представляет собой серию повторов одной и той же последовательности из 9 нуклеотидов (ГГЦ ЦЦТ ЦЦТ). Анализ этих повторов позволил с большой степенью уверенности восстановить эволюционную историю гена. Она началась с указанного 9-нуклеотидного фрагмента. В результате пятикратного его повторения образовался экзон из 54 пн. Повторение было не совсем точным, или его исказили позднейшие мутации, так что среди этих 9-нуклеотидных кусочков сейчас есть и ГГГ ТТТ ЦАА, и ГТТ ГТТ ЦЦТ... Это, однако, не очень существенно, поскольку во всех вариантах первые тройки нуклеотидов (и ГГЦ, и ГТТ, и ГТТ) кодируют одну и ту же аминокислоту. Другие искажения также либо не изменяют аминокислоту, либо заменяют ее на близкую по свойствам.

В дальнейшем основным 54-нуклеотидный экзон был повторен примерно 50 раз, пока ген не достиг современных размеров. Повторение происходит благодаря случайным сбоям во время процесса образования половых кле-

Как возникают и развиваются гены

ток.. Сходный механизм образования прослежен для генов, кодирующих иммуноглобулины у мыши.

Большой неожиданностью для биологов стали обнаруженные факты так называемого *горизонтального переноса* генов, когда в геноме особей одного вида присутствует (не работающий) ген совершенно другого вида. Достоверно известные случаи горизонтального переноса генов пока исчисляются единицами (морские ежи, симбиотическая бактерия фотобактер, приобретающая у рыб-хозяев специфический рыбный фермент). Они не приводят к мгновенному видообразованию, так как новый ген нельзя механически добавить к имеющимся — он должен гармонично вписаться в уже существующий, внутренне согласованный геном, вероятность чего довольно мала. Поэтому чужие гены либо сразу ликвидируются естественным отбором, либо — как в наблюдавшихся случаях — спасаются «молчанием». Удивителен, однако, сам факт возможности обмена генами, мигрирующего механизма размножения. Способы такого обмена до сих пор точно неизвестны; наиболее вероятным считается перенос при вирусной инфекции. Дело в том, что вирус, заражая клетку, встраивает свою ДНК в ДНК клетки, которая и заставляет клетку воспроизводить копии вируса. Из-за ошибок копирования к ДНК нового вируса может пристроиться фрагмент ДНК клетки и вместе с вирусом попасть в клетку организма другого вида, поражаемого данным вирусом — да там и остаться.

Масштабы генетической изменчивости. Теория нейтральности Методы молекулярной биологии позволяют *исследовать состав генофонда популяции непосредственно*, а не через анализ фенотипических признаков. Это многократно снизило трудоемкость экспериментального обоснования популяционной генетики и существенно повысило надежность результатов. Выяснилось, что *степень генетической неоднородности природных популяций превосходит самые смелые оценки, сделанные ранее*. У изученных нескольких сотен видов степень гетерозиготности (то есть доля генов, представленных в геноме особи двумя *разными* аллелями) колебалась от 5 до 20%.

Более того, оказалось, что даже те версии гена, которые проявляются как один и тот же аллель (то есть кодируют один и тот же белок), при сличении их по нуклеотидным «буквам» никогда не совпадают полностью. Например, в 1980 году в Висконсинском университете США были определены точные нуклеотидные последовательности генов гемоглобина двух людей. Гемоглобин у обоих был, со всех точек зрения, нормальным, но нуклеотидные последовательности кодирующего гемоглобин гена отличались друг от друга (несовпадающими, лишними или отсутствующими «буквами») примерно в каждой сороковой позиции.

При дальнейших исследованиях других генов человека, мыши, дрозофилы была выявлена примерно такая же степень изменчивости. Таким образом, если разными считать все аллели гена, различающиеся хотя бы одним нуклеотидом, то все организмы оказываются гетерозиготными практически на 100%.

Выявленные огромные масштабы генетической изменчивости послужили основанием для *теории нейтральности*, сформулированной современным японским генетиком *Мотоо Кимурой*. Основная идея теории заключается в том, что если бы основная часть мутаций подпадала под давление естественного отбора, как это было принято в СТЭ, то наблюдаемая степень изменчивости была гораздо ниже наблюдаемой, ибо полезные мутации должны распространяться в генофонде, а вредные — отсеиваться из него. Но поскольку реальные масштабы изменчивости так значительны, нейтраллисты делают вывод, что подавляющая часть генетических изменений нейтральна, то есть безразлична для выживания организма, а их сохранение в популяции или удаление из нее — полностью дело случая.

Первоначально теорию нейтральности воспринимали как вызов дарвинизму вообще и синтетической теории эволюции в частности. Вскоре пришло понимание, что на самом деле вопрос состоит не в том, какая из концепций верна — нейтрализм или дарвиновский естественный отбор. Его следует ставить так: какая часть результатов генетической изменчивости сохраняется по воле случая, а какая — благодаря тому, что дает преимущество при отборе, и како-

вы роли этих двух составляющих изменчивости в эволюционном процессе?

Общий ответ на этот вопрос заключается в том, что более распространенными являются мутации, не дающие никаких видимых внешне последствий. Например, с вероятностью 67% замена последнего нуклеотида в тройке, кодирующей определенную аминокислоту, не приводит к изменению смысла тройки — она продолжает соответствовать той же аминокислоте. Часто бывает и так, что в результате мутации одна из аминокислот белка заменяется другой, но на свойствах всей белковой молекулы эта замена почти не отражается. Такие мутации никак не проявляются внешне, и потому их частоты в популяции будут определяться случайностью. Если же в результате мутации, изменившей в молекуле гемоглобина одну-единственную аминокислоту, образуется аномальный гемоглобин, приводящий к серповидноклеточной анемии и резко снижающий шансы на выживание, то такая мутация явно находится под давлением естественного отбора. Подобных мутаций относительно немного, но именно они обеспечивают видимую, «надводную» часть микроэволюционного процесса.

Молекулярные часы эволюции Развитие молекулярно-генетических исследований привело к осознанию того обстоятельства, что **наиболее полным и хорошо сохранившимся свидетелем эволюционной истории является генетическая информация**, имеющаяся в каждой клетке каждого живого существа. Степень эволюционной близости организмов объективнее всего можно оценить по размеру совпадающей части их геномов. Например, близкородственность человека и шимпанзе очевидно вытекает из того факта, что геном этих двух видов различается всего на 1,1%. Общность генетического кода для всех живых организмов говорит о том, что сам он является живым ископаемым той далекой эпохи, когда зарождалась жизнь, и как таковой несет на себе отпечаток событий и обстоятельств четырехмиллиардолетней давности.

Сравнительная молекулярная генетика позволяет не только установить «эволюционное расстояние», отсчитываемое числом точек дивергенции на генеалогическом дре-

ве земных организмов, но и оценить в годах, как давно разошлись эволюционные пути разных таксонов. Дело в том, что исследования дают основания полагать, что **скорость эволюции данного гена или белка примерно постоянна в течение длительных промежутков времени и примерно одинакова у разных видов**. Таким образом, эволюционные изменения на молекулярном уровне играют роль «молекулярных часов» эволюции.

При этом белки, обеспечивающие выполнение основных функций организмов (например, функции размножения на хромосомном уровне), эволюционируют более медленно и равномерно, чем белки, задействованные в системах адаптации и защиты (например, в реакции свертывания крови).

Сравнительно-генетическое исследование ДНК митохондрий (с. 99) у сотен людей по всему земному шару и применение метода «молекулярных часов» уже позволило показать, что все ныне живущие люди являются потомками одной женщины («митохондриальной Евы»), которая жила около 200 тысяч лет назад, предположительно, в Африке.

Не следует понимать сказанное, как утверждение о том, что первые люди на Земле появились 200 тысяч лет назад. Просто генеалогические линии других современниц «митохондриальной Евы» спустя некоторое время пресеклись. Опять-таки, это не свидетельство каких-то особо выдающихся качеств нашей праматери или ее избранности, а достаточно стандартная эволюционная ситуация.

Есть знаменитая «задача о фамилиях». Представим, что на некотором острове каждый мальчик получает фамилию отца и не имеет права изменить ее, а каждая девочка, выходя замуж, обязана взять фамилию мужа. При этом число имеющихся на острове разных фамилий, очевидно, не может возрасти. Но вот не будет ли оно убывать? Ведь каждый мужчина, даже если он не остается холостяком, может и не передать свою фамилию по наследству — если у него будут только дочери. Расчет показывает, что благодаря таким событиям фамилии будут неуклонно исчезать. Через некоторое время (достаточно большое, конечно) все люди на острове будут носить одну-единственную фамилию.

Митохондриальная ДНК наследуется в неизменном (если не считать мутаций) виде и только от матери. Фактически мы здесь имеем дело с той же задачей о фамилиях, только с наследованием по женской линии.

Молекулярная археология

Активно развиваются поиски ДНК, содержащейся в останках древних организмов. Ее исследование позволяет точнее, чем по строению костей, зубов и другим внешним признакам, определить степень родства с другими организмами, вымершими и современными. Кроме того, такие находки позволяют проградировать «молекулярные часы». Основная сложность здесь заключается в том, что молекулы ДНК достаточно хрупки и способны химически разлагаться. Поэтому их сохранение в течение длительного времени возможно только в особых условиях, например, если после смерти организм был погребен в бескислородных условиях или во льду. Тем не менее, в распоряжении ученых уже находятся образцы ДНК человека, утонувшего во флоридском болоте 7 тысяч лет назад, мумии египетского жреца возрастом 4000 лет, 40-тысячелетнего мамонта... Рекордсменом является лист магнолии, упавший с дерева в болото 20 миллионов лет назад. Исследование показало, что за прошедшие миллионы лет растение мало изменилось: генетические отличия древней магнолии от современной измеряются процентами.

Часто задают вопрос: а можно ли восстановить динозавров или хотя бы мамонтов по сохранившейся ДНК? В принципе, генетическая информация ДНК достаточна для определения организма, но имеются весьма существенные технические сложности. Во-первых, динозавры жили так давно, что найти их ДНК необходимой степени сохранности очень трудно, если вообще возможно. Во-вторых, кроме «чертежей» организма, надо иметь инструмент для его производства по этим чертежам. В наших опытах по клонированию животных в качестве такого инструмента использовалось животное того же вида, что и клонируемое. Но живого динозавра для вынашивания яйцеклетки, несущей ископаемую ДНК, у нас нет, а сами делать такие вещи мы не можем и пока неясно, когда сможем.

Одна из самых «горячих» тем, обсуждаемых специалистами по эволюционной теории в последнее время — **Пунктуализм и градуализм** — концепция прерывистого равновесия, или пунктуализм, которую выдвинули в 1972 году американские палеонтологи Нильс Эдридж (р. 1943) и Стивен Джей Гулд (1941–2002).

Основанием для нее послужило пресловутое отсутствие переходных форм, на которое ссылался еще Кювье. За прошедшие с тех пор почти два века полнота палеонтологических коллекций неизмеримо возросла. Были обнаружены переходные формы между классами рыб и земноводных, земноводных и пресмыкающихся, пресмыкающихся и птиц, пресмыкающихся и млекопитающих..., но возросла и требовательность ученых. Теперь им недостаточно форм, переходных между классами; требуется представить формы, переходные между ископаемыми видами!

Градуалисты (от англ. *gradual* — постепенный) полагают, что немногочисленность или полное отсутствие таких промежуточных форм обусловлены неполнотой палеонтологической летописи, но с течением времени эти пробелы будут постепенно заполняться. *Пунктуалисты*, во главе с Эддриджем и Гулдом, предлагают принимать палеонтологическую летопись, как она есть. Тогда неизбежен вывод, что отсутствие переходных форм отражает внезапность появления новых видов, после которого в течение миллионов лет виды изменяются незначительно. Таким образом, согласно теории прерывистого равновесия, эволюция есть не процесс медленного, но неуклонного преобразования живых форм, а чередование периодов бурной изменчивости и видообразования с длительными периодами застоя.

Как и с теорией нейтральности, довольно быстро выяснилось, что концепция пунктуализма не отрицает дарвинизм, а является одним из возможных сценариев развития в рамках общей теории эволюции, основанной на дарвиновских положениях.

Во-первых, сам Дарвин, как уже говорилось, поддерживал близкую к пунктуализму идею персистирования (стр. 57).

Во-вторых, для палеонтолога «быстрыми» кажутся изменения, занимающие тысячи лет, тогда как для генетика

те же изменения постепенны, поскольку за тысячи лет успевают смениться минимум несколько сотен поколений.

В-третьих, видимое постоянство в палеонтологической летописи может быть отражением *мозаичной эволюции*, описанной впервые английским эволюционистом *Гэвином де Биром (1899–1972)*. Де Бир обратил внимание на то, что различные части организма по ходу эволюции изменяются с разной скоростью. Например, археоптерикс имел скелет еще рептилии, но перья уже птицы, вплоть до таких тонких деталей, как разница между пуховыми перьями, покрывающими тело и длинными маховыми перьями крыльев. Поэтому видимое постоянство ископаемых форм в течение длительных промежутков времени может быть обусловлено тем, что сохранились те части «мозаики», которые действительно не эволюционировали, в то время как другие, никак не отраженные в ископаемых остатках, могли изменяться, и довольно быстро.

Наконец, *в-четвертых*, в популяционной генетике установлено, что видообразование по законам СТЭ действительно может иметь характер *резкого фазового перехода*.

Фазовым переходом в физике называется скачкообразное изменение свойств системы при постепенном изменении внешнего воздействия. Фазовыми переходами являются, например, затвердевание или кипение жидкости. При постепенном охлаждении вода до поры до времени остается водой, но как только температура опустится до 0°C, она превращается в лед.

Известный отечественный биофизик Михаил Владимирович Волькенштейн построил математическую модель конкуренции двух аллелей гена — исходного и мутантного, — учитывающую взаимное преобразование их друг в друга благодаря мутациям и разную приспособленность носителей этих генов к условиям среды. Модель позволяет вычислять частоту встречаемости p исходного аллеля в зависимости от параметров, характеризующих окружающую среду. Оказывается, что при постепенном изменении среды значение p изменяется вначале также постепенно, но затем наступает момент, когда оно падает скачком. В реальности это выглядело бы как взрывообразное (за несколько поколений) распространение мутантных форм в популяции. Более того, если в модель ввести учет распределения особей в пространстве, то

появляются решения, которые соответствуют разделению первоначально однородной популяции на две, занимающие разные области и имеющие разные частоты встречаемости аллелей рассматриваемого гена.

Конечно, признаки вида не могут определяться мутированием одного гена. Поэтому модель Волькенштейна следует рассматривать именно как модель, упрощающую реальность. Однако трудно указать факторы, которые могли бы воспрепятствовать появлению обнаруженных эффектов при более реалистичном рассмотрении.

Подвести итог данному разделу можно высказыванием из статьи «Эволюция дарвинизма», написанной в 1985 г. одним из отцов-основателей СТЭ Дж. Л. Стеббинсом совместно с представителем более молодого поколения биологов Франсиско Айалой (р. 1934): «Каким бы ни было новое [эволюционное] учение, которое родится в продолжающихся исследованиях и полемике, очень маловероятно, что мы откажемся от основных положений дарвинизма и теории, сформулированной в середине XX века. Синтетическая теория XXI века будет существенно отличаться от прежней, но появится она не внезапно, а путем эволюции».

- ?? **Какое из направлений исследований в современной биологии вносит наибольший вклад в понимание механизмов и истории эволюционного процесса?**
- ?? **В чем заключаются основные представления молекулярной генетики?**
- ?? **Какое свойство генетического кода свидетельствует об общности происхождения всех живых организмов Земли?**
- ?? **В каком отношении, по современным представлениям, находятся постепенные и скачкообразные эволюционные преобразования?**

2.10. Проблема направленности эволюции

Вряд ли кто-нибудь из признающих сам факт исторической смены живых организмов, населявших Землю, будет отрицать, в общем, прогрессивный характер эволюции, наличие у нее вектора от более примитивных к более сложным и совершенным формам. Однако до сих пор среди ученых и философов остаются заметные разногласия по вопро-

**Существо
проблемы**

су о причинах и степени направленности эволюции. Если в физике положение о существовании определенной направленности всех процессов в природе оформлено в виде одного из наиболее фундаментальных физических законов — второго закона термодинамики, который подробно обсуждается в следующей главе, — то в биологии такой сформулированный явным образом закон отсутствует.

Представления об узкой направленности биологической эволюции в яркой форме отражены в повести замечательного писателя Ивана Антоновича Ефремова (1907–1972) «Сердце змеи». По своей научной специальности Ефремов был палеонтологом, и его научные взгляды часто получали отражение в его художественных произведениях. В повести, действие которой происходит в отдаленном будущем, земной звездолет в глубинах космоса встречается с кораблем иной цивилизации. По ходу контакта выясняется, что чужаки являются представителями жизни, построенной на совершенно иной химической основе: роль кислорода у них, в основном, играет фтор, так что в океанах их родной планеты плещется плавиковая кислота HF. Тем не менее, инопланетяне выглядят совсем как люди, разве что поугловатее, да кожа серого цвета. В уста одной из главных героинь, биолога по специальности, автор вложил рассуждения, доказывающие, что человекообразная форма является той вершиной, к которой в любом уголке Вселенной стремится эволюционный процесс, и что для разумного существа общая антропоморфность (подобие человеку) обязательна.

В истории биологии известно три основных подхода к проблеме направленности эволюции.

**Концепция пред-
определенного
развития.
Номогенез**

1. Телеологическая концепция

(от греческого «телеос» — цель), согласно которой эволюция есть целесообразное развитие по направлению к определенной цели. При этом ход развития полностью определяется и даже предопределяется силой, задающей цель, — Богом (как в *теистическом эволюционизме*), «жизненной силой», энтелехией и т.п.

Вопрос об истинности телеологического толкования эволюции не может рассматриваться в рамках науки, поскольку основные движущие силы развития, в этом случае,

не поддаются анализу с применением научной методологии — либо по определению (Бог), либо за невозможностью обнаружить их объективное существование в реальных организмах и их сообществах («жизненная сила»). Конечно, телеологические представления активно используются в таком важном компоненте культуры современного общества, как религия, но следует ясно отдавать себе отчет, что религия по природе своей не может, да и не должна служить источником объективных, точных и утилитарно полезных знаний — а наука должна и, как показывает история, может.

Телеологические теории эволюции, впрочем, не обязательно имеют религиозные корни. Некоторые из них принадлежат профессиональным биологам. В нашей стране, например, большую известность приобрела теория *номогенеза* (от греческого «номос» — закон), выдвинутая *Львом Семеновичем Бергом (1876–1950)* в 1922 году. Берг подверг критике теорию Дарвина, используя почти все известные к тому времени аргументы противников дарвинизма, принадлежавших самым разным школам. Взамен он постулировал в качестве основной причины эволюции некоторую силу неизвестной природы, скрывающуюся в стереохимических свойствах белков, действующую независимо от среды, всегда целесообразно, направленно в сторону прогресса и с учетом отдаленного будущего. Впрочем, эта сила, по представлениям Берга, не творит новое, а лишь реализует закон — изначально заложенную при возникновении жизни программу.

Теория номогенеза вызвала почти единодушную критику. Характерно, что если при разборе частных следствий, выводимых Бергом из своего основного постулата, оппоненты указывали на допущенные при выводе логические ошибки и конкретные противоречия с установленными фактами, то сам постулат просто не рассматривался как положение, допускающее возможность научной дискуссии. В одной из книг того времени, специально посвященной рассмотрению концепции номогенеза, замечалось: «Объяснять целесообразность организмов тем, что целесообразность составляет изначально свойство всего живого, значит, не давать явлениям приспособления никакого научного объяснения».

Концепция
уконаправлен-
ного развития.
Ортогенез

2. Концепция развития, жестко направленного естественными механизмами: физико-химическими, биологическими и экологическими.

Крайним выражением этой концепции является теория *ортогенеза* (от греческого «ортос» — прямой), выдвинутая немецким зоологом **Теодором Густавом Генрихом Эймером** (1843–1898). В своей книге «Возникновение видов на основании унаследования приобретенных признаков по законам органического роста», две части которой вышли в 1888 и 1897 годах, он задался двойной целью:

- *во-первых*, доказать, что развитие в органическом мире происходит на основе закона, а не случайностей, которым придавал основное значение Дарвин;
- *во-вторых*, доказать несостоятельность дарвиновского принципа полезности для объяснения возникновения новых признаков.

Эймер, как и многие ученые того времени, находился во власти механистического мировоззрения. Существенным элементом механицизма выступает представление о том, что всё в природе подчиняется строгим динамическим законам, которые позволяют, зная нынешнее состояние системы, однозначно предсказать ее будущее. Статистическим законам, которые позволяют судить лишь о вероятности того или иного будущего развития событий и которые современное естествознание рассматривает как наиболее фундаментальные законы природы, в механической картине мира места нет.

Для опровержения дарвиновской концепции неопределенной изменчивости, статистической по своей сущности, Эймер рассмотрел изменчивость внешних признаков у некоторых ящериц и бабочек и показал, что эволюция признаков происходит не по всевозможным направлениям, как якобы считал Дарвин, а всего по нескольким. Например, окраска полосатых ящериц эволюционирует либо путем распада полос на части и образования пятнистости, либо путем разрастания, либо путем исчезновения полос — четвертого, так сказать, не дано. Обобщая эти данные, он утверждал, что особенности строения, система функций и

материальный состав тела — всё это сильно ограничивает возможности развития и в значительной мере определяет направление дальнейшей эволюции. Утверждение это справедливо, но на самом деле не является опровержением дарвинизма, поскольку Дарвин говорил о *случайном характере изменчивости*, а не о случайном направлении эволюции признаков.

Заслуга Эйлера в том, что он впервые обратил внимание на ограниченность возможных направлений макроэволюции ее предысторией. Если уж представители какого-то вида приобрели зубы хищника, рога у них не вырастут. Есть довольно много подобных «анатомических запретов». Однако концепция ортогенеза, полностью отбрасывая случайные факторы, абсолютизировала направленность эволюции и рассматривала ее как процесс, который может идти только в одном направлении, подобно тому, как только в определенном направлении растут грани кристалла.

Хотя сам Эймер внятно не отвечал на вопрос, в чем же причина эволюции, и определено отмежевался от сторонников телеологических взглядов, он считается родоначальником направления, обозначаемого как *ортоламаркизм*. Ортоламаркисты полагали, что существует особый закон природы, который действует непосредственно на каждый организм, заставляя его направленно изменяться в сторону усложнения и совершенствования.

Ортоламаркизм и механо- ламаркизм

Другой, получившей широкое распространение в нашей стране, разновидностью ламаркизма был *механоламаркизм*, согласно которому эволюция представляет собой суммирование (благодаря наследованию приобретенных признаков) ответных реакций организма на воздействие факторов внешней среды. В рамках механоламаркистских взглядов организмы предстают послушными пластилиновыми игрушками внешних сил, а направление эволюции полностью и однозначно определяется этими силами.

Одной из причин большого влияния механоламаркизма в СССР являлась кампания по идеологическому обеспечению «большого скачка» — программы скорейшей индустриализации и коллективизации. Была создана и поддерживалась атмосфера уверенности в возможности всего,

что решило осуществить руководство страны, каким бы невероятным ни казался проект. Любимым словечком прессы стал эпитет «небывальый». Тот, кто указывал на объективно существующие ограничения — экономические, социальные или природные, — в лучшем случае рассматривался как нытик. Самым выдающимся советским биологом в глазах широкой публики был тогда **Иван Владимирович Мичурин (1855–1935)** — селекционер, выведший множество новых сортов плодовых и ягодных культур. Концепция механоламаркизма, обещающая возможность лепить новые небывалые породы сельскохозяйственных растений и животных прямым воздействием и «тренировкой» очень хорошо вписывалась в эти настроения — не зря ее впоследствии использовал в своих интересах крупнейший псевдочеловек XX века Т. Д. Лысенко.

Как ни странно, в то время появилось довольно много работ, в которых наследование приобретенных под влиянием среды признаков вроде бы доказывалось экспериментально. Истинную их цену иллюстрирует трагическая история австрийского зоолога Пауля Каммерера (1880–1926), который был фанатичным сторонником механоламаркизма и поставил множество опытов, пытаясь подтвердить эту концепцию. Наиболее четкие результаты он получил на жабах. Если он выращивал их в воде, то на лапках у животных образовывались мозоли, похожие на те, которые имеются у полностью водных видов. У потомства же эти мозоли были с рождения, причем Каммерер утверждал, что этот приобретенный родителями признак не просто наследуется, но и расщепляется по законам Менделя.

Эксперименты Каммерера вызвали интенсивную дискуссию и подверглись проверке. Английский биолог Г. К. Нобл, изучив потомство каммереровских жаб под микроскопом, обнаружил, что мозоли у них действительно имелись, но вызваны были $\frac{1}{4}$ подкожным введением чертежной туши. До сих пор неизвестно, кто был автором фальсификации — сам Каммерер или его ассистент, желавший сделать шефу приятное. После того как Нобл опубликовал свой отчет, Каммерер, ставший к этому времени профессором Московского государственного университета, покончил с собой. В СССР спустя некоторое время вышел фильм «Саламандра», в котором рассказывалось, как друг народа и прогрессивный ученый Каммерер попал в ловушку темных сил, желавших скрыть от людей возможность наследования приобретенных признаков.

3. Концепция тихогенеза (от греческого «тихе» — случайность, стечение обстоятельств) — случайного отбора наиболее рациональных уклонений. Под названием «тихогенез» (введенным

Л.С. Бергом как антоним понятию номогенеза) фактически скрывается классическая дарвиновская концепция естественного отбора. В рамках этой концепции бессмысленно говорить о цели эволюции, а эволюционный процесс, по крайней мере, на микроуровне, предстает как ненаправленные (точнее, равно направленные во все стороны) случайные блуждания в «генном пространстве».

Существуют реальные трудности понимания того, как из **ненаправленных и обратимых** микроэволюционных процессов вырастают **направленные и необратимые** процессы макроэволюции. С середины прошлого века известна аналогичная проблема в физике, вокруг которой также сломан не один десяток перьев, — соотношение между обратимостью движения каждой отдельно взятой молекулы и необратимостью поведения их больших совокупностей. В биологии эти трудности часто трансформируются в попытку доказать математическую невероятность возникновения *упорядоченной* структуры макроскопического организма путем *случайного* перебора возможных комбинаций его микроскопических составляющих (генов, молекул).

Например, Н.Ф. Реймерс указывает, что геном человека является лишь одной из 10^{1000} возможных комбинаций соответствующего числа нуклеотидов. Затем число возможных комбинаций делится на число всех особей всех видов, когда-либо живших на Земле, и получается, что для отыскания данного человеческого генома каждый ранее существовавший организм, начиная с первых одноклеточных, должен был в течение своей жизни осуществить перебор 10^{900} (единица с девятьюстами нулями!) вариантов генома, что, конечно, абсурдно. Отсюда делается вывод, что эволюционный процесс в целом является предельно узконаправленным и, если довести эту логику до конца, по-иному идти не мог.

Слабое место таких рассуждений заключается в навязывании эволюции — задним числом — предельно узкой

**Тихогенез.
Проблема
возникновения
направленности
эволюции**

цели: создать именно человека с его уникальным геномом. Вероятность случайного попадания в такую крохотную мишень с расстояния в четыре миллиарда лет и в самом деле ничтожно мала. Однако человеческий геном не является единственной комбинацией нуклеотидов, соответствующей целесообразно устроенному организму сравнимого уровня сложности. Поэтому задача эволюционного процесса, если бы кто-то мог задать ее природе, заключается не в том, чтобы попасть именно в эту мишень, а в том, чтобы попасть в любую из большого множества мишеней — а это уже существенно проще. Впрочем, поскольку все равно нет разумного способа определить долю «целесообразных» геномов среди возможных, все рассуждения такого рода остаются чисто спекулятивными и не обладают убедительной силой.

Станислав Лем.
«О невозможности жизни»

Остроумная пародия на описанный выше способ рассуждений «задним числом» содержится в рассказе Станислава Лема «О невозможности

жизни». Герой рассказа обсуждает вероятность своего появления на свет:

«Некий военный врач во время первой мировой войны вышвырнул за дверь сестру милосердия, по ошибке вошедшую в палату, где он оперировал. Будь сестра лучше знакома с госпиталем, она бы не перепутала операционную и перевязочную палаты, а не войди она в операционную, хирург бы ее не вышвырнул; не вышвырни он ее, его начальник, полковой врач, не сделал бы ему замечание за неподобающее обращение с дамой¼, а не сделал бы замечание ему замечание, молодой хирург не счел бы нужным извиниться перед сестрой милосердия, не пригласил бы ее в кондитерскую, не влюбился, не женился, так что не было бы на свете и профессора Бенедикта Коуски — ребенка именно этой супружеской пары.

Из вышеизложенного, казалось бы, следует, что вероятность появления на свет профессора Бенедикта Коуски¼ определялась вероятностью того, что сестра милосердия в такой-то месяц, день и час ошибется дверью. Но это отнюдь не так. В тот день молодой хирург Коуска вовсе не должен был оперировать; но его коллега, доктор Попихал, относил тетке белье из прачечной, света на лестнице не было, так как пробка перегорела, в результате чего он свалился с третьей ступеньки и вывихнул ногу в

лодыжке; Коуске пришлось его заменить. Если бы пробка не перегорела, Попихал не вывихнул бы ногу, и тогда оперировал бы он, а не Коуска; Попихал, известный своей галантностью, не употребил бы соленых словечек для двора из операционной сестры, вошедшей туда по ошибке, а не обидев ее, не счел бы нужным уславливаться о свидании; впрочем, независимо от всяких свиданий, совершенно ясно, что из гипотетической связи Попихала с сестрой милосердия получился бы не Бенедикт Коуска, но, самое большее, некто совершенно другой, чьи шансы появиться на свет в работе не рассматриваются^{1/4}

Надо принять в расчет не одно, но множество случайных совпадений: и то, что сестру милосердия направили в этот, а не другой госпиталь; и то, что ее улыбка в тени, отбрасываемой чепцом, издавала напоминала улыбку Джоконды; а также то, что в Сараеве застрелили эрцгерцога Фердинанда; ведь не будь он застрелен, война бы не вспыхнула, а не вспыхни война, наша барышня не стала бы сестрой милосердия; поскольку же родом она была из Оломоуца, а хирург — из Остравы, они, вернее всего, никогда бы не встретились^{1/4}. Но все это справедливо также по отношению к тем предкам рода Коуски и рода сестры милосердия, которые, еще не ставши людьми, вели четверорукий образ жизни в раннем палеолите», и так далее, вплоть до расстройства желудка у мамонтов, которые пили влтавскую воду, которая приобрела слабительные свойства из-за сульфатов, которые вытеснились из нижнеюрских пластов благодаря землетрясению, вызванному падением метеорита из потока Леонид точно на Динарское нагорье^{1/4}

Априорная (то есть вычисляемая до начала событий) вероятность того, что каждое из этих неисчислимых совпадений случится, причем точно в нужное время и в нужном месте (а иначе не родится профессор Коуска), очевидно, равна нулю с любой разумной точки зрения. Следует ли отсюда, что профессор Коуска (и любой другой человек, животное или растение) не может существовать, или что весь ход мировых событий стремился к появлению на свет именно данной личности?

Правильное понимание проблемы направленности эволюции заключается в отказе от крайних точек зрения. Безусловно, эволюция направлена в том

Случайность и закономерность в эволюционных процессах

смысле, что уже сформировавшаяся конструкция организма не позволяет ему изменяться в произвольную сторону. Чем лучше приспособлен организм к данным конкретным условиям среды, чем специализированнее инструмент, которым его для выживания снабдила природа, тем уже спектр возможностей его развития. Безусловно, эволюция направлена и в том смысле, что организмы зависят от окружающей среды и вынуждены адаптироваться, подстраиваться под нее — а это диктует определенные решения, взятые из не слишком богатого арсенала. Свидетельством того, что эволюция «канализируется» условиями жизни, являются многочисленные примеры параллельного развития разных видов. Но направленность эволюции не абсолютна. Она все-таки предоставляет выбор на каждом распутье, и выбор этот делается во многом благодаря *случайным факторам*.

Одна из тенденций развития эволюционных представлений в последнее время заключается в том, что случайным факторам эволюции придается возрастающее значение. В качестве таковых в последнее время широко рассматриваются нерегулярные изменения окружающей среды, вызванные разнообразными причинами.

Отчего вымерли динозавры? Рассмотрим проблему соотношения между случайными вариациями условий среды и закономерностями эволюционного процесса на примере загадки вымирания динозавров. Как уже рассказывалось, около 65 миллионов лет назад, на границе между меловым и третичным периодами, эта разнообразная и процветающая группа пресмыкающихся внезапно и полностью вымерла. О причинах специалисты спорят уже долгое время. Одно время наиболее приемлемой считалась гипотеза, что вымирание динозавров связано с резкими колебаниями климата и уменьшением растительной пищи в меловом периоде. Основное преимущество этой гипотезы, по-видимому, заключается в ее не слишком обаятельном характере: климатические изменения (не катастрофические) в ту эпоху действительно имели место, но проследить причинно-следственную связь между ними и исчезновением с лица Земли великолепных ящеров или доказать отсутствие такой связи очень и очень трудно.

Основной недостаток «климатической» гипотезы также не связан с ее чисто научными достоинствами и лежит, скорее, в области психологии: трудно убедить себя, что столь катастрофические последствия вызваны такой заурядной причиной. Поэтому никогда не было недостатка в более экзотичных гипотезах, объясняющих вымирание динозавров событиями столь же или даже более катастрофическими. По одной из них, динозавры обитали, в основном, в прибрежной полосе, затопляемой во время прилива. Раньше, когда Луна (гравитационное поле которой ответственно за основные приливы) была ближе к Земле, приливы были выше и затопляемая полоса занимала значительную часть территории материков. Потом Луна отдалилась, приливная полоса сузилась до нескольких десятков метров, и динозаврам стало просто негде жить. По другой гипотезе, динозавры вымерли из-за близкого взрыва сверхновой звезды, создавшего повышенный фон жесткого космического излучения. По третьей, как раз в то время млекопитающие приспособились поедать яйца динозавров и других пресмыкающихся, что и привело тех к печальному концу. Эта гипотеза, правда, не объясняет, почему одновременно с динозаврами вымерли большие группы моллюсков и цветковых растений.

В настоящее время среди «катастрофических» гипотез наибольшее число сторонников имеют две: вулканическая и астероидная. Согласно первой из них, в конце мелового периода на территории современной Индии возникла группа вулканов. Непрерывно извергаясь, они залили окружающую местность потоками лавы толщиной в несколько километров (желающие могут убедиться), а в атмосферу выбросили такое количество пыли и пепла, что существенно уменьшили ее прозрачность и продуктивность фотосинтеза в зеленых растениях. В конечном счете это привело к гибели многих организмов, находившихся на верхних ярусах экологической пирамиды, в том числе и динозавров.

Астероидная версия была выдвинута в 1979 году отцом и сыном Альваресами из Калифорнийского университета (США). Толчком к ней послужило обнаруженное Альваресом-младшим (по специальности геологом) аномально высокое, с превышением нормы в десятки раз, содержание

иридия и других металлов платиновой группы в тонком слое (несколько сантиметров) на границе меловых и третичных отложений. Последующие изыскания подтвердили, что иридиевая аномалия встречается повсеместно на земном шаре. Откуда на всей планете мог появиться элемент, который редко встречается в земной коре, но которого довольно много в метеоритах? Естественно, из метеорита, упавшего 65 миллионов лет назад на Землю. Оценки количества выпавшего иридия привели к заключению, что надо говорить не о простом метеорите, а о гигантском (диаметром около 10 километров) астероиде. Далее всё как в вулканической гипотезе: при ударе в атмосферу было выброшено огромное количество пыли, вызвавшей эффект «ядерной зимы», и так далее.

Первое время основные споры шли вокруг того, а был ли астероид? Постепенно сам факт события получал дополнительные подтверждения. Выяснилось, что в тех же слоях, в которых был обнаружен иридий, и также по всей Земле, содержатся характерные следы мощного ударного воздействия — зерна переплавленного кварца. Необычно крупные их размеры, до 0,1 мм в длину, говорят о колоссальной силе удара. Наконец, в 1991 году был обнаружен кратер, образовавшийся при падении астероида. Он имеет около 300 километров в диаметре, лежит частично на Юкатанском полуострове (Мексика), а частично на дне Карибского моря и не был найден ранее именно из-за своих огромных размеров.

Дискуссия переместилась в иную плоскость. Хорошо, падение астероида, со всеми своими последствиями, имело место. Но с геологической точки зрения это мгновенное событие. Между тем, вымирание динозавров продолжалось как минимум 2–3 миллиона лет, а по некоторым данным — и дольше. Так, совокупная палеонтологическая летопись американского штата Вайоминг и канадской провинции Альберта свидетельствует, что число родов динозавров в этих районах сократилось с 30 до 12 за последние 8 миллионов лет мелового периода. Это, конечно, еще не доказательство того, что *глобальное* вымирание началось задолго до катастрофы, но все же заставляет задуматься. В Южном Китае были обнаружены следы, зубы и скорлупа яиц динозавров в слоях, относящихся уже к началу третичного пе-

риода. Значит, среди ящеров были и такие, которые пережили падение астероида, но потом все равно вымерли.

Если попытаться взглянуть на проблему шире, то выяснится, что в истории жизни на Земле массовые глобальные вымирания не являются редкостью. Первое из них произошло еще в конце кембрия, полмиллиарда лет назад, когда вымер целый тип животных — археоциаты. В каменноугольном периоде вымирают завоеватели суши — псилофиты. К концу пермского периода (230 миллионов лет назад) полностью исчезают с лица Земли трилобиты, гигантские ракоскорпионы, древние иглокожие; из растений — гигантские лепидодендроны и папоротники. Изменение земной флоры и фауны на этом рубеже столь значительно, что он рассматривается как граница между геологическими *эрами* — *палеозоем* (эрой древней жизни) и *мезозоем* (эрой средней жизни). Известны и менее масштабные вымирания, которые, тем не менее, также затрагивали довольно много крупных и разнообразных таксонов.

Рассматривать в качестве единственной причины каждого такого печального события ту или иную катастрофу, будь то падение астероида, извержение вулкана или наступление ледникового периода, означало бы возвращение к двухсотлетней давности концепции катастрофизма Кювье, отвергнутой всем последующим развитием биологии. Такая точка зрения не может объяснить не только длительность вымираний, но и тот факт, что исчезают не экологические группы, а систематические. Например, после падения астероида вымерли не все крупные наземные животные, а именно все динозавры: сухопутные, морские и летающие, крупные и мелкие, травоядные и хищные. Этот факт можно объяснить только приняв, что биосфера Земли, развиваясь, к началу вымирания приходит в неустойчивое состояние, в котором достаточно небольшого воздействия для начала цепной реакции событий в том или ином направлении.

Всем, наверно, известно народное английское стихотворение «Гвоздь и подкова», переведенное Самуилом Яковлевичем Маршаком (1887–1964):

Не было гвоздя — подкова пропала.

Не было подковы — лошадь захромала.

Лошадь захромала — командир убит.

Конница разбита, армия бежит.

Враг вступает в город, пленных не щадя, —

Оттого, что в кузнице не было гвоздя!

Можно, конечно, сказать, что причина драматических изменений в жизни горожан — необеспеченность кузницы гвоздями. Но сама проблема гвоздя приобрела такие масштабы лишь в критической ситуации военных действий, когда благодаря ожесточенной борьбе примерно равных по силе (иначе никакие гвозди не имели бы значения) противников становится важной действительно любая мелочь. Главные причины случившегося следует, конечно, искать в тех реальных экономических и политических интересах и средствах их обеспечения, которые привели к самой войне.

На примере проблемы массовых вымираний мы убедились, что представление о роли случайных факторов в макроэволюции можно уточнить. Эта роль особенно возрастает в периоды, когда, подчиняясь своим достаточно строгим закономерностям, развитие жизни подходит к точке, в которой теряют устойчивость те или иные формы организации. Можно предположить, что из каждой такой точки имеются несколько направлений выхода, несколько способов разрешения ситуации. Какой из них будет реализован и определит направление дальнейшей эволюции, решает случай, который может принять обличье как медленного изменения климата или геологического облика планеты, так и внезапных катастрофических событий.

?? В чем заключается проблема направленности эволюции?

?? Назовите основные концепции, пытающиеся объяснить направленность эволюции.

?? В чем основные трудности концепции номогенеза? Ортогенеза? Тихогенеза?

?? Каково соотношение случайности и закономерности в эволюционных процессах?

?? Какие существуют гипотезы о причинах вымирания динозавров? Какие из них представляются наиболее правдоподобными?

2.11. Проблема происхождения жизни

Если столько споров и драматических историй было связано со становлением и уточнением представлений о

развитии жизни, то насколько более волнующим и загадочным является вопрос о том, как жизнь *возникла!* Известны следующие основные концепции происхождения жизни.

1. Концепция божественного сотворения.

Поскольку само представление о Боге как о субъекте, не подвластном законам природы, лежит за пределами науки, эта концепция может быть лишь предметом веры, но не рационального знания. В настоящее время некоторые ее сторонники пытаются представить свою деятельность как «научный креационизм» (см. Часть 2). На деле же она сводится к попыткам отыскать уязвимые места в научных представлениях о механизмах эволюции и истории мира и жизни. То, что такие места есть, сомнений не вызывает. Более того, по современным представлениям их не может не быть (см. во Введении о «принципе фальсифицируемости» К. Поппера как отличительном признаке научного знания). Именно вопросы, остающиеся неясными, служат потенциальными точками дальнейшего роста научных знаний. Креационисты же из имеющихся проблем (масштаб и значение которых они старательно преувеличивают) делают вывод о неприемлемости научных представлений вообще и обоснованности своих собственных воззрений. Это похоже на рассуждения человека, который, узнав, что абсолютно белых предметов не бывает, заключает отсюда, что все вещи в мире совершенно черные.

Концепция божественного сотворения

2. Концепция вечности жизни

во Вселенной. Согласно этой концепции, сторонником которой являлся, например, В.И. Вернадский, между живым и неживым имеется непреодолимая пропасть, так что жизнь не могла возникнуть из неживого. Отсюда логически вытекает, что жизнь должна была присутствовать во Вселенной всегда.

Концепция вечности жизни во Вселенной

В настоящее время концепция вечности жизни научно интереса не представляет, поскольку, *во-первых*, доказано, что никакой непреодолимой пропасти между живой и неживой природой нет. Живое подчиняется тем же законам физики и химии, что и неживое, а вся его специфика обу-

словлена действием биологических законов, вступающих в действие при достижении определенного уровня сложности организации. Во-вторых, выяснилось, что сама Вселенная существует не вечно, а условия на ранних стадиях ее развития (чудовищные температуры и давления, отсутствие стабильных атомов и молекул — см. Часть 2) полностью исключали возможность жизни в той ее форме, которую мы знаем. Таким образом, **жизнь когда-то должна была возникнуть**.

Концепция непрерывного самозарождения живых существ

3. Концепция непрерывного порождения живого из неживого. Согласно этим древним представлениям (их придерживался еще Аристотель), между живым и неживым вообще нет большого различия. Поэтому образование того или иного организма из веществ, присутствующих в окружающей среде, есть событие достаточно заурядное и частое. Теория о возможности самозарождения «на наших глазах» была отвергнута только после двухсотлетней дискуссии, точку в которой поставил **Луи Пастер** в 60-х годах XIX века, показав, что при надлежащей очистке и изоляции питательной среды от микроорганизмов, спор, яиц насекомых и т.д., никакого «самозарождения» не происходит. Однако и в XX в. были попытки воскресить эту архаичную концепцию.

В 1950 году О. Б. Лепешинская (1871–1963) объявила, что ей удалось наблюдать самозарождение живых клеток в питательном бульоне. Сразу внесем ясность: впоследствии неоднократные проверки не подтвердили ни одного результата Лепешинской. Крупнейший в мире специалист по проблеме возникновения жизни, А.И. Опарин, который ранее неоднократно критиковал, в самой резкой форме, взгляды сторонников вульгарной теории самозарождения, называя их «дичью», на сей раз был вынужден публично воздать хвалу «великой заслуге профессора Лепешинской» и согласиться с тем, что подобные процессы происходят в настоящее время, хотя в его основных научных трудах ясно выражалась и подробно обосновывалась противоположная точка зрения. Ничего не поделаешь — Лепешинская была членом партии с момента ее создания, лично сотрудничала с В.И. Лениным (1870–1924) и многими высшими партийными деятелями, ее ра-

бота получила высокую оценку со стороны самого Лысенко... Только после смерти И. В. Сталина Опарин смог выступить с критикой представлений Лепешинской и ее сторонников.

4. Одной из широко известных точек зрения на проблему происхождения жизни является **гипотеза панспермии**. Согласно этой гипотезе, жизнь на Земле возникла из спор, занесенных из космического пространства.

Концепция панспермии

Проброобраз идеи панспермии (от греческого «пан» — всё — и «сперма» — семя) имеется еще в учении древнегреческого философа **Анаксагора** (ок. 500–428 до н.э.), учившего, что жизнь возникла из семени, которое существует «всегда и везде». В 1865 году немецкий медик **Герман Рихтер** (1818–1876) высказал гипотезу о «космическом посеве» в современной форме, а спустя двадцать лет ее, уже более подробно, разработал выдающийся шведский физико-химик, один из первых лауреатов Нобелевской премии **Сванте Август Аррениус** (1859–1927). Аррениус рассмотрел конкретные варианты переноса зародышей жизни в космическом пространстве под действием давления света, излучаемого звездами, или верхом на метеоритах. И в дальнейшей гипотезе панспермии везло на внимание со стороны Нобелевских лауреатов: ее активно защищал **Френсис Гарри Комpton Крик** (1916–2004), один из команды, расшифровавшей структуру ДНК.

Несмотря на такую авторитетную поддержку, представление о панспермии сейчас не используется как рабочая гипотеза в научных исследованиях проблемы происхождения жизни. Причина в том, что принятие этой гипотезы выводит всю проблему за рамки науки и научного метода. «Семена жизни» все равно должны были где-то возникнуть. Если мы принимаем, что это произошло не на Земле, то получаем задачу не просто о неизвестных путях зарождения жизни, но задачу отыскания неизвестных путей в неизвестных физических и химических условиях. Пойди туда, не знаю куда, принеси то, не знаю что...

Гипотеза панспермии нарушает также методологический принцип «бритвы Оккама»: она представляет собой дополнительный постулат, вводимый до того, как исчерпа-

ны возможности объяснения, исходящего из имеющихся постулатов (а они далеко не исчерпаны). Вот если бы было доказано, что Земля — совершенно неподходящее место для зарождения жизни... но дело обстоит как раз наоборот: из всех планет и их спутников в Солнечной системе, которую мы знаем довольно хорошо, Земля, похоже, предоставляла наилучшие условия для появления первых организмов.

**Концепция
однократного
абиогенеза**

5. Итак, если не использовать представлений о панспермии или об искусственном сотворении живых существ, следует предположить, что жизнь возникла на Земле путем однократного **абиогенеза** («а» — приставка, выражающая отрицание, эквивалент русского «не»), **то есть самоорганизации из неорганических веществ и неживых структур**. Это предположение согласуется с современными представлениями о том, что процессы самоорганизации материи широко распространены во Вселенной и происходят постоянно с момента возникновения последней. В рамках этих представлений нет ничего удивительного или принципиально невозможного в том, что в результате физико-химических процессов на ранней Земле возникли структуры более высокого уровня сложности и организации — первые живые организмы. Настоящая, четко поставленная научная проблема заключается в выяснении того, *каким образом* это могло произойти в данных конкретных условиях. Проблема действительно сложная, ибо сохранилось крайне мало материальных следов как от условий на Земле эпохи зарождения жизни, так и от структур, предшествовавших первым организмам.

**Научная
постановка
проблемы
происхождения
жизни**

Общепринято, что процесс возникновения жизни завершился с появлением первой живой клетки. Однако клетка — сложное образование, которое обладает целым рядом отличий от неживых объектов. Эти отличия сформировались, скорее всего, не одновременно, и среди исследователей нет единогласия относительно последовательности их появления. Научные исследования проблемы происхождения жизни, собственно говоря, и представляют собой попытки

установить, как возникли следующие три главных отличия живого от неживого:

1. *Структурная определенность*: клетка имеет оболочку, отделяющую от окружающей среды и одновременно соединяющую с ней. Оболочка помогает сохранять необходимый состав и строение внутренней среды. Она же должна обеспечивать возможность постоянного обмена веществ между клеткой и окружающим миром.
2. *Специфическая химия* живого, которая основана на белках, построенных из аминокислот, и ДНК, построенной из сахаров и азотистых оснований.
3. *Способность к самовоспроизводству и размножению*.

Честь научной постановки проблемы возникновения живого принадлежит нашему соотечественнику **Александру Ивановичу Опарину (1894–1980)**, опубликовавшему в 1924 году 35-страничную брошюру «Происхождение жизни».

А. И. Опарин, выдающийся советский биохимик, закончил в 1917 году Московский университет. Впоследствии он довольно скоро стал профессором МГУ, в 1946 году возглавил Институт биохимии Академии наук СССР, в создании которого принимал активное участие. Опарин занимал высокие административные посты в системе руководства наукой, будучи с 1946 года академиком, а в период 1949–1956 годов исполняя обязанности академика-секретаря Отделения биологических наук АН. В то время это было свидетельством не только признания ученых заслуг, но и политического доверия руководства страны. Доверие приходилось отрабатывать, и Опарин не избежал оброка. Ему пришлось поддержать своим немалым авторитетом деятельность Лысенко (в работе с характерным названием «Значение трудов товарища И. В. Сталина по вопросам языкознания для развития советской биологической науки»).

В историю науки А. И. Опарин вошел как пионер научных исследований происхождения жизни на Земле. Его книга «Происхождение жизни» выдержала три издания — в 1924, 1936 и 1957 годах, имевших 35, 270 и 500 страниц соответственно. Эта книга и другие труды Опарина практически сразу после выхода переводились на ино-

странные языки, а сам он до конца жизни считался в мире ведущим экспертом в этой области.

В начале своей работы Опарин констатирует, что живые организмы подчиняются тем же физическим и химическим законам, что и неживые предметы, и делает вывод, что «жизнь характеризуется не какими-либо определенными свойствами, а особенной, специфической комбинацией этих свойств». С другой стороны он отмечает, что даже простейшие, состоящие всего из одной клеточки, представляют собой настолько сложные образования, что совершенно нелепым выглядит предположение о возможности их быстрого возникновения из бесструктурных растворов соответствующих веществ. Отсюда он делает вывод, что возникновение клетки представляет собой результат длительной и сложной физико-химической эволюции. Первым этапом ее было образование простых органических соединений из неорганических, а затем — образование сложных полимерных органических молекул из простых.

**А.И. Опарин о
возникновении
структурной
определенности
живой клетки**

Основное внимание Опарин уделяет возникновению структурной определенности предшественников живых организмов, опираясь на представления *коллоидной химии*. Известно, что растворы сложных органических веществ, начиная с некоторой концентрации, начинают сильно отличаться от простых жидкостей. В частности, они могут приобретать студенистую консистенцию благодаря выпадению *геля* — пространственной структуры из взаимодействующих между собой микрочастиц растворенного вещества, связанных молекулярными силами. При этом часто возникает расщепление на области, содержащие *гель* — *коацерваты*, — и области, относительно свободные от него. В возникновении границы раздела между коацерватами и окружающей средой Опарин усматривает первый шаг к формированию структуры живой клетки. Капельки коацерватов могут объединяться и делиться (прообраз размножения); они впитывают в себя различные вещества, растворенные в другом слое (прообраз питания). По мысли Опарина, когда запасы растворенного в окружающей жидкости предбиологического органического вещества истощаются, на смену соревно-

ванию в скорости роста приходит борьба за выживание, победа в которой дается уже не размерами, а более совершенной структурой. Начиная с этого момента коацерватные капельки уже могут рассматриваться как организмы, а дальнейшая эволюция — как эволюция биологическая.

Изложенная схема предбиологической эволюции во многих отношениях несовершенна и оставляет открытыми много вопросов. В дальнейшем она была значительно усовершенствована самим автором и другими учеными. Однако главная заслуга А. И. Опарина заключается в возобновлении интереса ученых к самой проблеме зарождения жизни, обсуждать которую, в течение полувека после классических работ Пастера, считалось дурным тоном. В своей книге «Происхождение жизни», вышедшей в 1967 году, английский физик и философ **Джон Десмонд Бернал (1901–1971)**, также внесший большой вклад в работу по разрешению этой великой загадки, писал, что работа Опарина «содержала в себе в зачаточном состоянии новую программу исследований в области химии и биологии. В большой степени эта программа была осуществлена им самим, но она вдохновляла работу многих других людей... При ее выполнении Опарину вряд ли удалось ответить хотя бы на один из поднимавшихся в этой работе вопросов, но сами эти вопросы были настолько важны и многообещающи, что дали толчок многочисленным исследованиям и поискам ответов на них... Это еще раз подтверждает справедливость мысли о том, что не столь важно решить какую-то проблему, сколь важно увидеть ее и поставить. Эта мысль справедлива по отношению к деятельности самых выдающихся ученых... Значение этой работы в том, что за ней последовали другие, и хотя она страдала известными недостатками, они могли быть и на самом деле были исправлены в будущем».

Одним из главных направлений реализации опаринской программы исследований стало уточнение подробностей химической эволюции на ранней Земле. Были получены доказательства того, что элементарные строительные кирпичики живого — простейшие органические вещества, аминокислоты, азотистые основания (составные элементы ДНК) — могут возникать в

**Предбиологическая
(химическая)
эволюция**

ходе разнообразных реакций между неорганическими веществами, имевшимися в достатке на юной Земле, при разнообразных энергетических воздействиях.

А. И. Опарин первым высказал мысль о том, что атмосфера Земли в эпоху зарождения жизни была совершенно непохожа на современную и состояла, в основном, из водорода, метана, аммиака и водяного пара. Эта точка зрения получила независимое подтверждение в теории формирования Земли, опубликованной в 1952 году американским физиком и химиком, Нобелевским лауреатом **Гарольдом Клейтоном Юри (1893–1981)**. В 1957 году аспирант Юри, **Стенли Ллойд Миллер (1930–2007)** поставил знаменитый эксперимент, благодаря которому проблема происхождения жизни из чисто умозрительной, теоретической превратилась в самостоятельный раздел экспериментальной химии. Заполнив колбу смесью газов, имитирующей атмосферу примитивной Земли, Миллер в течение недели создавал в ней электрические разряды (эквивалент молний). Проведя затем химический анализ содержимого колбы, он обнаружил богатый набор органических соединений (муравьиная, уксусная, пропионовая и простейшие жирные кислоты, мочевины). Но самое главное заключалось в том, что среди продуктов реакций были обнаружены аминокислоты — строительные элементы белков!

После Миллера и Юри в ходе многочисленных аналогичных экспериментов было установлено, что богатый спектр органических соединений возникает при любом энергичном воздействии на смесь простейших молекул, если она обладает восстановительными свойствами (как атмосфера ранней Земли). В качестве такого воздействия подходит и электрический разряд, и ультрафиолетовое излучение Солнца (А. И. Опарин считал именно его основным «мотором» начальных этапов химической эволюции), и пучки энергичных частиц (моделирующие воздействие космических лучей и распада радиоактивных веществ в земной коре), и просто достаточно высокая температура (1000°C), имитирующая эффект раскаленной лавовой поверхности, и даже падение метеоритов (известны расчеты, показывающие, что, благодаря высоким температуре и давлению, при прохождении сквозь атмосферу метеоритного

тела типа того, которое «помогло» вымиранию динозавров, вдоль его траектории может образоваться до триллиона тонн органических веществ!). Экспериментально было продемонстрировано, что существует довольно много путей и для естественной полимеризации возникших аминокислот с образованием простейших белковых молекул.

Таким образом, достаточно надежно установлено, что специфические вещества, составляющие химическую основу жизни, вплоть до белков, могли возникнуть без участия живых организмов и, следовательно, до них. Внимание исследователей переключилось на проблему возникновения следующей неотъемлемой особенности живого — способности к самовоспроизводству и размножению.

Способность размножаться, скорее всего, потребовалась на достаточно раннем этапе химической до-биологической эволюции. Дело в том, что описанные выше механизмы синтеза органических веществ не слишком производительны. Эволюционному процессу необходимо было найти способы ускорить наработку органического «сырья». Кроме того, при синтезе органики без участия организмов обычно образуется слишком пестрая смесь самых разнообразных веществ. Это препятствует соединению подобных друг другу молекул (аминокислоты) в полимерную макромолекулу (белок). Поэтому механизм самовоспроизводства был необходим для выделения в первоначальном «бульоне» некоторых преобладающих разновидностей молекул.

Самовоспроизводящиеся предбиологические структуры

Возникновение самовоспроизводящихся молекул означало возникновение особого рода стабильности. Мир состоит, в основном, из стабильных объектов, которые существуют достаточно долго или достаточно часто встречаются, чтобы заслужить отдельное название. Р. Докинз отметил, что дарвиновское «выживание наиболее приспособленных» может рассматриваться как частный случай более общего закона *выживания стабильности*. Отечественный специалист по математической биологии, академик *Альберт Макарьевич Молчанов* независимо указал, что сама длительность эволюционного процесса является гарантией того, что в настоящее время мы имеем дело только со стабильными

структурами и процессами. Однако стабильность живого, в отличие от стабильности неживых предметов, — это стабильность формы при текучем содержании. Благодаря обмену веществ в течение нескольких десятков месяцев все атомы организма заменяются новыми, но организм остается самим собой, сохраняя свой облик. Размножение с этой точки зрения можно рассматривать как сохранение удачной, стабильной природной формы при смене носителей этой формы.

Способностью к самовоспроизводству и размножению обладают не только биологические, но также физические и химические системы. Например, рост кристалла — это процесс постоянного воспроизводства определенного расположения атомов на растущей грани кристалла. В химии известны *автокаталитические реакции*, в которых продукт реакции одновременно является ее катализатором: каждая новая молекула продукта ускоряет синтез следующих молекул. Каким из путей приобрели способность к самовоспроизводству предбиологические молекулы, точно неизвестно.

В модели известного современного эволюциониста *Александра Грэма Кернс-Смита (р. 1931)* предполагается, что первые организмы были в чистом виде генами, то есть структурами, несущими и передающими наследственную информацию походящим на них потомкам. В качестве примера материального носителя первичного гена Кернс-Смит рассматривает микрокристаллиты обыкновенных глин. Они обладают тем свойством, что на кристаллите определенной формы могут вырастать, а затем отслаиваться и переходить к самостоятельному существованию новые кристаллиты той же формы. Чем больше кристаллитов глины данной формы имеется в данный момент, тем больше их будет через некоторое время. Органические молекулы способны сильно влиять на размеры и форму неорганических кристаллов, подавляя рост некоторых их граней. Это могло иметь особенное значение для контролируемого воспроизводства кристаллических «генов». Кроме того, полимерные органические соединения могут удерживать частицы глины рядом друг с другом. Таким путем они могли включиться в процесс авторепликации природных форм, а после длительной эволюции этого процесса — избавиться от ставших

ненужными глиняных «строительных лесов». К экспериментальной проверке этой гипотезы приступили недавно, поэтому пока преждевременно давать ей оценку, однако она считается одной из наиболее перспективных.

Так или иначе, нет ничего сверхъестественного или необычного в предположении, что на определенном этапе предбиологические структуры приобрели способность самовоспроизводиться и благодаря этому размножились в большом числе копий. С помощью «глиняных генов» Кернс-Смита, или каким-то иным путем возникли достаточно большие молекулы, способные к *авторепликации* (самовоспроизводству). Наиболее вероятный механизм авторепликации — так называемая *матричная сборка*, когда каждый участок исходной большой молекулы-полимера имеет химическое сродство к малым молекулам-мономерам, похожим на него самого. В результате, когда все участки полимерной молекулы захватят из окружающего раствора по подходящему мономеру, из связанных молекул-мономеров формируется новая макромолекула, которая подобна исходной, как форма штампованной детали — штамповочной матрице.

Как только появляется способность к самовоспроизводству, практически сразу возникает *естественный отбор*. Количество «строительного материала» в окружающем растворе ограничено, поэтому преимущество получают и размножаются в больших количествах те макромолекулы, которые эффективнее захватывают мономеры из раствора и быстрее строят из них свою новую копию. Естественным образом возникают и *мутации*: из-за неидеальной избирательности химического связывания, мономер, присоединившийся к данному участку макромолекулы, может и не быть его точной копией, а быть просто похожим. При этом и синтезируемая макромолекула будет немного отличаться от исходной матрицы.

Немецкий ученый **Манфред Эйген**, лауреат Нобелевской премии, построил общую математическую теорию самоорганизации макромолекул. Он

М. Эйген: теория самоорганизации макромолекул

рассмотрел молекулярную систему, в которой происходит полимеризация мономеров и обратный распад полимеров.

Система является открытой, то есть в нее постоянно поступает свежий и выводится отработанный мономерный материал. Открытость, постоянный обмен веществами и энергией с окружающей средой является общим требованием к системе, в которой происходит самоорганизация любого рода (с.179). Далее, предполагается, что в системе происходит авторепликация (самовоспроизводство) полимеров. Наконец, авторепликация происходит со сбоями, то есть кроме каждого «чистого» вида полимеров, в системе возникают его разновидности — мутанты.

Общие выводы, вытекающие из проведенного Эйгеном математического анализа, таковы. По прошествии некоторого времени в системе, вне зависимости от ее первоначального состава, остается лишь один из возможных видов полимеров, размножающийся быстрее всего, плюс его мутантные формы. При изменении параметров внешней среды равновесие между основным видом и мутантами смещается: преимущество получает та мутантная форма, которая лучше отвечает новым условиям. Она становится новым «основным видом», который также сопровождается мутантными вариациями, причем и такими, которых ранее в системе практически не было. Очевидно, это является эквивалентом эволюционного процесса.

Хиральность живого

По-видимому, именно на этапе существования самовоспроизводящихся предбиологических полимеров возникло такое специфическое свойство живых организмов, как хиральность, или асимметрия правого и левого. Иногда используется слово «киральность»; и то, и другое происходят от греческого корня, означающего «рука», поскольку наиболее известный пример такой асимметрии — доминирование у большинства людей правой руки над левой.

*Многие органические молекулы могут существовать в двух формах, отличающихся друг от друга, как правый и левый винт, или как правая и левая перчатки. С точки зрения физики и химии левая (L, от латинского *levo* — левый) и правая (D, от латинского *dextro* — правый) формы молекул полностью эквивалентны по своим свойствам. Если вещество, имеющее L- и D-формы, синтезируется неорганическим путем, то оно, как правило, представляет собой смесь обеих форм в пропорции 1:1 (рацемическая*

смесь). Однако живые организмы в этом отношении поразительно разборчивы. Скажем, для построения белков они используют только L-аминокислоты, а молекулы сахара (рибозы), образующие остов ДНК, представлены только D-формой.

В фантастическом рассказе Артура Кларка «Техническая ошибка» героя выворачивает в четвертом измерении, так что он превращается в свое собственное зеркальное отражение. Казалось бы, подумаешь — сердце справа, печень слева, только и всего! Однако он начинает умирать от голода, поскольку его организм, состоящий теперь из D-аминокислот не способен усваивать нормальные L-аминокислоты, присутствующие в натуральных продуктах. Кстати, ему должно было бы казаться, что лимоны пахнут апельсинами, поскольку разница между этими запахами — это разница между двумя зеркальными разновидностями одного и того же вещества (лимонен).

Хиральная чистота настолько специфична именно для живого, что открывший ее в 1857 году Луи Пастер стал рассматривать зеркальную асимметрию как самое главное различие между живой и неживой материей и в конце концов провозгласил ее основополагающим принципом природы. Принцип принципом, но вокруг конкретных причин происхождения право-левой асимметрии живого долгое время велись жаркие споры. Лишь в последнее время были получены экспериментальные данные, отдающие предпочтение гипотезе возникновения хиральности на предбиологической стадии эволюции. В 1985 году группа исследователей под руководством Лесли Оргела (известного в качестве соавтора Ф. Крика по современному варианту гипотезы о панспермии) продемонстрировала, что в рацемической смеси нуклеотидов процесс производства полимерных нуклеотидных цепей сильно подавлен, а в хирально чистой среде идет успешно. Анализ этих данных, выполненный группой академика РАН В. И. Гольданского (1923–2001), привел к заключению, что хиральная чистота среды действительно является необходимым общим условием самовоспроизводства полинуклеотидных цепей.

В системе, рассмотренной М. Эйгеном, эволюция оказывается вынужденной протискиваться в очень узкие ворота. Если мутации слишком часты, то размывается сама определенность вида, и содержимое системы начинает больше походить на пеструю свалку самых разнообразных форм.

Чем больше звеньев в макромолекуле, тем жестче требования к точности копирования каждого ее звена. В результате, когда число звеньев достигает примерно **100**, необходимая для сохранения видовой определенности точность копирования становится практически неотличимой от **100%**. Но при выполнении этого условия прекратится дальнейшая эволюция! Если сбои при самовоспроизводстве отсутствуют вообще, то в системе остается только «чистый вид», не предоставляющий материала для естественного отбора и эволюции (вспомните классический вывод Иогансена: «в пределах генетически однородного материала отбор бессилён создать что-то новое» — с. **68**).

Понятие о гиперциклах

Таким образом, из весьма общих соображений Эйгена вытекало, что *непосредственное* воспроизводство макромолекулами самих себя может обеспечить эволюционное развитие лишь до весьма примитивного уровня. Выход, который подсказывает математическая модель, и который реализован в природе, заключается в переходе к **гиперциклам** самовоспроизводства. При *прямом* самовоспроизводстве макромолекула выполняет фактически две функции: она и носитель генетической информации о своем собственном строении, и рабочий инструмент для овеществления этой информации. В *гиперцикле* эти две функции разделяются: по исходной информационной макромолекуле создаются вспомогательные молекулы фермента, которые катализируют синтез другой информационной макромолекулы, по которой создается новый фермент, и так далее, пока гиперцикл не замкнется каталитическим синтезом копии исходной макромолекулы. Химическая машина реальной современной клетки работает, в принципе, именно так: генетическая информация с молекулы ДНК с помощью специальных белков-ферментов копируется на вспомогательную информационную молекулу РНК (рибонуклеиновой кислоты, упрощенного варианта ДНК), по которой на специальных клеточных органеллах — рибосомах — синтезируются белки, необходимые для функционирования клетки, в том числе и те, которые отвечают за производство новых копий ДНК для нужд размножения.

Гиперциклический способ самовоспроизводства макромолекул, как показывают расчеты и компьютерное моделирование, обладает повышенной устойчивостью к мутациям, размывающим накопленную генетическую информацию. Оптимальная частота ошибок при копировании последней (не слишком большая, чтобы «основной вид» не утонул в море мутантных форм, и не слишком маленькая, чтобы система все же могла эволюционировать) понижается примерно в десять тысяч раз по сравнению с прямым самовоспроизводством. Благодаря этому, эволюция гиперциклов может привести к устойчивой системе взаимозависимых полимерных молекул, общий размер которых составляет до миллиона мономеров, чего уже достаточно для функционирования примитивных клеток. Преодоление границы в миллион надежно воспроизводимых мономеров с сохранением и усилением способности к эволюционированию было связано уже с переходом к половому размножению и перемешиванию геномов разных особей.

Начиная со стадии гиперциклического способа самовоспроизводства, химическая эволюция экспериментально моделируется современными средствами.

Экспериментальное моделирование химической эволюции

Впервые химическая эволюция макромолекул была экспериментально осуществлена в конце 60-х годов при изучении вируса, заражающего кишечную палочку, — так называемого $\Phi\phi$ -фага. Этот вирус настолько прост, что вся его генетическая информация заключена в четырех генах, записанных на молекуле РНК ($\Phi\phi$ -фаг не имеет более стабильной, но и более сложно устроенной ДНК). Один из этих генов кодирует фермент, который производит копии вирусной РНК, — *репликазы*.

В молекулярной биологии принято давать белкам, выполняющим роль ферментов, названия, указывающие на катализируемую реакцию, с суффиксом «-аза». Таким образом, репликазы — фермент, ускоряющий реакцию репликации (копирования), а, например, полимеразы — фермент, ответственный за полимеризацию, и так далее.

Выделив фермент и саму РНК в чистом виде, исследователи провели несколько десятков циклов химических ре-

акций с их участием. Каждый цикл заключался в том, что из раствора молекул вирусной РНК, полученных в ходе предыдущего цикла, отбирали малую толику. Затем в раствор добавляли строительный материал для сборки РНК и репликазы. Репликаза принималась синтезировать новые копии имеющихся в растворе молекул РНК. Точность копирования невелика: при изготовлении каждой копии происходит одна-две ошибки. В естественных условиях эти мутации отсеиваются отбором, который сохраняет формы, приспособленные к паразитированию на бактерии. Экспериментаторы же сделали главным критерием отбора скорость синтеза РНК, периодически укорачивая время проведения цикла. В таких условиях преимущество получали мутантные формы РНК с более короткой молекулой, которая быстрее собирается из мономеров. После семьдесят четвертого цикла в пробирке остались, в основном, молекулы РНК, длина которых была в 6 раз меньше первоначальной. Они утратили способность заражать бактериальные клетки и сохранили фактически один-единственный ген, отвечающий за самовоспроизводство, зато приспособились к новым условиям существования, научившись размножаться в 15 раз быстрее исходной формы. Конечно, в данном случае химическая эволюция вызывалась искусственно, но ведь и Дарвин поначалу обосновывал свою теорию, апеллируя к опыту искусственного отбора при селекции домашних пород!

Новый толчок эксперименты по направленной молекулярной эволюции получили после открытия полимеразной цепной реакции (ПЦР)¹, позволяющей получать неограниченное количество точных копий одной-единственной молекулы ДНК. Интерес в данном случае подогревался не только научным любопытством, но и перспективами практического применения химической эволюции для *выведения* новых лекарств и биохимических реактивов.

Идея заключается в том, что в медицинской практике часто необходимо вещество, которое связывалось бы с определенным белком и более ни с чем. При классическом подходе фармакологи пытаются сначала рассчитать или

¹ ПЦР открыта в 1983 году американским биохимиком *Кэри Муллисом* (р. 1944), который спустя всего 10 лет был за это удостоен Нобелевской премии

угадать строение молекулы, обладающей требуемым свойством, а затем синтезировать ее. По методу химической эволюции, берется большая (порядка десяти триллионов штук) популяция молекул ДНК и приводится в контакт с белком-мишенью. Те молекулы, которые связались с мишенью, отбираются, размножаются с помощью полимеразной цепной реакции и вновь приводятся в контакт с мишенью. По мере повторения циклов, условия отбора ужесточаются, так что в конце концов выживают только молекулы, связывающиеся с мишенью прочно и предельно избирательно. Одной из основных проблем при этом является *слишком высокая* точность размножения с помощью ПЦР, так что приходится изобретать добавки, искусственно повышающие вероятность мутаций. Отметим, что о строении конечного продукта и о том, почему он действует именно так, разработчики могут не иметь ни малейшего представления, ибо они его не вычислили, не спроектировали, а *вывели!*

Не так давно на основе эволюционной идеи в математике был разработан метод «генетического программирования» для решения сложных задач оптимизации и управления. По этому методу, вначале создается популяция программ, способных принимать некоторые решения (например, с какого завода на какие склады везти продукцию). Затем в текст программ случайным образом вносятся «мутации». Полученные мутантные программы тестируются, среди них отбираются лучшие, скрещиваются между собой, в них снова вносятся случайные изменения, и так далее. На состоявшейся летом 1996 года первой конференции по генетическому программированию были продемонстрированы результаты эволюции программ, управляющих клеточными автоматами, которые, как утверждалось, по эффективности превосходят всё, что можно написать вручную. Пример клеточного автомата — игра в «крестики-нолики», дело несерьезное. Однако уже к 1999 году с помощью генетических алгоритмов реально осуществлялись: оптимизация профилей балок в строительстве, распределение инструментов в металлообрабатывающих цехах, обработка рентгеновских снимков в медицине, оптимизация работы нефтяных трубопроводов.

**Современное
состояние
проблемы
происхождения
жизни**

Подводя итог обзору современного состояния исследований по проблеме происхождения жизни, можно сделать следующие основные выводы.

1. Гипотеза происхождения органической жизни в результате предшествовавшей длительной химической эволюции сохраняет статус гипотезы, что связано, главным образом, с объективными трудностями восстановления событий четырехмиллиардолетней давности, оставивших о себе лишь косвенные свидетельства.
2. Степень правдоподобия этой гипотезы значительно возросла со времен выдвижения ее А.И. Опариним. Выполненными исследованиями надежно установлена возможность синтеза простейших органических веществ и дальнейшей их полимеризации в естественных условиях, а также возможность процессов самоорганизации и развития в среде органических макромолекул.
3. Результаты исследования эволюционных процессов на уровне предбиологической организации начинают находить практическое применение для разработки принципиально новых технологий производства информационно-емких продуктов (сложных химических молекул, компьютерных программ).
4. В ходе многочисленных исследований, исходивших из гипотезы о возникновении жизни как результате предшествовавшей химической эволюции, не было обнаружено свидетельств ее принципиальной неприменимости для описания установленных фактов или каких-то иных непреодолимых ее недостатков. Исследования, использующие данную гипотезу в качестве рабочей, успешно развиваются.

- ?? **Какие концепции происхождения жизни вам известны? В чем их привлекательные стороны и недостатки?**
- ?? **В чем заключается научная постановка проблемы происхождения жизни?**
- ?? **Как представлял А.И. Опарин происхождение живой клетки?**

- ?? Приведите примеры небιологических структур, способных к самовоспроизводству.
- ?? Каковы основные положения теории самоорганизации в среде макромолекул? Какие имеются экспериментальные свидетельства в пользу этой теории?
- ?? Что такое хиральность живого? Как она могла возникнуть и каково ее биологическое значение?

2.12. Экспериментальные результаты поисков внеземной жизни

Поскольку машина времени, которая бы позволила заглянуть в прошлое, невозможна по принципиальным соображениям, концепции химической эволюции суждено, видимо, еще длительное время сохранять свой статус наиболее правдоподобной, но все же гипотезы о происхождении жизни на Земле. В разряд теорий она может перейти, пожалуй, только в случае обнаружения внеземной жизни. Это дало бы возможность путем сравнительного анализа вычленить действительно общие закономерности процесса биологической самоорганизации, а если бы повезло — наблюдать само возникновение первых организмов. Именно этими соображениями обусловлен большой интерес к *проблеме поиска инопланетной жизни* (неразумной; для поиска разумных существ есть и другие, более веские основания).

Значение поисков внеземной жизни

Долгое время исследования по проблеме внеземной жизни носили характер теоретических рассуждений о «жизни в той ее форме, которая нам неизвестна». Лишь с началом исследований Солнечной системы космическими станциями появилась возможность опереться на достаточно надежные установленные факты. Выяснилось, что в реальности, в отличие от оптимистических прогнозов, принадлежавших пионерам астробиологии и писателям-фантастам, Солнечная система почти не содержит небесных тел, пригодных для жизни, — по крайней мере, для жизни земного типа. Не оправдала ожиданий Венера, долгое время скрывавшая свой истинный облик под непроницаемой пеленой белоснежных облаков. Облака оказались состоящими из серной кислоты, а под ними — суший ад: температура **450°C**

при давлении **90** атмосфер. Взоры исследователей обратились к Марсу.

Есть ли жизнь на Марсе?

Марс относится к планетам земной группы (кроме Марса и Земли к ней принадлежат Венера и Меркурий), имеющим твердую поверхность и сходный химический состав. Ввиду большей удаленности от Солнца, Марс существенно холоднее Земли (средняя температура на поверхности -55°C против земных $+15^{\circ}\text{C}$). Однако сама по себе температура не является решающим фактором, поскольку известны земные микроорганизмы, способные размножаться при отрицательных температурах и выживать вплоть до -200°C . Кроме того, на марсианском экваторе температура поднимается до $+25^{\circ}\text{C}$. Более существенным ограничением является отсутствие жидкой воды, поскольку все известные биохимические реакции идут только в водных растворах. Жидкая вода на поверхности современного Марса отсутствует из-за очень низкого атмосферного давления (менее 1% от земного), при котором могут существовать, в зависимости от температуры, только лед или пар. Однако в далеком прошлом (миллиарды лет назад) по марсианской поверхности текли достаточно бурные водные потоки, о чем свидетельствуют оставленные ими русла протяженностью в сотни километров. Эти потоки нельзя назвать реками, поскольку они никуда не впадали и имели, скорее всего, характер катастрофических наводнений, вызванных прорывом подповерхностных вод. Тем не менее, они свидетельствуют о значительных потенциальных запасах воды, которая могла бы послужить, как на Земле, колыбелью жизни.

Для экспериментального разрешения вопроса о существовании жизни на Марсе, к нему еще в 1975 году были посланы две специально сконструированные автоматические станции «Викинг» (США), которые совершили посадку на поверхность Красной планеты. В течение нескольких лет «Викинги» передавали на Землю фотоизображения окружающей местности. Никаких движений или иных изменений, которые могли бы быть вызваны живыми существами, на них зафиксировано не было. Химический анализ проб марсианского грунта не смог обнаружить никаких органических соединений. Поскольку использовался очень чувст-

вительный метод (он зафиксировал следы органических растворителей, которыми промывали аппараты перед стартом земные техники), это означает, что органических веществ на Марсе действительно нет, то есть жизнь в той форме, которая нам известна, там отсутствует. Попутно было обнаружено, что марсианский грунт обладает самостерилизующими свойствами. Он содержит богатые кислородом соединения (пероксиды), которые при воздействии воды выделяют свободный кислород, быстро разлагающий органические соединения. Недаром в медицине в качестве обеззараживающего средства используется пероксид (перекись) водорода.

Три серии экспериментов, выполненных «Викингами» имели целью обнаружить результаты жизнедеятельности марсианских микроорганизмов, если бы таковые имелись. Эксперименты первых двух серий заключались в увлажнении марсианского грунта питательным раствором и последующей фиксации выделения газов — основного признака жизнедеятельности микроорганизмов. Обе серии дали безусловно отрицательный результат. В третьей серии измерялось количество меченых атомов углерода (ключевой химической составляющей живых организмов), перешедших из углекислого газа над образцом грунта в состав твердого вещества грунта. Идея заключалась в том, что сложные молекулы, из которых состоят живые организмы, могут строиться только на основе углерода, обладающего рядом уникальных химических свойств. Углерод же предполагаемым марсианским микроорганизмам, какими бы они ни были, проще всего извлекать из марсианской атмосферы, которая более чем на 90% состоит из углекислого газа CO_2 . Первый эксперимент этой серии дал положительный результат: количество связавшегося в грунте углерода оказалось значительно выше уровня, характерного для стерильных образцов, использовавшихся для калибровки прибора перед стартом аппарата с Земли. Однако ни в одном из последовавших семи экспериментов этой серии повторить результат не удалось, а некоторые другие его особенности не были похожи на проявление жизнедеятельности.

Таким образом, миссия «Викингов» почти окончательно доказала отсутствие жизни на Марсе. При этом, однако,

в доказательстве осталась маленькая щелочка, через которую, спустя некоторое время, вновь просочились сомнения.

**Была ли жизнь
на Марсе?**

Поводом для сомнений стало опубликованное летом 1996 года сообщение группы американских исследователей, изучавших один из так называемых «марсианских метеоритов». Марсианскими они называются, поскольку по своему химическому составу не оставляют сомнений в том, что когда-то являлись частью Марса. Потом, в результате падения на Марс астероидов, эти куски марсианской поверхности были выброшены в космос и после миллионов лет кружения в пустоте столкнулись с Землей. Всего в настоящее время известно 12 марсианских метеоритов.

Метеорит, о котором идет речь, был выбит из Марса пятнадцать миллионов лет назад, и тринадцать тысяч лет назад упал в Антарктиде, наиболее стерильном из земных континентов, где и был найден в 1984 году. При микроскопическом исследовании было обнаружено, что он содержит органические соединения — карбонаты и ароматические углеводороды. Если карбонаты могут образовываться и небиологическим путем, то большинство ароматических соединений на Земле представляет собой результат жизнедеятельности организмов. Кроме того, органика была не распределена равномерно по метеориту, а сконцентрирована в небольших включениях диаметром около 1 мкм (микрона). Гипотеза о возможном загрязнении метеорита органическими веществами земного происхождения была отвергнута, поскольку концентрация включений возрастала от поверхности в глубь метеорита, а их возраст, определенный радиометрическими методами (с. 32), составляет не менее миллиарда лет. Общий вывод был сделан такой: есть основания полагать, что обнаружены минерализованные останки древних микроорганизмов, обитавших на Марсе в далеком прошлом, когда он не был столь негостеприимен, как сейчас. Надо ли говорить, какое значение имело бы действительное обнаружение марсианских микробов!

В настоящее время все имеющиеся в музеях мира марсианские метеориты тщательно изучаются. Развернувшаяся вокруг открытия дискуссия показала, что имеются способы объяснить возникновение обнаруженных органических ве-

пещств, и не прибегая к помощи гипотетических микроорганизмов. Однако все эти рассуждения ведутся, в основном, в модальности «могло бы быть». Как обстоит все на самом деле, можно окончательно установить только путем осмотра на месте. Поэтому эксперименты и наблюдения с целью обнаружить следы марсианской жизни обязательно включаются в программу исследований каждого земного робота, посылаемого на Марс — а их за последние годы там побывало немало. Решение проблемы (прошлой) марсианской жизни служит и одним из основным стимулов планировать пилотируемую экспедицию к Красной планете несмотря на все технические сложности и экономические трудности.

?? Зачем расходуются большие средства для поисков жизни на планетах Солнечной системы?

?? Каковы полученные на сегодня в этой области результаты? Исключают ли они возможность существования внеземной жизни в Солнечной системе?

2.13. Литература к главе 2

1. Филипченко Ю. А. *Эволюционная идея в биологии.* — М.: Наука, 1977. — 227 с.
2. Завадский К. М. *Развитие эволюционной теории после Дарвина (1859–1920-е годы).* — Л.: Наука, 1973. — 423 с.
3. Стеббинс Дж. Л., Айала Ф. *Эволюция дарвинизма // В мире науки, 1985, №9, с.38–50.*
4. Реймерс Н. Ф. *Популярный биологический словарь.* — М.: Наука, 1991. — 544 с.
5. Ичас М. *О природе живого: механизмы и смысл.* — М.: Мир, 1994. — 496 с.
6. Волькенштейн М. В. *Биофизика.* — М.: Наука, 1988. — 592 с.
7. Тимофеев-Ресовский Н. В., Воронцов Н. Н., Яблоков А. В. *Краткий очерк теории эволюции.* — М.: Наука, 1977 г. — 297 с.
8. Воронцов Н. Н., Сухорукова Л. Н. *Эволюция органического мира.* — М.: Просвещение, 1991. — 223 с.
9. Горбань А. Н., Хлебопрос Р. Г. *Демон Дарвина. Идея оптимальности и естественный отбор.* — М.: Наука, 1988. — 208 с.

10. Докинз Р. Эгоистичный ген. – М.: Мир, 1993. – 318 с.
11. Шарова И. Х. Проблемы теории эволюции. – М.: Знание, 1981. – 64 с.
12. Поннамперума С. Происхождение жизни. – М.: Мир, 1977. – 175 с.
13. Кернс-Смит А. Дж. Первые организмы // В мире науки, 1985, №8, с. 46–56.
14. Хорган Дж. У истоков жизни // В мире науки, 1991, №4, с. 68–79.
15. Эйген М., Винклер Р. Игра жизни. – М.: Наука, 1979.

Глава 3. Закон возрастания энтропии

3.1. Второй закон термодинамики

В главе 1 рассказывалось, что в середине XIX века был открыт второй закон термодинамики, который определяет общее направление превращений энергии в произвольной системе, изолированной от внешнего мира. Среди других фундаментальных физических законов этот закон стоит несколько особняком.

Во-первых, наиболее фундаментальные законы физики — это, как правило, **законы сохранения** той или иной физической величины (энергии, импульса, электрического заряда и т.д.). Сохранение, постоянство чего-либо означает эквивалентность прошлого и будущего, их полную симметричность. В неизменном мире классической физики только такие законы и имели право на существование. Второй же закон термодинамики можно сформулировать как утверждение о **невозможности сохранения** определенной физической величины.

Во-вторых, как уже говорилось, есть много формулировок второго закона. Они полностью эквивалентны между собой в смысле формальной логики, то есть любая из них влечет за собой все остальные формулировки как следствия. Однако каждая из них раскрывает действие закона со своей, подчас довольно неожиданной и глубокой точки зрения. Мы рассмотрим несколько важнейших формулировок второго закона, опуская доказательства их эквивалентности.

Существует физическая величина — энтропия, — которая в замкнутой системе может только увеличиваться с течением времени.

Этого утверждения, ничего пока не говорящего о том, что такое энтропия, уже достаточно, чтобы признать прошлое и будущее физически различными. Если у нас даже нет часов, но мы знаем, что (пока загадочная) энтропия данной замкнутой системы в момент времени t_2 оказалась больше, чем в момент t_1 , то отсюда однозначно следует, что

в момент t_2 система, да и вся Вселенная, старше, находится в более зрелом состоянии, чем в момент t_1 . Поэтому **второй закон термодинамики можно рассматривать как физическое**, поддающееся объективной экспериментальной и теоретической проверке, **утверждение о направленности времени**. Для того чтобы такую проверку можно было, хотя бы в принципе, произвести, необходимо знать, что такое энтропия.

Понятие энтропии обладает тем же свойством, что и второй закон — оно имеет чрезвычайно много граней и смыслов. Это дает возможность построить дальнейший разговор как обсуждение важнейших оттенков смысла, вкладываемых сегодня учеными в понятие энтропии и неразрывно с ним связанное второе начало термодинамики.

?? В чем заключается уникальность второго закона термодинамики?

3.2. Энтропия как измеряемая физическая величина

Энтропия не есть некое расплывчатое общепhilософское понятие типа «идея», «стремление» и т.п. Нет, энтропия — это вполне нормальная физическая величина, поддающаяся точному измерению и вычислению. Рудольф Клаузиус, который ввел понятие энтропии, определил ее следующим образом. Пусть некоторому телу сообщили количество теплоты dQ при температуре T . Тогда энтропия тела за счет этого процесса возрастет минимум на

$$DS = \frac{dQ}{T} \quad (3.1)$$

Температура здесь должна отсчитываться от абсолютного нуля (-273°C), который, напомним, называется абсолютным потому, что более низких температур в природе не бывает. Отношение dQ/T называется приведенной теплотой (приведенной к температуре процесса) и может быть измерено достаточно простым образом. Действительно, приборы для измерения количества теплоты — калориметры — не были новинкой и во времена Клаузиуса, ну а приборы для измерения температуры окружают сейчас каждого из нас в быту.

Клаузиус не только дал четкое определение энтропии как физической величины, но и стал ее крестным отцом, придумав новорожденной красивое и содержательное имя. Греческий корень «тропэ» имеет смысл «превращение», а мы уже знаем, что второй закон термодинамики, с которым связана энтропия, характеризует именно направление превращений энергии в замкнутой системе. «Эн» — это приставка, которой Клаузиус хотел подчеркнуть, что открытая им величина по своей значимости ничуть не уступает хорошо всем знакомой энергии.

Приведенная выше формула позволяет не только определить, на сколько изменилась энтропия, но и каково абсолютное значение последней. Для этого, правда, необходимо воспользоваться еще *тепловой теоремой Нернста*, называемой иногда *третьим началом термодинамики*: **энтропия почти любой системы при понижении температуры до абсолютного нуля также стремится к нулю**. Идея эксперимента, вытекающая отсюда, весьма проста: берем тело, энтропию которого хотим определить, охлаждаем до температуры, насколько возможно близкой к абсолютному нулю, а потом начинаем медленно и аккуратно нагревать, измеряя, сколько теплоты оно получило при нагреве на каждый градус. Затем для каждого пройденного градуса вычисляем приведенную теплоту, полученную телом, и складываем полученные значения. Эта общая идея действительно применялась на практике для определения абсолютных значений энтропии некоторых веществ.

Понимание энтропии как приведенной теплоты позволяет сформулировать второй закон термодинамики следующим образом:

Если внутри замкнутой системы происходит теплообмен, то сумма приведенных теплот, которыми обмениваются части системы, никогда не может быть отрицательной.

В таком виде закон кажется не очень понятным и даже скучным, однако можно перевести это на более практический язык:

Невозможен никакой процесс, единственным результатом которого был бы переход некоторого количества теплоты от более холодного тела к более горячему.

Эквивалентность последних двух формулировок трудно показать. Пусть замкнутая система состоит из двух частей с температурами T_1 и T_2 . Предположим, что первая часть получила количество теплоты dQ . Поскольку в целом система замкнута, теплоте больше неоткуда взяться, кроме как из второй части, которая, стало быть, теплоту dQ отдала, или что то же самое, получила $-dQ$. Сумма приведенных теплот при этом равна изменению энтропии всей системы: $DS = dQ/T_1 - dQ/T_2$ и, согласно второму началу, не может быть отрицательной, а для этого необходимо, чтобы $T_1 \leq T_2$

?? Какой смысл имеет слово «энтропия»?

?? В чем заключается третье начало термодинамики?

3.3. Энтропия как мера некачественности энергии

Иерархия форм энергии по признаку их качества

Как уже говорилось, первый закон термодинамики — закон сохранения энергии — похож на добросовестного бухгалтера, который сводит количественный баланс, не вмешиваясь в решения, принимаемые хозяином фирмы и не оценивая их с точки зрения, так сказать, качества капитала. Однако каждый, даже не имея опыта коммерческого руководства, понимает, что обменять деньги на эквивалентное количество, скажем, старых калош довольно легко, а вот обратная операция потребует усилий и вряд ли обойдется без финансовых потерь. Несмотря на то, что стоимость купленных калош может быть вполне эквивалентна потраченной сумме, такой качественный показатель, как ликвидность, у них гораздо ниже, чем у денег.

Разные формы энергии также могут обладать разной «ликвидностью». Не представляет проблемы, например, превращение энергии электрического тока в равное количество тепловой энергии. Для этого достаточно взять такое

простейшее устройство, как утюг или кипятильник, и воткнуть вилку в розетку. Процесс превращения электрической энергии в тепловую пойдет со стопроцентной эффективностью. Обратная же задача — превратить тепловую энергию в электрическую — гораздо сложнее. Для ее решения необходимо построить сложное и дорогостоящее сооружение — тепловую электростанцию. На электростанции теплота, выделяющаяся при сжигании топлива, идет на нагревание воды, которая превращается в пар, который крутит турбину, которая вращает ротор генератора, который, наконец, вырабатывает электрический ток. В результате же оказывается, что даже самая лучшая тепловая электростанция превращает в электроэнергию не больше **40%** тепловой энергии сгорания топлива. И дело не в нерадивых или неквалифицированных инженерах, проектировавших и строивших станцию, а в том, что сама природа не позволяет добиться большего. Просто тепловая энергия — менее качественная, менее «ликвидная», чем энергия электрическая.

Можно выстроить иерархию различных форм энергии в порядке убывания ее качества. На верхних ступенях этой иерархии, кроме электрической, находится, например, гравитационная энергия, которой обладает любой предмет, поднятый над землей. Именно благодаря этому коэффициент полезного действия гидроэлектростанций, которые используют именно гравитационную энергию воды, гораздо выше, чем у тепловых — до **90%**. Чуть ниже находится химическая энергия, заключенная, например, в бензине или в гальванических элементах (батареях). **Самое низкое качество у энергия тепловой, причем качество ее тем ниже, чем ниже температура тела.**

Введение понятия энтропии дало возможность от общих рассуждений о качестве энергии перейти к его точной количественной характеристике. Физики установили, что если система обладает запасом энергии U , то в полезную работу можно превратить не весь этот запас, а лишь его часть, которая называется свободной энергией:

Свободная энергия и энтропия

$$F = U - TS \quad (3.2)$$

где T — опять-таки температура, отсчитываемая от абсолютного нуля. Свободную энергию F и следует считать мерой качества энергетического запаса системы. Видно, что она тем меньше, чем больше энтропия S . Поэтому **энтропия системы является мерой некачественности ее энергетического запаса.**

Закон возрастания энтропии теперь можно сформулировать следующим образом:

Энергетический запас замкнутой системы, оставаясь неизменным количественно, с течением времени неуклонно ухудшается качественно.

Энергетические проблемы цивилизации заключаются не в том, чтобы найти источник энергии для удовлетворения потребностей человека, а том, чтобы найти источник энергии *высококачественной*. Если бы не это ограничение, мы могли бы буквально качать энергию из океана. Действительно, в океанах Земли находится $1,3 \cdot 10^{21}$ литров воды. При охлаждении каждого литра на один градус он отдает 4200 джоулей теплоты. Это означает, что если бы можно было всю тепловую энергию превратить в электрическую, то достаточно было бы ежегодно охлаждать океан всего лишь на $0,0002^\circ$, чтобы полностью покрыть все современные энергетические потребности человечества, составляющие около 10^{21} джоулей в год. Идея кажется тем более заманчивой, что практически вся производимая электроэнергия, в конечном счете, превращается в тепло, нагревающее тот же океан. Она, однако, неосуществима: запасы энергии океана действительно огромны, но его *свободная* энергия, которую можно превратить не в тепло, а в полезную работу, очень низка из-за высокой энтропии. Поэтому строительство сложных, дорогих и экологически грязных электростанций оказывается, в конечном счете, гораздо выгоднее.

?? Перечислите известные вам формы энергии в порядке возрастания их качества.

?? Какая физическая величина может служить мерой качества энергии, и как она связана с энтропией?

?? Почему мы употребляем словесные обороты вроде «производство энергии», хотя известно, что в силу

закона сохранения энергии она не может быть создана, а лишь переведена из одной формы в другую?
?? Можно ли изобрести аккумулятор, полностью превращающий свой запас энергии в энергию электрического тока?

3.4. Вероятностный смысл энтропии

До сих пор мы рассматривали энтропию как макроскопическую величину, наподобие давления или температуры, которые можно измерять или вычислять, не делая никаких предположений о микроскопическом строении тел. Однако ответить на вопросы «что такое температура?» или «почему газ давит на стенки баллона?» нельзя, не привлекая атомно-молекулярные представления.

Для подзабывших школьную физику напомним, что температура есть мера средней кинетической энергии беспорядочно движущихся молекул, а давление газа — это результат непрерывных ударов составляющих его молекул о стенки сосуда. Это было установлено в середине XIX века трудами Джеймса Прескотта Джоуля (1818–1889), Клаузиуса и Максвелла, создавших молекулярно-кинетическую теорию газов.

Понимание сущности столь фундаментальной физической величины, как энтропия, также не может считаться сколько-нибудь глубоким без выяснения того, что же она представляет собой с точки зрения движения и взаимодействия молекул. Исследование этого вопроса было предпринято **Людвигом Больцманом (1844–1906)**.

**Энтропия
системы
молекул:
формула
Больцмана**

*Больцман, представитель знаменитой венской физической школы, всю жизнь работал над развитием молекулярно-кинетической теории газов, бывшей в то время передним краем физики. Первую свою научную работу он опубликовал двадцатидвухлетним молодым человеком, последняя вышла незадолго до его преждевременной смерти. Начав с попыток вывести законы термодинамики из ньютоновской механики движения молекул, он пришел к пониманию того, что поведение больших коллективов частиц управляется более глубокими — не механическими, а **вероятностными** — законами. Он писал: «То,*

что в природе энтропия стремится к максимуму, доказывает, что при всяком взаимодействии реальных газов... отдельные молекулы вступают во взаимодействие в согласии с законами вероятности... Второе начало [термодинамики] оказывается, таким образом, вероятностным законом».

Вывод о том, что классическая механика — основа научного мировоззрения тогдашней эпохи — принципиально недостаточна для описания некоторых существенных сторон реальности, казался невероятно дерзким, особенно если учесть, что само существование атомов и молекул было тогда еще лишь гипотезой. Поэтому больцмановские работы встречали критику не только чисто научной стороны, что естественно для любой новой теории, но и с философско-мировоззренческой. Как водится, философские выступления противников Больцмана облекались в очень резкую форму и зачастую приобретали личностный характер, тем более, что наиболее непримиримыми критиками оказались земляки — члены венского «Кружка физиков и философов» во главе с Эрнстом Махом (1838–1916). Всё это закончилось печально: оставшись практически в одиночестве перед лицом нападок и травли, великий ученый принял решение добровольно уйти из жизни.

В нашей стране околوفизические страсти того времени получили достаточно широкую известность благодаря тому, что свою оценку происшедшего высказал В. И. Ленин в работе «Материализм и эмпириокритицизм», изучение которой в советское время стало обязательным элементом вузовского курса философии. Это, кстати, характеризует общекультурную значимость проблем развития науки на рубеже XIX–XX веков: ведь Ленин, как бы к нему ни относиться, от физики и вообще от естественных наук был крайне далек; его интересовала в первую очередь политика. И этот человек тратит полгода жизни и месяц сидит в библиотеке Британского музея, чтобы сформулировать свои соображения об идейном кризисе науки...

Главный результат Больцмана — это короткая формула, которую он завещал выбить на своем надгробии. В современных обозначениях она записывается так:

$$S = k \ln W , \quad (3.3)$$

где S — энтропия системы молекул, k — коэффициент пропорциональности (постоянная Больцмана), значение которого зависит от выбора единиц измерения, W — **статистический вес** данного макроскопического состояния системы. Относительно логарифмической функции (\ln) для нашего обсуждения достаточно знать, что она является монотонно возрастающей: чем больше W , тем больше $\ln W$ и тем больше энтропия S .

Статистический вес — это число способов, которым можно реализовать данное макроскопическое состояние системы.

Понятие статистического веса

Пояснить приведенное определение статистического веса можно на примере следующей простейшей системы. Рассмотрим ящик с двумя одинаковыми отделениями, между которыми имеется перегородка с небольшим отверстием. Удалим из него весь воздух до последней молекулы. Затем начнем вновь заполнять ящик молекулами, контролируя их количество и отделение, в которое помещается очередная молекула. Для определенности будем считать, что всего в нашем распоряжении $N = 10$ молекул.

*Конечно, для реальных систем N гораздо больше. Так, в одном литре газа при нормальных атмосферных условиях содержится примерно $3 \cdot 10^{22}$ молекул. Строго говоря, методы молекулярно-кинетической теории хорошо работают лишь при больших N . Однако числа типа $3 \cdot 10^{22}$ ничего не говорят воображению, человек просто не способен **почувствовать** такое громадное количество. Именно поэтому мы рассматриваем $N = 10$.*

При заданной температуре **макроскопическое** состояние системы, возникшее после помещения в ящик всех **10** молекул, вполне характеризуется **числом** молекул в каждом отделении. Действительно, такой макроскопический параметр, как, давление газа в данном отделении, пропорционален числу молекул в нем. Например, состояние системы на рисунке **3.1**, может быть обозначено как состояние **4|6**.

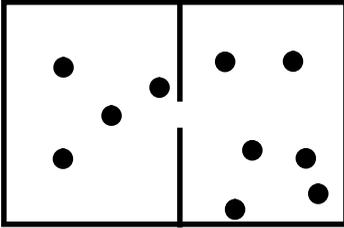


Рис 3.1.

Представим, что все **10** молекул в ящике пронумерованы (современные методы, кстати говоря, действительно позволяют метить отдельные молекулы). Тогда состояние, изображенное на рисунке **3.1**, можно получить, поместив в левое отделение молекулы номер **1, 2, 3** и **4**. А можно — молекулы **1, 3, 5, 7** или молекулы **7, 8, 9** и **10**, и т.д.

Наименьший статистический вес $W = 1$ имеют состояния $0|10$ и $10|0$, поскольку есть лишь один способ поместить все молекулы в правое (левое) отделения. Ста-

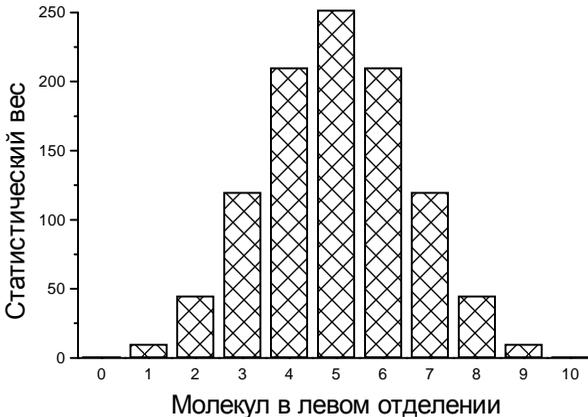


Рис 3.2.

статистический вес состояния $1|9$ равен 10 , поскольку одну молекулу, помещаемую в левое отделение, мы можем выбрать из имеющихся десяти способами. Если рассмотреть состояния с двумя молекулами в левом отсеке, то первую из них мы можем выбрать десяти способами, а вторую — девятью (одну из оставшихся 9 молекул). Всего получается $10 \cdot 9 = 90$ вариантов выбора, но это число надо разделить пополам во избежание двойного счета. Действительно, если мы выбираем для левого отделения сначала молекулу №5, а затем — №3, то это тот же способ размещения, что дает выбор сначала третьей, а потом уж пятой молекулы. Таким образом, статистический вес состояния $2|8$ (и состояния $8|2$) равен 45.

Нетрудно догадаться, что максимальным статистическим весом обладает состояние, в котором молекул в отделениях поровну.

Рисунок 3.2 иллюстрирует результаты расчета статистического веса для всех состояний нашей модели.

Предположим теперь, что мы поместили все десять молекул в левое отделение и закрыли ящик. Молекулы в нем беспорядочно двигаются, сталкиваются друг с другом и со стенками. Время от времени они проскакивают через отверстие в перегородке из одного отделения в другое. Можно ли ожидать, что, открыв через некоторое время ящик, мы опять обнаружим все десять молекул в одном отделении? Здравый смысл и интуиция подсказывают, что вряд ли — скорее всего, мы увидим одно из состояний $5|5$, $4|6$ или $6|4$, в которых молекулы распределены между отделениями примерно поровну.

«Вряд ли» — выражение неопределенное, расплывчатое. Физик предпочтет сказать: «вероятность состояния $5|5$ больше, чем состояния $0|10$ », поскольку

Статистический вес, вероятность и энтропия

вероятность есть величина, выражаемая числом. Но наиболее вероятное состояние $5|5$ — это одновременно состояние с наибольшим статистическим весом, а, значит, и с наибольшей энтропией.

Вычислить, во сколько раз вероятность реализации состояния $5|5$ больше, чем состояния $0|10$, можно, опираясь на постулат, сформулированный американцем Джо-зайей (или Джошуа) Уиллардом Гиббсом (1839–1903). В

применении к нашей модели этот постулат гласит, что вероятности всех **способов** распределения молекул по отделениям одинаковы. Но к состоянию $0|10$ приводит только один способ, а к состоянию $5|5$ — 252 способа. Поэтому последнее оказывается в 252 раза вероятнее первого. Не зря другое название статистического веса — «термодинамическая вероятность».

Гиббс придал статистической концепции Больцмана форму законченной строгой теории. Так, его постулат о равновероятности способов реализации состояний системы фактически есть точная формулировка утверждения о беспорядочности молекулярного движения.

Будучи в течение тридцати лет профессором Йельского университета и принимая по долгу службы участие в заседаниях ученого совета, Гиббс никогда не высказывался по организационным вопросам. Молчание он нарушил лишь однажды, когда обсуждалось предложение об увеличении объема подготовки студентов по иностранным языкам за счет некоторого сокращения курса математики. Фраза, произнесенная Гиббсом, состояла из трех слов: «Математика тоже язык».

Таким образом, чем больше вероятность состояния, в котором находится система, тем больше ее энтропия.

Энтропия является мерой вероятности обнаружить систему в данном состоянии.

Закон возрастания энтропии можно тогда сформулировать следующим образом:

С течением времени замкнутая система самопроизвольно переходит из менее вероятных в более вероятные состояния.

Статистический характер закона возрастания энтропии Выясненный вероятностный характер понятия энтропии обуславливает и вероятностный, статистический характер второго закона термодинамики. Конечно, состояние $5|5$ более вероятно, чем состояние $0|10$, но это не означает, что последнее невозможно. Есть примерно один шанс из тысячи, что, заглянув в очередной раз в ящик, мы обнаружим, что все молекулы опять собрались в правом отделении. Физик скажет, что возникла **флуктуация** — **самопроизвольное от-**

клонение системы от наиболее вероятного состояния, обусловленное беспорядочностью теплового движения. Поэтому последнюю формулировку второго закона следует понимать как утверждение о наиболее вероятном, но не единственно возможном развитии событий, как утверждение об общей тенденции. Правда, чем больше число молекул в системе, тем жестче выдерживается эта тенденция. В системах макроскопического размера сколько-нибудь значительные отклонения от нее не наблюдаются никогда.

Если поместить в наш ящик не 10, а 100 молекул, то статистический вес наиболее вероятного состояния 50/50 в 10^{29} раз превысит статистический вес состояния 0/100. Другими словами, если даже допустить, что каждая молекула переходит из одного отделения в другое тысячи раз в секунду (для этого пришлось бы перегородку между отделениями убрать вообще), то можно биться об заклад на что угодно, что, проведя всю жизнь возле ящика вы никогда не увидите бы, как все сто молекул вновь соберутся в одной половине. Более того, даже за все время существования Вселенной вероятность этого события не превысила бы одного шанса из миллиона! Общее правило гласит, что в системе N частиц реально можно наблюдать флуктуации размером примерно \sqrt{N} , а более масштабные флуктуации исключительно маловероятны.

- ?? Почему взгляды Л. Больцмана столь яростно оспаривались?
- ?? Почему статистический вес называют также термодинамической вероятностью?
- ?? Какова связь энтропия со статистическим весом?
- ?? Что такое флуктуация?
- ?? Законы природы не запрещают всем молекулам воздуха в один прекрасный момент случайно покинуть нашу комнату. Почему этого не происходит в реальности?

3.5. Энтропия как мера неупорядоченности

Зададимся вопросом: какое из состояний рассмотренной нами простейшей системы, состоящей из ящика с двумя отделениями и десяти молекул

Упорядоченность, структура, неоднородность

в нем, можно назвать более упорядоченным: однородное состояние 5|5 или предельно неоднородное 0|10?

Однородность в данном случае означает одинаковость свойств системы во всех ее частях. Борщ — система неоднородная, поскольку в нем кое-где плавают кусочки овощей, свойства которых существенно отличаются от свойств бульона. А вот приключения героя в фильме «Ирония судьбы» обусловлены именно однородностью застройки «спальных» микрорайонов по всей стране.

Обычно мнения по заданному вопросу разделяются почти пополам. Многими упорядоченность понимается в духе армейского единообразия: порядок тогда, когда все одинаково одеты и одинаково застилают постели. Однако армия, в которой нет разных родов войск, нет командиров и подчиненных, нет никакой *неоднородности* — это не армия, не организация, а толпа, пусть даже вся она облачена в камуфляж. Если же вернуться к нашему ящику, то правильный ответ станет очевиднее, если представить, что в нем не два, а двадцать отделений, а молекул не десять, а сто. Какое состояние такой системы более упорядоченное: 0|10|0|10|0|10|... или 5|5|5|5|5|5|...?

Понятие упорядоченности тесно связано с понятием **структуры**, а структура требует неоднородности. Английский парк более упорядочен, чем естественная роща тех же размеров, поскольку имеет более четко выраженную структуру: дорожки, кусты, деревья. При этом растения каждого вида высаживаются только на определенных участках, а в других местах парка вы их не найдете. В библиотеке порядок, если книги по полкам распределены неоднородно: на этой полке — только книги по истории, а на той — только по химии; слева на каждой полке — авторы с фамилиями, начинающимися на «А», а справа — на «Я», и т.д.

Общий вывод из этих рассуждений заключается в том, что более однородное состояние является менее упорядоченным. Но мы видели, что энтропия нашей модельной системы максимальна именно для ее однородного состояния. Таким образом, мы приходим к пониманию еще одного свойства энтропии:

Энтропия есть мера неупорядоченности того состояния, в котором находится система.

Связанная с этой гранью понятия энтропии формулировка второго закона термодинамики гласит:

С течением времени степень упорядоченности замкнутой системы неизбежно понижается, а имеющиеся в ней структуры разрушаются.

Понимание энтропии как меры неупорядоченности системы позволяет применять ее для описания свойств не только материальных объектов, но и *сообщений*. **Энтропийный анализ текстов**

Представим себе, что у нас есть отрывок текста, написанного буквами русского алфавита, причем из всех знаков препинания используются только пробелы между словами. Вместо букв с тем же успехом можно было бы использовать числа от 1 до 34 (№34 означает пробел). Физической моделью такого текста служит ящик с количеством отделений, равном количеству букв в тексте, причем количество молекул в каждом отделении соответствует номеру буквы в алфавите. Можно определить понятие статистического веса и для такой системы и вычислить его с помощью приемов, похожих на те, что описаны в п. 3.4.

Формула Больцмана говорит, что энтропия этой системы максимальна, если вероятность обнаружить в заданном отделении N молекул (вероятность того, что заданная буква текста имеет номер N в алфавите) одна и та же для любого N (на заданном месте может с равной вероятностью стоять любая буква или пробел). Состоянием с наибольшей энтропией (примерно $3.5k$ на одну букву), как и положено, называется наиболее однородное состояние. Однако оно соответствует и наиболее бессмысленному тексту! В книге [5] приводится пример текста, в котором вероятность появления (другими словами, распространенность) любой буквы одна и та же:

СУХЕРРОБЬДЦ
ЯЫХВЩИЮАЙЖТЛФВНЗАГФОЕНВШТЦР
ПХГБКУЧТЖЮРЯП...

Понять, что приведенная фраза бессмысленна, может и человек, не знающий русского. Во-первых, в естественном языке слова не такие длинные, то есть пробел должен встречаться гораздо чаще. Во-вторых, в каждом языке есть буквы, употребляемые чаще других (например, в русском это «о», в английском — «е»). В-третьих, вероятность того, что на данном месте стоит данная буква, сильно зависит от ее окружения: после пробела мы никогда не увидим твердо-го или мягкого знака, а после букв «тьс» наверняка идет «я». Таким образом, осмысленный, упорядоченный текст не может рассматриваться как однородная система.

Именно благодаря свойству неоднородности осмысленного текста разгадывают зашифрованные послания герои рассказов Артура Конан Дойля «Пляшущие человечки» и Эдгара По «Золотой жук».

Расчет, учитывающий неоднородность текста на естественном языке, показывает, что его энтропия составляет примерно $0.7k$ на букву, то есть в пять раз меньше, чем у беспорядочного набора букв. Этот результат оказывается практически не зависящим от того, какой именно язык мы выбрали для анализа. Снова мы убеждаемся, что снижение энтропии эквивалентно повышению упорядоченности.

Энтропия генетического текста

В 2005 году успешно завершились работы по грандиозной международной программе «Геном человека». Напомню, что геном записан в молекулах ДНК, находящихся в хромосомах и несущих всю наследственную информацию живого организма. Каждую молекулу ДНК можно рассматривать как текст, написанный Природой с помощью алфавита из четырех букв А, Т, Г и Ц (это обозначения четырех нуклеотидов, которые, соединяясь в длинную цепочку, образуют ДНК). Объем текста громаден: в человеческом геноме три миллиарда «букв», что при пересчете в типографские печатные знаки дает семьдесят пять тысяч авторских листов, или тысячу томов формата Большой Советской Энциклопедии. А ведь надо не просто скопировать этот текст, но и понять его смысл!

Одна из проблем, которую исследуют в связи с программой «Геном человека», заключается в том, что кроме генов (участков ДНК, описывающих строение того или

иного белка, необходимого для организма), — на ДНК имеются так называемые интроны — молчащие участки, которые вроде бы ничего не описывают и ни на что не влияют. Зачем же они присутствуют в молекуле? Одна из гипотез гласила, что молчащие участки — результат накопления чисто случайных ошибок в процессе передачи генетической информации. Однако в этом случае записанный в них текст должен быть абсолютно неупорядоченным и бессмысленным. Группа ученых, возглавляемая известным специалистом по статистической физике Юджином Стенли, рассчитала энтропию генетического текста в молчащих участках ДНК и обнаружила, что она существенно ниже, чем для чисто случайной последовательности нуклеотидов. Более того, она оказалось ниже, чем энтропия текста кодирующих участков ДНК! Это означало, что и молчащие участки несут какой-то смысл. Лишь в последние пару десятилетий биологи начали понимать, что интроны действительно не мусор, а инструменты, необходимые для регуляции микропроцессов копирования и «овеществления» генетической информации...

?? Какова связь понятий «однородность», «структура», «порядок»?

?? Какова связь энтропии с упорядоченностью системы?

?? Как вы полагаете, энтропия какого текста ниже: прозаического или поэтического?

3.6. Энтропия и информация

Обратимся еще раз (последний) к нашей модели ящика с двумя отделениями и задумаемся над вопросом: в каком случае мы знаем о системе больше: когда она находится в состоянии $0|10$ или в состоянии $5|5$? Очевидно, в первом: про *каждую* молекулу мы можем точно сказать, в каком она отделении — в правом. Если же система находится в состоянии $5|5$, то интересующая нас конкретная молекула может с равной вероятностью быть в любом отделении.

Для остальных состояний количество доступной информации о системе будет промежуточным между этими двумя крайними случаями. Например, если нам известно, что состояние системы есть $8|2$, то на вопрос «где находится молекула №1?» можно ответить, что с вероятностью $0,8$ она в левом отделении — а это означает, что мы знаем больше,

чем ничего. Опять прослеживается четкая связь: чем меньше статистический вес состояния системы, то есть чем меньше энтропия, тем определеннее наши знания о системе.

Энтропия системы есть мера отсутствия информации о ее внутреннем устройстве.

Соответственно, в силу закона возрастания энтропии:

Количество доступной о замкнутой системе информации с течением времени уменьшается.

Энтропия и количество информации по Шеннону

Одна из основных дисциплин, определяющих лицо современной науки и технологии — это теория информации. Она выросла из работ **Клода Элуида Шеннона (1916–2001)**, опубликован-

ных в 1948–1949 гг., где он дал четкое определение «количества информации».

Исходным для Шеннона было понятие энтропии распределения вероятностей некоторых событий. Под событием можно понимать, например, появление определенной буквы в тексте, передаваемом по каналу связи. До того, как приемник получил значение очередной буквы, на ее месте можно было ожидать появления почти любого символа алфавита. Другими словами, распределение вероятностей событий «на данном месте стоит n -я буква алфавита» было более или менее однородным. Получение буквы, скажем, «А», вносит неоднородность: вероятность того, что на данном месте стоит «А», становится равной единице, а вероятности любых других символов — нулю. Но увеличение неоднородности приводит, как мы уже знаем, к уменьшению энтропии!

Шеннон и определил количество полученной системой информации DI как понижение ее энтропии в результате приема сообщения:

$$DI = - DS . \quad (3.4)$$

Это определение, основанное на понимании энтропии как меры отсутствия информации, оказалось чрезвычайно

плодотворным и представляет собой теоретическую основу всех современных технологий передачи, хранения и обработки информации.

Поскольку понижение энтропии системы символов трудно представить себе как тепловой процесс, «охлаждение», некоторое время шли споры, можно ли отождествлять энтропию «по Шеннону» с энтропией «по Клаузиусу и Больцману». В конце концов возобладала точка зрения, что, хотя это вещи, строго говоря, несколько разные, очень тесные математические и физические аналогии позволяют утверждать, по крайней мере, их сопоставимость.

Очень ярко проявляется связь между энтропией и информацией в теории «черных дыр», существование которых предсказывается общей теорией относительности Эйнштейна. «Черная дыра» — это объект с таким сильным тяготением, что даже скорости света недостаточно, чтобы вырваться из сферы ее притяжения. Поскольку же скорость света — максимально возможная скорость движения материальных тел, а информация без материального носителя не существует, то тем самым налагается абсолютный запрет на получение любой информации о внутреннем устройстве «черной дыры». Один из крупнейших специалистов по теории гравитации Джон Уилер (1911–2008) доказал знаменитую теорему о том, что «у черной дыры нет волос»: все ее свойства для внешнего наблюдателя **полностью** описываются тремя величинами — массой, электрическим зарядом и моментом импульса (величиной, которая характеризует скорость вращения). Вся информация о структуре материи, падающей в «черную дыру», полностью утрачивается, а это означает рост энтропии. Некоторое время было неясно, что такое энтропия «черной дыры», но потом выяснилось, что роль энтропии в данном случае играет просто площадь поверхности. В частности, во всех обычных процессах, идущих по принципу «всё впускать, ничего не выпускать», площадь «черной дыры» может только возрастать.

Квантовые эффекты дают возможность «черной дыре» не только поглощать, но и излучать. Дело в том, что квантовая теория допускает рождение частиц из вакуума (то есть, с обыденной точки зрения, из ничего) при условии, что имеется источник необходимой для это-

Энтропия, информация и «черные дыры»

го энергии. Англичанин Стивен Хокинг (р. 1942) показал, что вблизи «черной дыры» рождаются световые кванты — фотоны, — за счет энергии гравитационного поля «дыры». При этом и масса, и площадь поверхности «черной дыры» уменьшаются. Не приводит ли это к нарушению второго закона термодинамики? Оказывается, ничуть: излучение «черной дыры» тоже обладает энтропией, которая с лихвой покрывает понижение энтропии самой «дыры». В конечном счете «черная дыра» исчезнет, «высветится», и заключенная в ней материя перейдет в обычное состояние — но информация о первоначальном состоянии этой материи, до падения в «дыру», утрачивается необратимо.

?? Почему определение Шеннона количества информации через понятие энтропии было удобным?

?? Как звучит второй закон термодинамики на языке теории информации?

3.7. Энтропийный баланс Земли

Итак, второй закон термодинамики утверждает, что с течением времени качество энергии должно понижаться, беспорядок — расти, имеющиеся структуры — разрушаться, неоднородности — сглаживаться. Кажущееся противоречие между этими утверждениями и наблюдаемыми в биологических системах явлениями эволюционного развития составляет сущность *основного естественнонаучного парадокса эволюционной картины мира* (с. 36).

Но ведь все мы являемся пассажирами космического корабля под названием «Земля». Вот уже четыре с половиной миллиарда лет он несется в космосе, а его экологическая система — биосфера — при этом не только не деградирует, но даже развивается и совершенствуется. Все правильно, но Земля и не является замкнутой системой! Постоянный обмен энергией с окружающим космическим пространством позволяет нашей планете соблюдать отрицательный **энтропийный баланс** и создает необходимые условия для химической, биологической и социальной эволюции в **геосфере**. Попытаемся разобраться в основных приходных и расходных статьях энтропийного баланса Земли.

Если бы Земля была замкнутой системой (например, если бы ее окружала теплоизолирующая оболочка, непроницаемая для вещества и излучения), то, в полном соответствии со вторым законом термодинамики, ее энтропия с течением времени возрастала бы. Физики говорят так: в ходе любых процессов в геосфере производится энтропия. Энтропия производится при извержениях вулканов и перемещении циклонов. Энтропия производится в ходе промышленного производства и при любом движении человека. Короче говоря, что бы ни происходило на Земле (и не только на Земле), всё это сопровождается производством энтропии. Энтропия не производится только в том случае, если не происходит абсолютно ничего, либо если скорость происходящих процессов бесконечно мала — но такого в реальности не бывает.

**Источники
поступления
энтропии
в геосферу**

Обозначим ежегодное производство энтропии в геосфере DS_{in} (от английского *internal* — внутренний).

Вычислить DS_{in} — задача очень сложная и до сих пор не решенная. Дело в том, что не существует одного универсального рецепта вычисления количества производимой энтропии, который был бы применим к любому процессу. В разных ситуациях оказывается необходимым использовать разные формулы и способы вычисления. Такая же проблема существует, например, и для энергии: кинетическая энергия равна $mv^2/2$, а потенциальная mgh ; энергия сжатой пружины есть $kx^2/2$, заряженного конденсатора — $CU^2/2$, катушки с током — $LI^2/2$, и т.д. Для энтропии соответствующие формулы еще сложнее.

Кроме внутреннего производства, Земля получает определенную порцию энтропии вместе с энергией падающего на нее солнечного света. Эта энергия весьма велика: если взять площадку размером всего 1 м^2 и поставить ее перпендикулярно солнечным лучам, то мощность падающего на нее света составит более **1** киловатта — вполне достаточно, чтобы питать электроутюг. Помножив эту мощность на количество секунд в году и на количество квадратных метров на Земле, получаем годовой поток солнечной энергии на Землю $Q \sim 10^{25}$ джоулей.

Из этого количества треть сразу же отражается в космос облаками и поверхностью Земли. Пятая часть поглощается воздухом и идет, в основном, на его нагревание, а почти половина поглощается почвой. Лишь 0,2% падающего на Землю солнечного света используется в процессе фотосинтеза в зеленых растениях и дает начало сложной цепочке взаимопревращений веществ и энергии, благодаря которой существует всё живое на Земле.

По своему характеру и качеству энергия солнечного света тепловая. Дело в том, что Солнце светит по той же причине, по которой светится, например, раскаленный уголек: оно горячее. Температура внешних слоев Солнца, которые мы, собственно, и видим, составляет $T_1 \sim 6000 \text{ К}$ (градусов Кельвина). Каждое нагретое тело, согласно физическим законам, обязано светиться, испуская так называемое *тепловое излучение*. Светится Солнце, светится раскаленная вольфрамовая нить в лампочке, светится человеческое тело... Правда, температура нашего тела всего лишь 310 К , и потому светится оно далеко не так ярко, как Солнце, да и свечение это приходится не на видимый диапазон спектра, а на инфракрасный, который наши собственные глаза не воспринимают. Зато к излучению этого диапазона чувствительны приборы ночного видения, позволяющие наблюдать людей и другие нагретые тела на окружающем более прохладном фоне даже самой темной ночью. Естественно, энергию теплового излучения следует считать тепловой.

Пути удаления энтропии из геосферы

Итак, ежегодно Земля получает от Солнца Q джоулей тепловой энергии при температуре, равной температуре Солнца T_1 . За счет этого энтропия планеты должна возрастать (с. 158) на $DS_{\text{ex}} = Q / T_1$. С другой стороны, от такого же количества энергии Земля должна ежегодно избавляться, иначе она непрерывно нагревалась бы. Механизм охлаждения тот же: Земля — нагретое тело (средняя температура Земли составляет $T_2 \gg 300 \text{ К}$), и, как любое нагретое тело, она обязана испускать тепловое излучение. Вместе с ним Земля выбрасывает в космическое пространство такое же количество энергии, которое получает от

Солнца, но энергии более низкокачественной, соответствующей более низкой температуре.

Уходящее с Земли тепловое излучение уносит с собой значительное количество энтропии: $DS_{\text{вых}} = Q / T_2$. Если сравнить эту величину с $DS_{\text{вх}}$, то легко видеть, что поток уходящей с Земли энтропии в $T_1 / T_2 \gg 20$ раз превышает входящий поток. Выброс энтропии в космическое пространство настолько велик, что может компенсировать не только энтропию падающего на Землю солнечного света, но и производство энтропии в геосфере:

$$DS_{\text{вх}} + DS_{\text{ин}} < DS_{\text{вых}}. \quad (3.5)$$

Данное неравенство выражает собой *отрицательный энтропийный баланс Земли* (рис. 3.3). При его соблюдении энтропия нашей планеты в целом с течением времени не только не увеличивается, но даже уменьшается — за счет энергообмена с окружающим миром. Именно благодаря этому оказываются возможными самые разнообразные эволюционные процессы в геосфере.

**Энтропийный
баланс
развивающихся
систем**

Аналогичный анализ энтропийных потоков можно, в принципе, провести применительно к любому живому существу. Оказывается, что организм поддерживает свое упорядоченное, низкоэнтропийное состояние не за счет какой-то нефизической внутренней способности к понижению энтропии, как полагал Вернадский (это запрещено термодинамикой), а за счет непрерывного поглощения высококачественных, низкоэнтропийных веществ и энергии из окружающей среды и выброса в нее отработанных низкокачественных веществ и энергии с высоким содержанием энтропии. ***Не производство упорядоченности в себе, а непрерывное «извлечение упорядоченности» из окружающей среды — вот в чем сущность жизни с точки зрения термодинамики.***

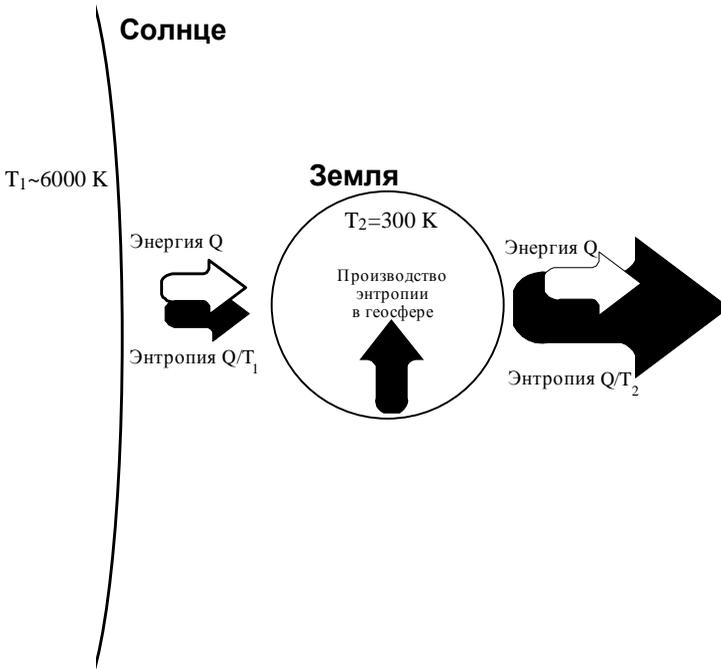


Рис. 3.3. Энергетический и энтропийный балансы Земли

«Извлечение упорядоченности из окружающей среды» — фраза из знаменитой книги **Эрвина Шрёдингера (1887–1961)** «Что такое жизнь? С точки зрения физика», написанной по материалам лекций, которые он прочел в феврале 1943 г. в Дублине.

Шрёдингер прославился как один из создателей квантовой механики. Его имя носит главное уравнение этой физической дисциплины. Обладая выдающимся интеллектом и широкими интересами (он, например, написал книгу по древнегреческой философии и был неплохим скульптором), Шрёдингер, наряду с Георгием Гамовым и Френсисом Криком был одним из первых физиков, кто

осознал смену вех в естествознании, смещение фронта фундаментальных исследований в область науки о живом. Книга «Что такое жизнь?» содержит ряд точно поставленных принципиальных вопросов. Почему живые организмы состоят из такого огромного количества атомов? Почему гены, представляющие собой образования молекулярных размеров, так устойчивы к разрушительному действию хаотического теплового движения? Другими словами, почему мутации так редки? Как описание сложнейшего устройства живого организма помещается в микроскопическом объеме хромосом? Как объяснить поддержание упорядоченного функционирования живого организма, несмотря на непрерывное производство энтропии внутри него?

Многие выдающиеся биологи и биофизики впоследствии вспоминали о чрезвычайно сильном впечатлении, произведенном на них этой тощей брошюрой. Один из ученых, получивших Нобелевскую премию за расшифровку структуры молекулы ДНК, **Джеймс Уотсон** (р. 1928), рассказывал о своем соавторе по открытию, Ф. Крике: «Он бросил физику и занялся биологией после того, как в 1946 г. прочитал книгу известного физика-теоретика Эрвина Шрёдингера «Что такое жизнь?».

?? Каковы главные «доходные» и расходные статьи энтропийного баланса Земли?

?? Какова сущность жизни с точки зрения термодинамики?

3.8. Термодинамические ограничения экстенсивного развития

Пока энтропийный баланс Земли, описываемый формулой (3.5), остается отрицательным, пока планета успевает выбрасывать накапливающийся в геосфере «мусор», — до тех пор сохраняется принципиальная возможность **устойчивого развития** земных систем — географических, биологических и социальных.

Термодинамическое условие возможности устойчивого развития

Устойчивое развитие (sustained development) — широко используемый сейчас термин, перекочевавший из специальных экологических исследований в лексикон международной политики и средств массовой информации.

Термин достаточно многогранен, но в общем его смысл можно передать как уверенное сохранение тенденций поступательного прогресса, надежное исключение возможности деградационных явлений, экологических и социальных катастроф.

Обязан ли энтропийный баланс Земли оставаться отрицательным вечно? Для ответа на этот вопрос рассмотрим величины, входящие в формулу (3.5): входящий и выходящий потоки энтропии DS_{ex} и $DS_{вых}$ и производство энтропии в геосфере DS_{in} .

**Стабильность
потоковых
составляющих
энтропийного
баланса Земли**

Входящий с солнечным светом поток энтропии зависит от светимости Солнца и температуры его поверхности. Из астрофизики известно, что наше светило относится к классу спокойных и стабильных звезд. Результаты как теоретического моделирования эволюции Солнца, так и геологических исследований показывают, что на протяжении земной истории ни поток солнечного излучения, ни его температура не испытывали изменений, которые можно было бы назвать существенными. Такая стабильность сохранится и в течение ближайших 3–7 миллиардов лет. Поэтому входящий поток энтропии DS_{ex} можно считать практически неизменным.

Поток энтропии, выбрасываемой с земной поверхности в космическое пространство, $DS_{вых}$, также не должен измениться в обозримом будущем, если только не изменится глобальный механизм удаления отходов с планеты. Действительно, $DS_{вых}$ зависит от средней температуры Земли T_2 , изменения которой даже во времена ледниковых периодов не превышали 2–3%. В наиболее пессимистических прогнозах глобального потепления, связанного с парниковым эффектом, предсказывается возможное повышение температуры лишь на 1–2°. Есть еще зависимость $DS_{вых}$ от состояния поверхности и атмосферы Земли, но и она находится в пределах $\pm 5\%$. Таким образом, и это слагаемое в равенстве (3.5) можно считать постоянной величиной.

Наиболее динамичной составляющей энтропийного баланса Земли является производство энтропии в геосфере. Как уже говорилось, энтропия производится в ходе любого реального процесса.

Динамика производства энтропии в геосфере

Поэтому чем интенсивнее идут процессы (любые!) на планете, тем больше DS_{in} . Интенсивность земных процессов, высокая сама по себе (сравните изменчивые формы земной поверхности с застывшим миром нашего спутника, Луны), испытала резкое ускорение с возникновением жизни. Не зря В.И. Вернадский назвал деятельность живых существ одним из основных факторов геологической истории... В еще большей степени возросла скорость производства энтропии с возникновением цивилизации и выходом ее на стадию промышленного развития. В некоторых случаях рост произошел в астрономическое число раз.

До появления человека каждое ядро природного урана-235 распадалось в среднем за миллиард лет. Процесс распада связан с превращением высококачественной внутриядерной энергии в тепловую и потому сопровождается производством энтропии. Впрочем, в расчете на год оно оказывается невелико из-за большой длительности процесса.

Что делает человек? Он добывает урановую руду, обогащает ее и использует в атомном реакторе, где радиоактивный распад искусственно ускоряется и происходит за месяцы (а в атомной бомбе — вообще за доли секунды). Если бы даже при этом производилось столько же энтропии, сколько при естественном распаде, то и тогда ускорение производства энтропии составило бы миллиарды раз. А ведь, кроме того, ускорение любого процесса приводит к увеличению полного количества произведенной в его ходе энтропии.

Быстрый рост производства энтропии в результате развития цивилизации может привести к нарушению энтропийного баланса Земли, то есть к превращению неравенства (3.5) в равенство, а затем и к изменению его знака. Если энтропийный баланс планеты становится положительным, то есть если сумма производства энтропии в геосфере и входящего энтропийного потока становится больше выходяще-

го потока, то с каждым годом энтропия планеты в целом будет возрастать. А рост энтропии, как мы уже знаем, проявляется как увеличение беспорядка и разрушение имеющихся структур. В первую очередь начнут разрушаться структуры, возникшие последними, находящиеся на вершине экологической пирамиды. Ну, а самой молодой из глобальных земных структур является человечество.

Глобальный экологический кризис

Хотя рассчитать ежегодное производство энтропии во всех земных процессах еще не удастся, имеются признаки, свидетельствующие, что мы уже подошли к опасному рубежу, за которым энтропийный баланс планеты меняет свой знак. Эти признаки — знакомые всем симптомы глобального экологического кризиса: загрязнение окружающей среды, уменьшение биологического разнообразия, разрушение природных механизмов саморегуляции и связанное с этим снижение устойчивости экосистем... С точки зрения термодинамики, всё это — проявления недостаточно эффективного удаления энтропии, неспособности естественного «мусоропровода Земля–Космос» справиться с нарастающим потоком отходов.

*Тезис о том, что насыщение геосферы неудаленной энтропией проявляется как экологический кризис и чревато началом разрушения общества, заставляет еще раз задуматься о характере связи между обществом и природой. Большинство людей воспринимают эту связь как одностороннюю: мол, современное общество в погоне за достатком и роскошью разрушает природу. Мало кто обращает внимание на другую сторону вопроса: **а как экология воздействует на общество?** Между тем, глобальные экологические проблемы уже выдвинулись в качестве одного из основных яблок раздора в проблеме отношений Севера (богатых развитых стран) и Юга (бедных развивающихся стран). Суть дела метко схвачена в одной карикатуре, на которой изображен изможденный человек в сомбреро, рубящий высокое ветвистое дерево. Мимо в роскошном лимузине проезжает господин в цилиндре и с сигарой в зубах и кричит: «Эй, амиго, оставь дерево в покое, оно дает нам кислород!»*

В развитых странах большое влияние приобретают политические движения и партии «зеленой» ориентации, да и традиционные партии все большее внимание в своих

программах уделяют экологии. У нас экологические лозунги пользовались очень большой популярностью во время первых реальных выборов народных депутатов СССР и России в конце 80-х годов. Сейчас проблемы экологии в списке приоритетов нашего общества отошли на задний план перед лицом более насущных социально-экономических проблем — но это лишь внешнее впечатление. Не будет удивительно, если в результате более тщательных исследований выяснится связь между ухудшающейся экологической ситуацией и такими социальными проблемами, как наркомания, преступность, эскапизм (разные формы бегства от действительности) и т.д/4

Как можно отсрочить, а лучше — предотвратить нарушение энтропийного баланса Земли? Поскольку проблема стоит достаточно остро, то и решения часто предлагаются самые радикальные.

Наиболее экстремистская точка зрения заключается в том, что надо закрыть все атомные, тепловые и гидроэлектростанции, ликвидировать все вредные производства (а невредных производств, между прочим, не бывает) и фактически вернуться к натуральному хозяйству. Не говоря уже о том, что совершенно неясно, какими политическими средствами можно было бы провести в жизнь этот проект и как обеспечить с помощью натурального хозяйства существование нынешнего шестимиллиардного населения Земли, это представляется нереальным и с точки зрения более фундаментальных соображений. Во-первых, наша цивилизация является эволюционирующей системой — а это означает, что она не просто существует в развитии, но и **может существовать только в развитии**. Любая попытка остановить развитие, а тем более попытка вернуться назад, означает гибель этой системы. Во-вторых, эволюция, как отмечалось на с.14, есть процесс необратимый, не допускающий возвращения в однажды пройденное состояние. Максимум, чего здесь можно добиться — внешнего сходства, подобия. Можно лишь декорировать старинным фасадом современное жилье, пронизанное инженерными коммуникациями.

**Оценка
предлагаемых
путей выхода из
кризиса**

В более умеренных предложениях промышленным и энергетическим предприятиям допускается существовать, но лишь при условии, что они будут переведены на полностью безотходное производство. При оценке этой точки зрения надо договориться о смысле слова «безотходный».

Слово «отходы» ассоциируется обычно с нежелательными химическими веществами, возникающими при производстве продукта и не входящими в его конечный состав. Но, во-первых, сам продукт после использования может превратиться в отходы (пример — пластиковые бутылки, которые занимают все большую долю в объеме бытового мусора). Во-вторых, *отходы — это не только химические вещества.*

Современные тепловые электростанции, особенно работающие на жидком топливе, не выбрасывают в атмосферу практически ничего, кроме углекислого газа и водяного пара. Можно ли назвать их безотходными? Нет! Даже если пренебречь тем, что накопление углекислого газа в атмосфере усиливает парниковый эффект и создает угрозу глобального потепления, не надо забывать о том, что около 60% энергии сгорания топлива сразу превращается в низкокачественную тепловую энергию с повышенным содержанием энтропии. Такая электростанция создает *тепловое загрязнение* окружающей среды — явление, хорошо известное экологам-профессионалам. Проявляется оно, например, в том, что температура в реке или озере, куда спускают теплую воду из охлаждающих систем электростанции, повышается. В результате исчезают ценные виды животных и растений, но появляются другие, нежелательные, с которыми приходится бороться (например, ряска). Кстати говоря, те 40%, которые вроде бы превратились в электроэнергию, в результате использования последней рано или поздно тоже приобретут форму тепловой энергии при температуре окружающей среды.

Таким образом, если требовать создания действительно безотходного производства, то эта задача невыполнима: в ходе любой деятельности энтропия, то есть отходы в той или иной форме, неизбежно производится. Если же речь идет о прекращении выброса в окружающую среду любых (или хотя бы не свойственных ей) химических веществ, то

эта цель, в принципе, достижима и может быть поставлена. Однако не приходится рассчитывать на ее достижение в ближайшем будущем, и потому требование немедленного внедрения безотходных технологий также нереалистично.

Как ни странно, наиболее эффективным и перспективным представляется путь, не связанный с какими-то сверхреволюционными идеями: путь достаточно мелочной экономики. Один и тот же продукт, удовлетворяющий потребности людей, можно произвести, заплатив разную энтропийную цену. Это разрешено термодинамикой: известно, что производство энтропии при переходе системы из одного состояния в другое зависит от способа перехода. Если говорить конкретнее, то вот, пожалуйста, примеры.

Можно обеспечить необходимый для автомобиля запас прочности путем усиления всех несущих конструкций избыточным металлом, а можно сделать это путем более тщательного расчета нагрузок, возникающих при эксплуатации машины, и соответствующей доработки конструкции. Можно строить «хрущевки» и так называемые «дома улучшенной планировки», продуваемые насквозь, и потом через щели и открытые форточки отапливать атмосферу, а можно потратить чуть больше денег на качественные стройматериалы, пластиковые окна и современное инженерное оборудование жилья — и уменьшить количество энергии, необходимой для отопления, соответственно сократив производство энтропии. Не составляет труда продолжить список таких примеров.

О величине имеющихся здесь резервов свидетельствует, например, заявление вице-премьера российского правительства Бориса Немцова в телепрограмме «Час пик» 7 июля 1997 г., что расход энергии на отопление одного квадратного метра жилья в России в пять раз больше, чем в скандинавских странах.

В развитых странах уже завершился этап научно-технической революции, связанный с переходом промышленности на материало- и энергосберегающие технологии. Переход был подстегнут энергетическим кризисом 70-х годов, показавшим — весомо, грубо, зримо, — что эра дешевого сырья и энергии закончилась.

С 1972 по 1985 г. средняя стоимость электроэнергии и угля в США возросла вдвое (с вычетом поправок на инфляцию), а природного газа — вчетверо. Кроме того, значительно возросли расходы на соблюдение требований природоохранного законодательства. На системы газоочистки и золоудаления современных американских тепловых электростанций приходится 40% капитальных затрат и 35% эксплуатационных расходов.

Присущие рынку обратные связи заставили задуматься о том, как повысить эффективность использования имеющихся ограниченных ресурсов. Оказывается, что возникающие здесь задачи не являются непосильными. Достаточно простые прикидки говорят, что постоянно, пусть даже небольшое, снижение ресурсоемкости производства позволяет полностью снять остроту проблемы истощения запасов. **Карл Карлович Ребане (1926–2007)**, эстонский физик, активно разрабатывавший проблему термодинамических ограничений развития цивилизации, приводил следующий пример: чтобы запасов каменного угля в США хватило **навсегда**, достаточно сокращать его потребление всего лишь на **0,03%** в год, или на **3,5%** в столетие!

**Информация
как основной
производственный ресурс**

Но способы повышения эффективности производства (эффективности, понимаемой, в том числе, в термодинамическом и глобально-экологическом смысле) не лежат на поверхности. Более эффективное производство оказывается более сложным, тоньше организованным, постоянно требующим новых инженерных и управленческих технологий. Именно поэтому следующий этап современной научно-технической революции, который разворачивается на наших глазах, связан с *выдвижением информации на роль главного производственного ресурса*. Не угля, не стали, не нефти, а информации! Главная проблема стала заключаться не в том, чтобы физически произвести тот или иной продукт, а в том, чтобы выяснить: нужен ли он кому-нибудь? Если нужен, то в каком количестве? Какими свойствами он должен обладать? Как его произвести с приемлемыми затратами? Как наиболее эффективно организовать производство? Если эти во-

просы решены, физическое создание продукта состоится очень быстро.

В силу того, что информация — антиэнтропийный фактор, повышение информационной емкости производства можно рассматривать как тенденцию к снижению энтропийной нагрузки на геосферу, к уменьшению производства энтропии в ходе человеческой деятельности. Для обеспечения устойчивого развития важно сохранять и поддерживать эту тенденцию.

В заключение этого раздела обсудим два следующих вопроса.

Во-первых, нельзя ли поддерживать отрицательный энтропийный баланс Земли не столько борьбой за снижение производства энтропии, сколько повышением скорости удаления отходов с планеты? Этот путь представляется довольно затруднительным. В принципе, можно было бы загружать ракеты хотя бы самыми вредными отходами (например, радиоактивными) и отправлять их прямым курсом в Солнце. Техническая возможность для этого имеется уже сейчас. Однако делать так было бы, мягко говоря, нецелесообразно. С одной стороны, стоимость выведения 1 кг груза даже на низкую околоземную орбиту составляет тысячи долларов. Вряд ли кто-нибудь сможет оплачивать такие дорогие услуги мусорщиков. С другой стороны, каждый запуск космического аппарата сам связан с серьезным загрязнением окружающей среды. Так, одна из наиболее эффективных на сегодняшний день (по отношению веса полезной нагрузки к стартовому весу ракеты) система «Энергия» для вывода 100-тонного аппарата в околоземный космос сжигает 2000 тонн топлива.

Борьба с ростом энтропии — дело долгое

Во-вторых, осознание фундаментальных ограничений на интенсивность человеческой деятельности на Земле ведет к постоянному возрастанию роли экологических соображений при обсуждении целесообразности любого крупного проекта. В качестве показательного примера можно привести проекты строительства радиомаяка для сигнализации возможным внеземным цивилизациям о нашем существовании. Во время пионерского периода исследований по проблеме внеземных цивилизаций считалось, что такой

радиомаяк должна строить каждая цивилизация, как только это позволят ее энергетические ресурсы. Когда исследования вступили в фазу зрелости, было осознано, что энтропия, производимая при функционировании радиомаяка, создает такую экологическую нагрузку на среду обитания, что мириться с ней можно было бы лишь при совершенно отчаянной нужде в общении с братьями по разуму...

- ?? Назовите «приходные» и «расходные» статьи энтропийного баланса Земли. Как они изменяются с течением времени?
- ?? В чем заключается необходимое термодинамическое условие для дальнейшего устойчивого развития биосферы и цивилизации?
- ?? Является ли современный глобальный экологический кризис первым в истории Земли? Если нет, то чем заканчивались предыдущие?
- ?? Почему невозможен возврат, в духе Ж. Руссо, «назад к природе», к натуральному хозяйству?
- ?? Почему невозможна полностью безотходная технология?
- ?? Что уже сейчас можно делать для смягчения отрицательных последствий глобального экологического кризиса? Достаточно ли этого, чтобы полностью его снять? Существенно ли при этом изменится облик нашей цивилизации?
- ?? Что является в настоящее время основным производственным ресурсом? Почему?

3.9. Проблема «тепловой смерти Вселенной»

Установление второго закона термодинамики привело к осознанию еще одной фундаментальной проблемы мировоззренческого значения, которая получила название проблемы «тепловой смерти Вселенной». Она не нашла окончательного разрешения и до сих пор.

Формулировка проблемы и первые попытки ее разрешения Проблема «тепловой смерти Вселенной» (для краткости мы будем дальше ее называть «проблема ТСВ») возникает при попытке применить второй закон термодинамики ко Вселенной в целом. Впервые она была сформулирована в небольшой статье У. Томсона (Кельвина) «О проявляющейся в природе общей тенденции к рассеянию механиче-

ской энергии», опубликованной в 1852 г. Обратив внимание на то, что превращение качественной механической энергии в некачественную и потому бесполезную тепловую энергию необратимо, он пришел к выводу, что в конце концов эти процессы должны сделать невозможным существование в мире образований, которым необходима механическая энергия. Таким образованием является, например, человек. Осознавая силу этого утверждения, Томсон писал крайне осторожно и витиевато: «В прошлом, отстоящем на конечный промежуток времени от настоящего момента, Земля находилась и спустя конечный промежуток времени она снова очутится в состоянии, не пригодном для обитания человека; если только в прошлом не были проведены и в будущем не будут предприняты такие меры, которые являются неосуществимыми при наличии законов, регулирующих известные процессы, протекающие ныне в материальном мире».

Более определенно, кратко и афористично проблему ТСВ сформулировал Клаузиус в 1865 г. Пользуясь введенным им понятием энтропии, он придал второму закону термодинамики вид утверждения: «энтропия мира стремится к максимуму». Это утверждение подразумевало, что, во-первых, у Вселенной в целом есть некоторое конечное состояние; во-вторых, состояние это таково, что энтропия Вселенной в целом достигает в нем максимально возможного значения; в-третьих, состояние это должно достигаться с неизбежностью. Характер состояния ТСВ легко представить себе, вспомнив рассмотренные выше аспекты понятия энтропии: это состояние — состояние теплового равновесия — должно быть полностью однородным, бесструктурным и неупорядоченным, в котором сохраняется только хаотическое тепловое движение, несущее наиболее низкокачественную энергию.

Гипотеза о неизбежности ТСВ была с удовлетворением воспринята в клерикальных кругах как свидетельство против эволюционной концепции мироздания. Папа римский Пий XII (1876–1958) в своей энциклике 1947 г., направленной против эволюционных воззрений, заявил: «Закон энтропии, открытый Рудольфом Клаузиусом, дал нам уверенность в том... что в замкнутой материальной

*системе в конце концов... процессы в макроскопическом масштабе когда-то прекратятся. Эта печальная необходимость свидетельствует о существовании Необходимого Существа». Такую точку зрения разделял и ряд крупнейших ученых (в основном, верующих), например, астрофизики **Джеймс Хопвуд Джинс (1877–1946)** и **Артур Стенли Эддингтон (1882–1944)**.*

В дискуссию о проблеме ТСВ были вовлечены многие известные философы. Например, в нашей стране в советское время наиболее весомыми считались возражения против неизбежности ТСВ, высказанные Фридрихом Энгельсом (1820–1895) в его труде «Диалектика природы». Энгельс утверждал, что энергия, понимаемая как мера движения, неуничтожима не только количественно, но и качественно, и потому Вселенная не может прийти в состояние, в котором остается лишь тепловое движение. К сожалению, общие философские соображения, помогая осмыслить уже имеющиеся знания и будучи полезными эвристически, являются плохими аргументами в конкретном научном споре. Если мерой качества энергии считать энтропию, то тогда утверждение о качественной неуничтожимости движения неверно, ибо противоречит закону возрастания энтропии. Если же под качеством энергии понимается что-то другое, то дискуссия уходит в сторону от конкретной проблемы применимости второго закона термодинамики ко Вселенной в целом.

Большую часть ученых вывод о неизбежности ТСВ не устраивал, и потому почти сразу начались попытки найти слабые места в рассуждениях Томсона и Клаузиуса. Многие из этих попыток основывались на достаточно произвольных допущениях. Так, **Вальтер Нернст (1864–1941)**, автор положения, которое называют третьим началом термодинамики (с. 159), предложил концепцию о том, что «процессу выравнивания температур и радиоактивному распаду атомов во Вселенной должен противоречить процесс самопроизвольного роста температур и образования сложных веществ». **Роберт Милликен (1868–1953)**, доказавший внеземное происхождение космических лучей, предположил, что составляющие их энергичные частицы способны в глубинах космоса создавать сложные атомы и благодаря этому

поддерживать Вселенную в стационарном состоянии. В XX веке было предложено еще несколько концепций, основанных на предположении о непрерывном рождении во Вселенной нового вещества. Эти и аналогичные предположения остались без подтверждения.

Одну из наиболее последовательных и логически обоснованных попыток решения проблемы ТСВ предпринял Людвиг Больцман. Он исходил из преобладавшего в конце XIX – начале XX века представления о том, что Вселенная является бесконечной (или практически бесконечной) в пространстве и вечной (или практически вечной) во времени. Вечность Вселенной предполагает, что к любому данному моменту времени она, в соответствии со вторым законом термодинамики, должна была уже прийти в состояние с максимальной энтропией. Однако Больцман обращает внимание на статистический характер второго закона, который не запрещает флуктуаций, случайных самопроизвольных отклонений от наиболее вероятного состояния. В вечной и бесконечной Вселенной теоретически можно дожидаться флуктуации, в результате которой доступная наблюдению часть Вселенной окажется в состоянии с пониженной энтропией. *Флуктуационная гипотеза* Больцмана заключалась в том, что мы живем как раз внутри такой гигантской флуктуации, приведшей к локальному понижению энтропии. Рассасывание этой флуктуации и связанный с этим рост энтропии наблюдаемой части Вселенной тогда не означает тепловой смерти, поскольку с неизбежностью должны возникать аналогичные флуктуации в других частях Вселенной.

Флуктуационная гипотеза Больцмана

Флуктуационная гипотеза встречается с рядом серьезных затруднений. *Во-первых*, в современной космологии достаточно надежно установлено, что возраст Вселенной конечен и не слишком велик (13–14 миллиардов лет), так что она не могла успеть достичь состояния с максимальной энтропией. *Во-вторых*, для существования земной жизни и цивилизации вполне достаточно было бы флуктуации размером с Солнечную систему. Между тем, астрономические данные свидетельствуют, что в состоянии, далеком от состояния ТСВ, находится вся наблюдаемая часть Вселенной,

поперечником в миллиарды световых лет. Вероятность такой флуктуации невообразимо мала. Наконец, в-третьих, как показал известный физик Яков Петрович Терлецкий, (1912–1993) принятие флуктуационной гипотезы связано с отказом от принципа причинности, по крайней мере, в применении ко всей Вселенной. Дело в том, что в областях, где, по мысли Больцмана, флуктуации *развиваются*, энтропия с течением времени должна понижаться. Поскольку направление изменения энтропии, как говорилось в п. 3.2, определяет направление стрелы времени, время в этих областях должно, с нашей точки зрения, течь вспять — со всеми вытекающими отсюда последствиями. Без крайней необходимости трудно пойти на столь кардинальный переосмотр основополагающих представлений о мире.

**Современное
состояние
проблемы**

Современное состояние проблемы ТСВ, если говорить о ее чисто научных аспектах, можно охарактеризовать как признание недостаточности имеющихся знаний, как фактических, так и теоретических, для вынесения обоснованного окончательного вердикта.

В физической литературе основной акцент при этом делается на том, что, в отличие от лабораторных исследований, в масштабах Вселенной в целом преобладает гравитационное взаимодействие. Оно обладает рядом особенностей, которые не позволяют напрямую применять результаты классической термодинамики. Так, обычная жидкость при испарении охлаждается, поскольку ее покидают самые энергичные молекулы. Гравитационно связанные системы (например, звездные скопления), наоборот, при испарении разогреваются: чем быстрее движущихся звезд покинет скопление, тем быстрее двигаются оставшиеся. Далее, гравитационное притяжение стремится собрать рассеянную по космосу материю в компактные тела, выполняя тем самым функцию создания неоднородностей, порождения структур. Наконец, внимательный анализ показывает, что при выводе основных термодинамических результатов явно или неявно используется так называемый постулат аддитивности, гласящий, что энергия системы с достаточной хорошей точностью равна сумме энергий ее частей. Другими словами, если мы разделим систему на части, их свойства от этого не должны существенно измениться. Для

*Вселенной в целом этот постулат не выполняется в силу ее принципиальной цельности; энергия Вселенной – это, в основном, энергия **взаимодействия** ее частей.*

Основной вывод из этих соображений заключается в необходимости аккуратного обобщения термодинамики на системы масштаба Вселенной. Пока это не сделано, различные суждения по проблеме ТСВ останутся гипотезами. С большой долей уверенности можно, однако, предположить, что и в обобщенной теории будет иметь место закон возрастания энтропии, только состояние с максимальной энтропией не обязательно будет пространственно однородным.

Одним из основных источников трудностей в разрешении проблемы ТСВ, по-видимому, является вопрос о том, в какой степени Вселенную можно считать замкнутой системой. Если отказаться от схоластического определения Вселенной как «совокупности всего сущего» и рассматривать ее, в духе современной космологии, как материальную систему, подчиняющуюся определенным физическим законам и обладающую вполне конкретными свойствами, то надо признать, что эти свойства довольно необычны для замкнутой системы. Во-первых, пространственные масштабы Вселенной непостоянны (в настоящее время они увеличиваются). Во-вторых, наша Вселенная довольно молода, и теоретически не исключен (хотя и маловероятен) вариант, согласно которому через некоторое время она возвратится к своим первоначальным размерам. В-третьих, на размышления относительно возможной незамкнутости Вселенной наводит **антропный принцип**, суть которого можно изложить нижеиследующим образом.

Современный уровень научных знаний еще недостаточен для ответа на вопрос, почему наша Вселенная такова, какова она есть. Но того, что мы знаем, уже достаточно, чтобы попытаться представить, какой *могла бы быть* Вселенная, если бы ее физические свойства были иными. Физические свойства Вселенной определяются значениями фундаментальных констант (например, величиной элементарного электрического заряда, скорости света, масс электрона, протона и нейтрона, постоянной всемирного тяготения и т.д.) и некоторыми другими характеристиками, таки-

Антропный принцип

ми, как размерность пространства-времени (в нашем мире пространство трехмерно, а время одномерно). Установлено, что небольшого отклонения любого из свойств Вселенной от его действующего значения было бы достаточно, чтобы существование сколько-нибудь сложных структур, в том числе человека, стало невозможным. Вселенная оказывается скроенной точно под человека! Для объяснения этого факта и был выдвинут **антропный принцип**, который в так называемой «слабой» формулировке гласит, что **мы наблюдаем Вселенную с данными свойствами потому, что Вселенная с другими свойствами не держала бы наблюдателей.**

В «сильной» формулировке антропный принцип утверждает, что существование человека напрямую воздействует на свойства Вселенной. Поскольку механизм такого воздействия не известен даже предположительно, это утверждение находится за пределами науки.

Для того, чтобы «слабый» антропный принцип имел смысл, логически необходимо признать возможность существования других Вселенных, с иными свойствами. Усилия ряда крупнейших ученых в настоящее время направлены на то, чтобы попытаться непротиворечиво представить ансамбль Вселенных (обзор некоторых существующих идей можно найти, например, в [16]). Для нас главное то, что если по результатам исследования нашей Вселенной можно будет сделать какие-то выводы о свойствах других миров, то это будет означать наличие между ними взаимодействия, а, значит, и незамкнутость Вселенной. В этом случае вопрос о неизбежности ТСВ был бы решен отрицательно.

?? В чем заключается проблема «тепловой смерти Вселенной»?

?? Противоречит ли вывод о неизбежности «тепловой смерти» известным законам природы?

?? Какие возражения против неизбежности ТСВ выдвигались в XIX веке?

?? Каково современное состояние проблемы ТСВ?

?? В чем заключается антропный принцип? Какие выводы о свойствах Вселенной из него могли бы вытекать?

3.10. Литература к главе 3

1. Гельфер Я. М. История и методология термодинамики и статистической физики. Том 1. – М.: Высшая школа, 1969. – 475 с.
2. Терлецкий Я. П. Статистическая физика. – М.: Высшая школа, 1994. – 350 с.
3. Киттель Ч. Статистическая термодинамика. – М.: Наука, 1977.
4. Больцман Л. Статьи и речи. – М.: Наука, 1970.
5. Седов Е. Одна формула и весь мир. Книга об энтропии. – М.: Знание, 1982. – 176 с.
6. Шамбадаль П. Развитие и применение понятия энтропии. – М.: Наука, 1967.
7. Поплавский Р. П. Термодинамика информационных процессов. – М.: Наука, 1981. – 255 с.
8. Седов Е. А. Эволюция и информация. – М.: Наука, 1976.
9. Шрёдингер Э. Что такое жизнь? С точки зрения физика. – М.: Атомиздат, 1972.
10. Алексеев Г. Н. Энергия и энтропия. – М.: Знание, 1978.
11. Ребане К.К. Энергия, энтропия, среда обитания. – М.: Знание, 1985. – 64 с.
12. Ларсон Э.Д., Росс М.Х., Уильямс Р.Х. Эра сырьевых материалов: что дальше? // В мире науки, 1986, №8, с. 4–12.
13. Внеземные цивилизации. Под ред. С.А. Каплана. – М.: Наука, 1969.
14. Проблема поиска жизни во Вселенной. – М.: Наука, 1986. – 256 с.
15. «Тепловая смерть» Вселенной // Физический энциклопедический словарь. – М.: Советская Энциклопедия, 1983. – С. 744.
16. Хорган Дж. Вселенские истины // В мире науки, 1990, №12, с.62–72.

Приложение: электронная эволюция

1. В. В. Свиридов. Параллели в эволюции компьютерных и биологических систем

(опубликовано в журнале «Домашний компьютер»,
1998, №4 под названием «Слоны и компьютеры»)

Культура, технология и эволюция

Мы все учились. Понемногу. Понемногу-то понемногу, но в голове после школы осталось столько самых неожиданных и, кажется, совсем и ненужных вещей. А плюс бэ квадрат равно... На краю дороги стоял дуб. Климат Монголии резко континентальный. Восстание Уота Тайлера было жестоко подавлено. Лично у меня за двадцать послешкольных лет полностью вымело из памяти только орфограммы русского языка. И слава богу: вспоминать правила при сочинении письма или отчета — это все равно, что многоножке задумываться над порядком перемещения своих конечностей.

Зачем же все-таки нужно это лоскутное одеяло в голове? А затем, что главная задача образования — особенно общего среднего — не выковать готового профессионала, так сказать, закаленное и отточенное орудие, а выпустить в мир человека более или менее культурного. А культура — это проверенная на опыте система ориентиров, которая позволяет определить свое место и роль в этом мире и выбрать подобающий образ действий на будущее. Какие из этих ориентиров пригодятся — заранее не угадаешь, ситуации бывают самые неожиданные. Вот, скажем, интересуетесь вы совершенно платонически, куда ветер дует в мире ПК. Или интересуетесь с умыслом, поскольку лелеете мечту купить свой компьютер. Или, в перспективе, заняться модернизацией того, который есть...

Главная особенность компьютера как объекта вложения средств — крайне быстрое моральное старение. Быстрее только носки изнашиваются, да и то — как носить. Поэтому если при покупке сильно экономить, запросто можно приобрести нечто вроде новехонькой, только что с конвейера, «Победы». По своему хорошая машина, но все-таки для 1998 года она и старомодна, и некомфортабельна, и тихходна.

Ориентация на «наикрутейшую тачку» тоже не гарантия от промахов. Когда в начале 90-х годов российские ученые с помощью философа, биржевого спекулянта и одновременно крупнейшего финансового донора нашей науки господина Сороса в массовом порядке обзаводились первыми личными компьютерами, один мой коллега гордо заявил, что не собирается тратить соросовские доллары на ширпотребную персоналку PC AT, а поднатужится, подкопит еще немножко и возьмет настоящий быстрый компьютер MCA от настоящей IBM. MCA (Micro Channel Architecture — микроканальная архитектура) — это оригинальная разработка IBM, которая, по мысли ее создателей, должна была прийти на смену «писишкам», с их ограниченными возможностями и нелогичной внутренней структурой. Хорошо, что коллега не успел это сделать. MCA стремительно, как динозавры, ушла в небытие, хотя, как и динозавры, была прекрасна и эффективна. Есть и более свежие примеры. Помнится, в 1996 году самыми мощными и перспективными считались персональные системы на процессоре Intel Pentium Pro. И где сейчас этот самый Pro? Доживает век в приюте для бездетных холостяков? Наконец, вообще не факт, что эволюция персоналок будет идти в сторону повышения их единичной мощности. Глядишь, лет через пять у всех будут дешевые пластмассовые мыльницы (современные варианты таких сетевых устройств называют «тостерами»), только и позволяющие, что подключиться к районному супер-

компьютеру и пользоваться установленными на нем программами.

Вот и прозвучало слово-защепка, вызывающее смутные ассоциации со школьными уроками биологии. *Эволюция*. Пестики-тычинки и разъемы «папа-мама». МСА, Pentium Pro, динозавры и Дарвин. Насколько неслучайны такие ассоциации и нельзя ли из них извлечь полезных выводов, помогающих ориентироваться среди стремительно сменяющихся друг друга рекламных призывов?

На мой взгляд, между четырехмиллиардовой историей жизни на Земле и гораздо более краткой историей развития персональных компьютеров существуют глубокие и весьма интересные параллели. Я, впрочем, не оригинален. Аналогию между эволюцией биологической и эволюцией технологической еще в шестидесятых годах использовал в прогностических целях замечательный писатель и философ Станислав Лем. Правда, будучи птицей более высокого полета, чем ваш покорный слуга, пан Лем интересовался не каким-то узким классом технических устройств, а, ни много ни мало, перспективами всей человеческой цивилизации в целом. Метод технико-биологических аналогий оказался весьма плодотворным: Лемова книга «Сумма технологии» (намек на знаменитый богословский трактат «Сумма теологии») и сейчас, спустя более чем тридцать лет, не воспринимается как устаревшая и читается с неподдельным интересом. В отличие от большинства пророков, Лем выражается внятно и ясно. Хочу все же предупредить: «Сумма технологии» — не художественный роман, хотя у ее автора есть и замечательные романы, и изящные рассказы, и озорные сказки.

**Предвидения
Лема и
микроэволюция
компьютерных
программ**

Вот пример предвидения, основанного на внимательном анализе механизмов биологической эволюции.

Каждое живое существо в каждой своей клетке (не считая половых клеток — гамет) несет полную запись технологии производства себя самого. Именно благодаря этому стало возможным появление на свет овечки Долли — генетически точной копии своей безымянной старшей сестры, пожертвовавшей во славу науки несколькими клеточками вымени. Носителем генетической информации служит молекула ДНК, которую можно рассматривать как текст, записанный с помощью четырехбуквенного алфавита. Однако в отличие от текста, находящегося сейчас перед глазами моего уважаемого читателя, генетическую информацию никто не сочинял, никто не придумывал ее в муках творчества, на нее не распространяется авторское право. Генетическая информация выросла в процессе многократного естественного повторения дарвиновского цикла: изменчивость — отбор — запоминание оптимального выбора. Отсутствие разумного Конструктора не мешает генетической программе работать, надежно обеспечивая развитие исходной яйцеклетки в самый сложный организм, иногда даже разумный. Хорошо, спросил Лем, а почему бы тогда и нам не выращивать информацию, необходимую для производства новых вещей, эффективного управления обществом, лучшего понимания мира?

Идея выращивания информации кажется достаточно фантастической. Между тем она уже реализована на практике. В 1996 году состоялась первая конференция по так называемому генетическому программированию. Основная идея генетического программирования заключается во внесении в текст программы случайных изменений, тестировании полученных «мутантов» и отборе тех, которые показали наилучшие результаты. Были продемонстрированы образцы полученных таким образом программ, управляющих клеточными автоматами (говоря проще, играющих в игры типа крестиков-ноликов), кото-

рые по своей эффективности и разнообразию поведения превосходят все, что можно было бы написать вручную. Самое интересное, что создатель такой программы может не иметь ни малейшего представления, как она работает и почему она работает так хорошо, — ведь он ее не сочинил, а вырастил. Желающие могут сами поэкспериментировать в области генетического программирования с помощью широко известной игры отечественной фирмы **Gamos** «Змеиные бои». Главные ее герои — боевые змеи — представляют собой как раз клеточные автоматы, поведение которых программируется до начала боя, играющего роль сурового судьи и оценивающего жизнеспособность созданной игроком особи.

В медицинской практике часто необходимо вещество, которое связывалось бы с определенным белком и более ни с чем. При классическом подходе фармакологи пытаются сначала рассчитать или угадать строение молекулы, обладающей требуемым свойством, а затем синтезировать ее. По методу же *химической эволюции*, берется большое (порядка десяти триллионов штук) количество молекул ДНК и приводится в контакт с белком-мишенью. Те молекулы, которые связались с мишенью, отбираются, размножаются и вновь приводятся в контакт с мишенью. По мере повторения циклов условия отбора ужесточаются, так что в конце концов выживают только молекулы, связывающиеся с нужным белком прочно и предельно избирательно. Эту процедуру можно рассматривать как выращивание информации о наиболее эффективном медикаменте. О строении конечного продукта и о том, почему он действует именно так, разработчики не обязаны знать, ибо они его не вычислили, не спроектировали, а *вывели!*

Идея выращивания информации лежит в основе работы программ, имитирующих *нейронные сети*. В отличие от обычной программы, структура и реакции

которой предусмотрены (или, как часто бывает, не предусмотрены — и тут уж ничего не поделаешь до выхода более свежей версии) предельно жестко, нейронная сеть способна изменять саму структуру свою таким образом, чтобы разница между реальным и желаемым результатом ее работы уменьшалась. В результате после более или менее длительного обучения нейронная сеть начинает работать так, как нужно. Но почему она работает именно так... Спросите себя, как вам удастся регулярно переходить оживленные улицы, не попадая под машину!

С нейронными сетями, основанными на предвиденной Лемом технологии, сейчас сталкиваются и простые пользователи. В течение нескольких лет **IBM** разрабатывала основанную на нейронных сетях систему борьбы с вирусами. Главное достоинство системы заключается в том, что она способна обучаться в процессе работы: распознавать совершенно новые, с пылу, с жару, вирусы и тут же создавать лекарства от них. Час пробил: в свежем номере «Компьютерры» (145'97) сообщается о публичном представлении «Системы иммунитета для киберпространства» от **IBM**, призванной защищать от вирусов всемирную Сеть в реальном времени. Ну, а самый впечатляющий для обывателя пример — быстро набирающая популярность игра **Creatures**. Каждый из героев этой игры, норнов, обладает собственной нейронной сетью, позволяющей ему обучаться под влиянием игровой среды и своего мудрого наставника, в роли которого выступает играющий. Игра позволяет вам создать маленькую личность с неповторимыми чертами характера. Вы можете даже записать структуру нейронной сети вашего питомца, послать ее приятелю, а можете подвергнуть ее самому тщательному анализу. При всем при этом вы все равно будете ощущать себя не программистом, не конструктором, а воспитателем или даже родителем. Кстати, **Creatures** удостоилась

рецензии в одном из наиболее престижных научных журналов мира — **Nature**.

Программно-генетические аналогии позволяют лучше понять существо некоторых чисто научных проблем. Генетическую информацию, записанную в ДНК, можно сравнить с исполняемой программой (такой своеобразный *exe*-файл), исходные тексты (то есть последовательность команд, сопровождаемых комментариями об их смысле и назначении) которой никогда не существовали. Можно посочувствовать биологам всего мира, занятым сейчас расшифровкой человеческого генома: они находятся в роли хакеров, пытающихся дизассемблировать интересную программу, то есть превратить тарабарщину, которую видел всякий, заглядывавший в *exe*-файл с помощью кнопки **F3** Нортон Коммандера, в нечто похожее на строчки, которые писали несчастные, изучавшие на школьных уроках информатики язык Бейсик. Хакеры знают, что задача дизассемблирования не может быть решена однозначно, даже если у программы были исходные тексты. А если точно известно, что исходных текстов никогда не было?

Универсальный эволюционизм Не являются ли все-таки аналогии между развитием живых организмов и эволюцией технических, а тем более программных систем поверхностными, чисто внешними? Когда писалась «Сумма технологии», ответ на этот вопрос был вовсе не очевиден. Лем, хотя и использовал эти аналогии, достаточно много места отвел перечислению различий между биологической и технологической эволюциями — насколько я понимаю, чтобы рассуждения его не выглядели как субъективное мнение фантаста или даже фантазера. За прошедшие с тех пор три десятилетия многое изменилось.

Во-первых, естественные науки больше не делятся на эволюционные (биология, геология) и неэволюци-

онные (физика, химия). Было показано и, главное, стало общепризнанным, что развитие, самоорганизация, самопроизвольное возникновение сложных упорядоченных структур наблюдается на всех уровнях организации материального мира — от простейших физических (например, сковородка с кипящим маслом, в котором возникают ячейки Бенара) и химических (реакция Белоусова–Жаботинского между простейшими веществами, обнаруживающая сложно организованное поведение) систем до Вселенной в целом. Таким образом, способность к эволюционированию не является исключительной прерогативой живого, а свойственна всему сущему в этом мире, да и самому этому миру в целом.

Во-вторых, было осознано, что все явления самоорганизации подчиняются одним и тем же закономерностям, которые в общих чертах воспроизводят дарвиновский механизм эволюции: постоянные случайные отклонения от «нормы» (изменчивость) проходят через сито отбора, после чего выжившие сохраняются (наследственность) благодаря тому или иному механизму положительной обратной связи. В-третьих, возникло сильное подозрение, что социальный прогресс также подчинен этим закономерностям. В результате сформировалась... ну, еще не наука, но перспективная программа исследований, которую принято называть «универсальный эволюционизм».

Предполагаемая универсальность законов развития и природных, и технических, и общественных систем подчеркивается тем, что академик Никита Моисеев (кстати, много лет заведовавший Вычислительным центром Академии наук СССР), один из пионеров этого направления исследований, предложил называть общие механизмы отбора и наследственности Рынком. Действительно, рынок (в экономическом смысле) безжалостно отсекает всё неэффективное, не соответствующее потребностям и возможностям общест-

ва; но он же подхватывает любую новую идею, любую свежую технологию, отвечающую желаниям потребителей, и обеспечивает их массовое тиражирование.

Таким образом, и природа, и общество, и технология, похоже, знают лишь один-единственный способ прогресса — второго не дано. Желающие могут усмотреть иллюстрацию этого тезиса в новейшей истории нашей страны, руководство которой пыталось добиться искусственного спрямления путей истории. В конце концов до него (руководства) дошло, что тянуть и дергать яблоню за ветки — все-таки не лучший способ ускорить ее рост в желаемом направлении. Переубедить же народ, которому семьдесят лет вбивали в головы, что «течет вода Кубань-реки, куда велят большевики», оказалось гораздо сложнее. В массе своей он до сих пор полагает, что если дела идут не так, как хотелось бы, то это потому, что царь (президент, генеральный секретарь) не распорядился.

Идея о том, что универсальный механизм эволюции — это Рынок, выводит за рамки нашей темы первые «большие» ЭВМ, все эти ЭНИАКи, БЭСМ и «Наири». Они делались штучно, в исследовательских или военных целях, и развитие их определялось мнениями, а то и причудами достаточно узкого круга людей. В развитии советской вычислительной техники, например, превалировали внутриминистерские и межминистерские интриги. Увлекательный рассказ об этом можно найти на страницах журнала **Hard'n'Soft** за 1996 год. Как ни парадоксально, только появление действительно персональных компьютеров, давшее волю капризам индивидуального потребителя, позволило говорить о закономерностях эволюции компьютерной техники в том смысле, в котором понятие «закономерность» используется в науке: объективно существующая необходимая связь между событиями, не зависящая от воли и желания отдельных субъектов.

Теория биологической эволюции имеет два этажа. Первый этаж, который называется «микроэволюция», — это епархия генетиков и экологов, изучающих сравнительно быстрые (сотни и тысячи лет) процессы формирования отдельного нового вида живых существ. Ко второму этажу, «макроэволюции», относят более крупномасштабные процессы возникновения родов, классов и типов, длительностью в миллионы лет. Основным источником макроэволюционных данных служит палеонтология, изучающая останки древних организмов.

**Макроэволюция
ПК**

Собственно дарвиновское «Происхождение видов путем естественного отбора» относится, в основном, к микроэволюционному уровню. Законы макроэволюции не противоречат микроэволюционным, но и не выводятся из них непосредственно. Как сказал английский писатель Сэмюэл Батлер (1835–1902), весьма интересовавшийся эволюционными учениями, «я не понимаю, почему эволюция шла от мухи к слону, а не от слона к мухе». На этот вопрос, кстати, до сих пор нет удовлетворяющего всех ответа. Если принимать во внимание только размеры мухи и слона, то одно время казалось, что ответ все-таки найден. В палеонтологии лет сто назад было сформулировано «правило Депенере», согласно которому в макроэволюции каждой данной группы организмов преобладает непреодолимая тенденция к увеличению размеров тела. С течением времени она приводит к гигантизму, нарушению пропорций организма и вымиранию группы. Действительно, история некоторых вымерших животных развивалась по этому сценарию. Станислав Лем в «Сумме технологии» привел примеры, иллюстрирующие правило Депенере применительно к эволюции технических систем: например, последние паровозы достигали поистине гигантских размеров, особенно если сравнить их с паровозом Стефенсона или Чере-

панова. Или взять, скажем, дирижабли... Однако эти примеры не слишком убедительны. Локомотив просто обязан иметь большую массу, иначе не сможет сдвинуть с места тяжелый состав. Летательный аппарат, плавающий в воздухе, должен иметь объем минимум в сотни кубометров, иначе не сможет поднять даже самого себя. Размеры здесь важны не сами по себе, а как приспособление к выполнению определенных функций. Если жизнь складывается так, что большой организм или механизм справляется со своими задачами лучше, чем маленький, вот тогда он действительно будет закономерно увеличиваться, пока не достигнет физических пределов роста — по выражению русского зоолога Владимира Онуфриевича Ковалевского, кульминационного пункта эволюции.

Мораль, которую отсюда можно извлечь применительно к компьютерам, заключается в том, что, во-первых, не следует опасаться тенденции к увеличению размеров ПК несмотря на продвижение нового стандарта АТХ, предполагающего увеличенные размеры материнской платы, а, следовательно, и всего корпуса. Кто уже видел корпуса АТХ, согласится, что выглядят они очень солидно по сравнению с привычной «мини-башней». Тем не менее, выполнение компьютером своих задач слабо связано с его размерами. Мораль номер два: ноутбуки не есть вырожденки в славной семье персональных компьютеров, а миниатюризация является вполне вероятным направлением дальнейшего прогресса ПК.

Более обоснованным, чем правило Депере, является принцип, сформулированный американским палеонтологом Эдвардом Копом. Принцип Копа гласит, что новые крупные группы организмов берут свое начало не от высших, наиболее развитых представителей предкового класса, а от сравнительно примитивных, неспециализированных. Например, млекопитающие произошли не от динозавров — вершины

эволюции рептилий, а от мелких, весьма примитивных пресмыкающихся, не успевших приобрести эффективные формы, точно настроенные на условия тогдашней жизни. Предки цветковых растений, доминирующих в современной флоре Земли, тоже не были последним пиком эволюционной моды мелового периода. Глубокая специализация служит отличным приспособлением к нуждам сегодняшнего дня, но оказывается непреодолимым препятствием не только для будущего расцвета, но и для самого существования в изменившихся условиях. Причины этого, в общем-то, понятны. Во-первых, неспециализированные формы являются более пластичными, более способными к трансформации, обусловленной требованиями жизни. Во-вторых, они ведут, как правило, более жесткую борьбу за существование, что приводит к более частому появлению у них новых приспособлений, среди которых оказываются и очень перспективные.

В мире ПК на наших глазах разворачивается история, подтверждающая правило происхождения от неспециализированных предков. Довольно широко известно, что первый настоящий персональный компьютер собрали в гараже два Стива — Джобс и Возняк — в 1976 году. Встретившись с большим спросом, они основали фирму **Apple Computers**, и вплоть до сегодняшних дней компьютеры производства **Apple** по своим функциональным возможностям и удобству пользования оставались лучшими в классе ПК. Однако в гораздо большем масштабе в мире производятся и покупаются другие ПК, основанные на разработках фирмы **IBM**, хотя они и появились в магазинах позже компьютеров **Apple**. Причина в том, что **IBM** с самого начала опубликовала спецификации своих ПК (их и их потомков сейчас принято называть английской аббревиатурой **PC**, а в среде российских пользователей — «писюками»), разрешила производить их другим фирмам и предусмотрела способы (так называемую

открытую архитектуру), чтобы возможности ее компьютеров могли расширяться за счет установки дополнительных компонентов. В результате детище **IBM** оказалось универсальной неспециализированной машиной с широкими возможностями развития; кроме того, возникла ожесточенная конкуренция между производителями **PC**, подстегнувшая технический прогресс. В то же время **Apple** стремилась сделать каждую новую модель своих ПК идеальной и самодостаточной, не предоставляла лицензий на их производство другим фирмам и засекретила всю техническую документацию. Результат: замедленное техническое совершенствование компьютеров фирмы **Apple**, сокращение занимаемой ею доли рынка, вытеснение **Apple** в узкие специализированные ниши — полиграфию и образование.

Из сказанного не следует, что **Apple** непременно должна погибнуть. В истории живого известно много случаев, когда специализированный вид, практически прекративший эволюционировать, успешно доживал до наших дней. Один из наиболее известных примеров — акула, рыба очень древняя, мало изменившаяся за сотни миллионов лет, и примитивная, не имеющая даже костного скелета. Тем не менее, процветает же... Главное в таких случаях — чтобы сохранялась экологическая ниша. Пока есть люди, которые страстно желают ничего не знать о железках во чреве своего электронного друга и учителя, для которых главное требование к нему — чтобы всё было очень просто, очень понятно и очень красиво, и которые готовы за это заплатить лишнюю тысячу долларов, — ПК от **Apple** будут жить. Однако магистральное направление эволюции персональных компьютеров проходит всё-таки по линии **PC**.

Сильная конкуренция среди производителей, непрерывно подстегивающая развитие и удешевление **PC**, имеет свои оборотные стороны для пользователей.

Общим местом, особенно среди поклонников **Apple**, стало утверждение о нелогичности внутренней структуры **PC**, конфликтах между составляющими его компонентами, многочисленными атавизмами в его архитектуре. Попробуйте, например, поинтересоваться, для каких целей можно использовать системное прерывание **IRQ2** или канал прямого доступа к памяти **DMA4**. Ответ будет начинаться примерно так: «Произвольное использование этих ресурсов невозможно, поскольку по причинам исторического характера...» Оказывается, и в биологии известен закон, гласящий, что за успешное выживание в условиях жесткой борьбы за существование организмы вынуждены расплачиваться понижением целесообразности своего внутреннего устройства. Закон этот был установлен уже знакомым нам В.О. Ковалевским в серии статей **1873–1877** гг. об эволюции копытных. Ковалевский показал, что при не слишком жесткой борьбе за существование эволюция наиболее важных для выживания органов (для копытных это были пальцы и зубы) сопровождается согласованной перестройкой всех остальных частей организма (скелета, мускулатуры, нервной и пищеварительной систем). Если же интенсивность естественного отбора возрастает, эволюция может приобрести темп, слишком высокий, чтобы весь организм успевал изменяться вслед за критическим органом. При такой инадаптивной, по терминологии Ковалевского, эволюции нарушается согласованность организма в целом, что в перспективе отрицательно сказывается на судьбе вида: такой вид (например, тапиры), может просуществовать долго, только если случайно останется без конкурентов и врагов.

Для **PC** основным критическим органом, по видимому, был и остается процессор. Конкурентоспособность и современность компьютера продолжают определяться, прежде всего, скоростью работы его сердца, а она, в полном соответствии с известным за-

коном Мура, удваивается каждые полтора года. Побочным следствием этой гонки является удивительное однообразие внешнего вида **PC**. Ковалевский отнес бы дизайн **PC** к «признакам роскоши», отбор по которым становится эффективным только когда вполне разрешены жизненно важные вопросы — а они у **PC** еще не разрешены. Рога у копытных стали формироваться только после того, как они научились быстро бегать и переваривать степные травы. Кстати, компьютеры от **Apple**, как правило, в гораздо большей степени несут на себе отпечаток руки дизайнера, чем мышастые **PC**.

Конечно, сам по себе невзрачный облик не является фатальным дефектом, но он сигнализирует о том, что не успевают решаться более существенные вопросы. Среди советов по модернизации компьютера один из наиболее частых — подумать не о замене процессора, а о расширении памяти или видеопамати, замене винчестера на более быстрый и т.д. Фактически это признание того, что в исходно купленной вами машине возможности ее компонент, скорее всего, не согласованы! Оперативная память перестала поспевать за процессором — пришлось срочно наращивать кэш-память, как встроенную в процессор, так и размещенную на материнской плате. Для ускорения передачи данных от процессора к видеокарте за пять лет сменились три шинных архитектуры — **VLB**, **PCI** и вот теперь **AGP**. Соответственно с калейдоскопической быстротой сменяют друг друга сами видеокарты. В **DOS** программа кэширования жесткого диска, **SmartDrive**, призванная хоть немного компенсировать его неторопливость, устанавливалась или (чаще) не устанавливалась по желанию пользователя. **Windows** всех мастей кэшируют чтение и запись на винчестер по умолчанию. Все это говорит, что **PC**, будучи наиболее перспективной породой персональных компьютеров, все-таки не гарантированы от попадания в технологиче-

ский тупик, как тапиры — от попадания в Красную книгу.

Главной сенсацией компьютерного 1996 года стала концепция «сетевого компьютера» (NC), выдвинутая альянсом во главе с фирмами **Sun** и **Oracle**. Концепция была основана на неоспоримом факте бурной интернетизации планеты и предполагала замену слишком самостоятельных РС дешевыми терминальными устройствами (теми самыми тостерами), которые сами практически ни на что не способны, но зато могут использовать в интересах хозяина ресурсы мощных удаленных машин, обслуживающих Сеть. Так сказать, перейдем от феодальной раздробленности к централизованному государству! Концепция грубо задевала коренные интересы таких гигантов, как **Microsoft** и **Intel**. Действительно, процессоры у «тостеров» не интелевские, а операционная система не майкрософтовская. Кроме того, предполагалось не устанавливать на «тостер», скажем, **Microsoft Office**, а подгружать необходимые программы из сети. Как говорится, почувствуйте разницу: вместо того, чтобы покупать и держать впрок на винчестере стомегабайтного монстра, 90% возможностей которого так никогда и не используются, пользоваться только тем (и, соответственно, платить только за то), что необходимо в данный момент). Поэтому был выдвинут встречный план: не NC, а **NetPC** («сетевой РС»), который является полноценным, дееспособным и полностью автономным прибором, но кроме того оптимизирован так, чтобы использовать возможности **Internet** на сто десять процентов. Сейчас кипение страстей малость улеглось. «Тостеры» потихоньку производят и без лишнего шума продают (по крайней мере, на просторах Родины рекламных кампаний по поводу NC не слышно). С **NetPC** ситуация схожая: **Microsoft**, в рабочем порядке, начала превра-

**Сетевое
общество или
глобальный
муравейник?**

щать в них обычные «писюки», проводя линию на полное срастание браузера с операционной системой. В первых отзывах на бета-версию **Windows 98** и **Internet Explorer 4.0** единодушно отмечается, что пользователю этих произведений **Microsoft** крайне трудно понять, когда он пользуется ресурсами своей машины, а когда сетевыми.

Всё это хорошо, но мы вернулись к началу: как вести себя простому человеку, определяющему стратегию покупки или обновления своего личного компьютерного парка? Если вдруг победит линия **NC**, то деньги, потраченные на мощную машину со всеми наворотами, могут оказаться выброшенными на ветер. Ставить всё на **NC** тоже рискованно: будет ли он способен выполнить все прихоти хозяина и не приведет ли к безвозвратной утрате с таким трудом приобретенных навыков работы с настоящим компьютером?

А как обстоит дело в природе? Действительно, биологическая эволюция, испробовав за миллиарды лет все мыслимые стратегии, не прошла и мимо дилеммы «**NC** или **NetPC**?».

Стратегия **NC** — это фактически стратегия муравейника или пчелиного улья. Организмы, составляющие муравейник, узко специализированы: рабочие, солдаты, самцы, муравьиная царица. У каждого из них есть только те органы, которые необходимы для выполнения его функций, все остальные не развиты или недоразвиты. Каждый из них абсолютно неспособен к автономному существованию, так что биологи предпочитают не употреблять по отношению к отдельному муравью слово «особь» или «организм». Организмом, строго говоря, является только муравейник (или улей) в целом — даже в отношении переваривания пищи.

Стратегия **NetPC** — это стратегия стаи или стада, прообраза социальной организации. Обезьяна способна жить и в одиночку, но в стае шансы выжить и

оставить потомство у нее гораздо выше. При этом каждое животное обладает индивидуальностью и способно вести себя антиобщественным образом, подвергаясь при этом наказанию. Индивидуальность не дается даром, за нее надо платить длительным периодом воспитания и кормления беспомощных детенышей. Муравьям-то и инстинктов хватает. Однако, раз обезьяны, антилопы и киты существуют, это значит, что расходы на поддержание индивидуальности оправдываются.

Какая из стратегий лучше? Для природы обе хороши! Муравьи, пчелы, термиты и другие общественные насекомые появились на Земле раньше динозавров и благоденствуют сейчас. Стадные же млекопитающие стоят ближе к вершине эволюции, и царем зверей, напомним, считается все-таки лев, а не таракан. В природе и то, и другое решение сосуществуют, и в этом смысле она не отдает предпочтение ни варианту **NC**, ни **NetPC**. Однако! Развитие муравьев и термитов остановилось на уровне, достигнутом сотни миллионов лет назад, в то время, как общество, созданное одним шустрым видом стадных индивидуумов, продолжает развиваться по сей день. Вот, даже компьютеры придумало.

Конечно, способность к развитию не аргумент в пользу приобретения именно **PC**, если интересоваться только материальными проблемами. Но здесь самое время признаться в тайном лукавстве автора. Никакие научные выкладки не могут дать точный индивидуальный прогноз. Если некто говорит вам, что по последним научным данным и результатам точнейшего компьютерного анализа вам — именно вам! — в следующий вторник лучше воздержаться от заключения выгодной сделки, плюньте ему в глаза. Однако знания, в том числе достаточно далекие аналогии, снабжают пищу вашу природную интуицию и недюжинное чутье — единственный надежный источник пра-

вильных решений. Что касается меня, то мне нескладные РС просто симпатичны. За свою нелегкую судьбу и способность к эволюции.

2. Л. Левкович-Маслюк.

Эволюционирующие интегральные микросхемы

(опубликовано в журнале «Компьютерра», 1999, №11 под названием «Он пришел дать им волю»)

Недавно английские друзья-коллеги прислали мне объявление о Первом рабочем совещании по эволюционирующему хардверу (**First NASA/DOD Workshop on Evolvable Hardware, EH'99**, http://cism.jpl.nasa.gov/events/nasa_eh) в Пасадене (Калифорния), в Лаборатории реактивного движения (**Jet Propulsion Laboratory, JPL**). Совещание проводят НАСА и Министерство обороны США, в качестве спонсоров выступает несколько военных исследовательских организаций. Несколько лет назад воистину трудно было бы предположить, что военные захотят давать деньги на такого рода развлечения. Однако список тем предполагаемых докладов все ставит на свои места: надежность, живучесть, автоматическое устранение повреждений — вот чего ждут специалисты по военной и космической технике от технологии создания интегральных схем путем эволюции. Такие устройства нужны для работы в неизвестных, меняющихся, враждебных условиях: в длительных космических полетах, при мониторинге радиоактивных загрязнений. Спектр потенциальных коммерческих приложений также огромен.

Среди членов программного комитета **EH'99** — наш сегодняшний собеседник, д-р Адриан Томпсон, один из пионеров этого направления. После окончания Института науки и техники Манчестерского университета по специальности «Разработка систем микроэлектроники» он развивал свои идеи в области эво-

люционной электроники, работая над диссертацией в Университете Сассекса. В настоящее время он исследователь-стипендиат этого университета, а с 2000 года займет должность лектора по компьютерным наукам и искусственному интеллекту.

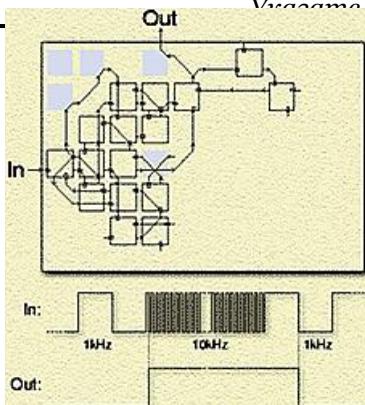
Прежде чем предложить вниманию читателя ответы Томпсона на мои вопросы о прошлом, настоящем и будущем эволюционной электроники, я кратко расскажу о той работе, которая принесла ему известность (исчерпывающее изложение этой работы имеется в его книге, выпущенной издательством «**Springer Verlag**» в 1998 году в серии «Выдающиеся диссертации»).

Томпсон решил поэкспериментировать с эволюцией электронных устройств не на компьютерных моделях, а в реальности. Очень удобными для таких экспериментов оказались **FPGA** (электрически программируемые матрицы вентилей). Это интегральная схема, состоящая из множества ячеек, способных выполнять простейшие функции, но не имеющих между собой фиксированных связей. Связи устанавливаются программным образом, по командам управляющего микропроцессора, и могут изменяться в процессе работы схемы. Эволюцию на таком устройстве нетрудно организовать при помощи генетического алгоритма. Для этого создается некая «популяция» конструкций — грубо говоря, схем соединения элементарных ячеек. Каждая «особь» поочередно испытывается на приспособленность к выполнению поставленной задачи; наименее приспособленные отсеиваются, наиболее приспособленные скрещиваются, мутируют и так далее, как это принято в генетических алгоритмах (см. статью Росса Клемента в том же номере «Компьютеры»).

Однако если не выходить за общепринятые методы создания интегральных схем, то есть заниматься сборкой более сложных цифровых модулей из про-

стных элементов-вентилей, ничего нового по сравнению с компьютерным моделированием не получится. А значит, и радикально новых результатов не будет. Идея Томпсона состояла в том, чтобы с самого начала нарушить «инструкцию по эксплуатации» **FPGA**. Он хотел понять, что произойдет, если запустить эволюцию, сняв все ограничения, какие только можно. Например, он отказался от генератора тактовой частоты. В итоге **FPGA** в этих экспериментах выступала не как цифровое, а как аналоговое устройство! Динамика системы из дискретной стала непрерывной, и возникли совершенно неожиданные эффекты.

Была поставлена задача вывести схему, способную различать два сигнала различной частоты — **1 кГц** и **10 кГц**. Для этого использовался «уголок» **FPGA** размером **10** на **10** ячеек. На рисунке показана конструкция, возникшая в результате эволюции, продолжавшейся более **4000** поколений, популяции из **50** особей. Видно, что использованы далеко не все возможные ячейки. Никакие тактовые генераторы сами собой не появились. Количество активных элементов намного меньше, чем понадобилось бы при обычном цифровом использовании **FPGA**. Но самое забавное, что долгое время никто не мог понять, как вообще работает эта схема. Более того. Обратите внимание на пять ячеек, заштрихованных серым. Они не выполняют никаких активных функций в полученной схеме, но если их отключить, схема перестает работать (то есть различать нужные сигналы)...



При ближайшем рассмотрении стало ясно, что на кристалле возникло нечто неуловимое и уникальное. Конструкция была очень чувствительна к температуре, а также, что уж совсем неприятно, соглашалась работать только на одном определенном экземпляре **FPGA**. Но ведь никто и не рассчиты-

вал сразу получить промышленный образец Лучшего В Мире Различателя Двух Бипов. Главное в том, что идея привела к нетривиальным результатам и стало ясно, что открылось новое поле для исследований. Оказалось, что эта деятельность интересует очень многих, вокруг нее мгновенно выросло научно-инженерное сообщество, образовалась инфраструктура в виде конференций, «воркшопов»... Но давайте послушаем, что обо всем этом думает сам Адриан Томпсон.

Что привело вас к мысли реализовать эволюцию в хардвере?

— Такие идеи высказывалась уже давно. Например, Вирт Атмар из Университета Нью-Мексико писал об аппаратной реализации эволюционирующих систем еще в 1976 году в своей диссертации «Рассуждение об эволюции машинного интеллекта и ее возможной реализации в машинной форме». Это было до появления реконфигурируемых электронных устройств. И в 80-х, когда эти устройства были созданы, их потенциал не остался незамеченным: в статье Стивена Вольфрама «Подходы к инженерии сложности» упоминались некоторые возможные применения. За прошедшее с тех пор время такие устройства в форме

FPGA стали одним из важнейших видов электронной техники. Теперь они очень большие и очень сложные.

Так что я, инженер-электронщик, окончив университет в начале **90**-х, хорошо разбирался в конструировании на основе **FPGA**. Когда я приехал в Университет Сассекса для работы над диссертацией, меня интересовала искусственная эволюция нейронных сетей (в этой области университет Сассекса был и остается лидером). Опять-таки благодаря тому, что я электронщик, я стал думать не о моделировании эволюции, а о том, как ее на самом деле устроить для тех специализированных нейрочипов, которые тогда были в наличии. Как совместить эволюцию с ограничениями, налагаемыми архитектурой конкретного чипа? Как она может воспользоваться специфическими особенностями этого чипа? Обдумывая эти вопросы, я вскоре понял, что нейрочип — отнюдь не единственное устройство, пригодное для экспериментов с эволюцией. Если вы хотите заставить эволюцию заработать на куске кремния, почему там обязательно должна присутствовать именно нейроархитектура? Не лучше ли будет позволить эволюции манипулировать мелкоблочной **FPGA** и самой определить, какая архитектура лучше всего использует ресурсы чипа?

Мне посчастливилось тогда познакомиться с группой разработчиков из **Xilinx**, которые как раз заканчивали работу над **FPGA** модели **XC6216**. Хотя к тому времени существовало уже много гораздо более изоощренных моделей **FPGA**, эта была первой, идеально приспособленной для экспериментов с эволюцией. Команда **Xilinx** отнеслась ко мне очень дружелюбно, и благодаря их поддержке я получил возможность работать с этим замечательным чипом. Я должен сказать, что принципиальные возможности для занятий хардверной эволюцией существовали значительно раньше. Ведь вполне можно строить интересные реконфигурируемые устройства на уровне обычных пе-

чатных плат, используя какие-нибудь аналоговые переключательные чипы. Собственно, в некоторых из наших исследовательских работ мы и сегодня делаем именно это.

Можно, разумеется, моделировать эволюцию схем и программным путем, а полученный результат реализовывать обычным способом. Первые публикации такого рода появились не менее десяти лет назад. Хотя нашу группу больше всего интересует, что происходит в результате эволюции физически реконфигурируемых чипов, моделированию мы придаем очень большое значение. Может даже так случиться, что чем больше мы будем узнавать о том, как работает эволюция для реальных чипов, тем легче мы сможем в будущем полностью заменить такие опыты программным моделированием! Это — открытая область исследований.

Каковы основные принципы организации эволюции в ваших опытах?

— В своих первых экспериментах я использовал самый примитивный генетический алгоритм. В статье «**An evolved circuit, intrinsic in silicon...**», которая, как и другие мои статьи, находится на моей WWW-странице¹, есть описание экспериментальной установки. В данный момент я работаю с другими вариантами эволюционных алгоритмов. Возможностей здесь много.

Содержался ли, в той или иной форме, «ответ» уже в самом алгоритме «обучения» или результат эволюции оказался совершенно неожиданным?

— Поведение полученной схемы было именно таким, какого я старался добиться, и оно было точно описано с самого начала. Но способы, которые для этого использует схема, действительно оказались со-

¹ www.cogs.susx.ac.uk/users/adrianth

вершено неожиданными. Я хотел, чтобы в процессе эволюции могли возникать самые необычные структуры, в том числе и выходящие за рамки общепринятых конструкторских решений. Для этого я предоставил схеме максимальную свободу развития и не навязывал никаких правил. Оказалось, что полученная схема использует очень тонкие и интересные эффекты. Нам с Полем Лэйзеллом потребовался добрый месяц, чтобы в общих чертах разобраться, что же именно там происходит!

Ваши первые устройства учились различать два звуковых сигнала (гудка) различной частоты. Какие задачи решаются сегодня?

– Сначала мы заменили гудки словами «Go» и «Stop», которые произносились в микрофон, после чего преобразовывались в потоки импульсов, а те подавались на вход FPGA. Используя уже выработанное умение различать гудки, эволюция без особого труда научила схему различать и эти слова. Это доказывало, что у схем можно вырабатывать потенциально полезные «навыки», пусть и довольно простые. Главной проблемой, с которой мы столкнулись, оказалась высокая чувствительность обеих схем (реагирующих на гудки и на Go/Stop) к внешним условиям. Они правильно работали только на одном определенном чипе, который использовался в эксперименте, причем диапазон допустимых температур был не очень широк. Поэтому до реальной практики еще далеко. И эта проблема носит общий характер: я намеренно позволил эволюции как можно полнее использовать любые свойства чипа, но за это пришлось платить падением устойчивости к небольшим изменениям этих свойств. Поэтому теперь я работаю с установкой, где есть несколько различных чипов, выпущенных на различных фабриках, работающих при разных температурах, разных напряжениях питания и т. д. За счет этого я

пытаюсь создать давление отбора, чтобы стимулировать появление надежных схем без моего предварительного вмешательства в виде внесения конструктивных ограничений. Животные и растения используют множество интересных стратегий, чтобы добиться устойчивости. Эти стратегии сильно отличаются от того, к чему мы привыкли в электронике, но могут оказаться полезными при эволюционном подходе. Этому посвящена моя статья **«Temperature in Natural and Artificial Systems»**.

Работа по «выведению» надежных схем без предварительного наложения конструктивных ограничений оказалась трудной. Поэтому я ограничиваюсь пока простой задачей с различением гудков, зная по эксперименту с **Go/Stop**, что потом можно будет перейти к более сложным сигналам.

Каков спектр ожидаемых приложений этой технологии? Каковы задачи на близкую, среднюю и дальнюю перспективу? В частности, чего можно было бы добиться на существующем «материале»? И насколько широк его выбор?

– Я не рассматриваю свою работу по выведению нестандартных схем на **XC6216** как поиск новых методов практического использования именно этого чипа (хотя, кто знает...). Это просто удобный инструмент для исследований. Мы занимаемся и программным моделированием эволюции схем, работаем на реконфигурируемых печатных схемах, а также с реконфигурируемыми аналоговыми устройствами фирм **Motorola** (правда, они недавно у нас забрали свое устройство) и **Zetex**. Я думаю, что первыми приложениями нестандартной хардверной эволюции будут совсем маленькие схемы, используемые как элементы больших конструкций. Нас интересует создание при помощи эволюции маленьких схем, потребляющих мало энергии и, желательно, устойчивых к отказам. Мы также думаем о применении эволюционных алгорит-

мов в качестве инструментов разработки реконфигурируемых устройств в обычных САД-системах. Что касается материала, то он уже сейчас довольно разнообразен. Во-первых, существует множество разновидностей **FPGA**, среди которых есть даже аналоговые. Во-вторых, можно построить собственную реконфигурируемую систему на уровне печатной платы. В-третьих, есть группы, такие как группа Хигучи в Японии, которые разрабатывают собственные реконфигурируемые чипы СБИС, однако это не всем под силу, так как требует больших затрат денег и времени. Кстати, я хотел бы выразить благодарность компаниям **Xilinx**, **Zetex**, **British Telecom**, **Hewlett-Packard** и **Algotronix** за их помощь в моей работе.

А в какой степени эта возникающая сейчас технология может оказаться зависимой от конкретного материала? Что, если принципы эволюции, которые сейчас вырабатываются (а частично, быть может, уже выработаны) будут воплощены на базе, допустим, нанотехнологий?..

– Одна из главных задач, которую мы поставили перед собой здесь, в Сассексе, состоит в том, чтобы найти такие формы и процессы, которые наиболее естественны для данной аппаратной среды. Это означает, что результаты того или иного эксперимента будут приспособлены к имеющимся средствам воплощения. Но если мы воспроизведем тот же процесс эволюции на другой аппаратуре, там может образоваться другая архитектура. И мы активно изучаем, как это может повлиять на стиль работы с прогрессивными технологиями будущего, где будут возникать серьезные препятствия к применению традиционных методов конструирования.

Каковы потенциальные опасности и злоупотребления, связанные с эволюционирующим хардвером? Можно ли говорить о «хардверных вирусах»?

– Современные динамически реконфигурируемые **FPGA** стирают грань между программной и аппаратной средой. Поэтому проблемы, традиционно связанные с программными средствами, вполне могут распространиться и на системы, использующие изменяемые по ходу работы **FPGA**-компоненты. В этом нет ничего особенно страшного или сверхъестественного. Более интересна перспектива эволюционного порождения системы, механизм работы которой нам непонятен. В нашей работе «**Analysis of Unconstrained...**» (на нее есть ссылка на моей **WWW**-странице) высказаны некоторые соображения на эту тему. Я считаю, что начинать практическое использование эволюционно выведенной схемы можно будет только после достаточно серьезного анализа полученной конструкции. В этом, собственно, тоже нет ничего нового, и с точно такими же опасностями мы всегда сталкиваемся при создании больших программных систем.

Одним из спонсоров конференции в JPL является Министерство обороны США. Почему военные так интересуются этими идеями?

– Спросите у них. Лично меня интересуют приложения, связанные с космосом. И я не буду даже помогать никому из тех, кто работает с военными. Просто принял для себя такое решение, вот и все.

Указатель имен

А

- Августин Блаженный Аврелий (354–430), христианский теолог.....14
- Айала Франсиско Хосе (р. 1934), американский биолог-эволюционист и философ 119, 155
- Альварес Луис Уолтер (1911–1988), американский физик 129
- Альварес Уолтер, современный американский геолог.....129
- Анаксагор (ок. 500–428 до н. э.), древнегреческий философ135
- Аристарх Самосский (ок. 320-230 до н.э.), древнегреческий астроном21
- Аристотель (384–322 до н. э.), древнегреческий философ 24, 134
- Аррениус Сванте Август (1859–1927), шведский физикохимик135

Б

- Бак Пер (1948–2002), датский физик-теоретик..... 102
- Батлер Сэмюэл (1835–1902), английский писатель и критик 207
- Бауэр Эрвин Симонович (1890–1942), венгерский и российский биолог-теоретик 102
- Беккерель Антуан Анри (1852–1908), французский физик.31
- Берг Лев Семенович (1876–1950), российский географ и зоолог 121, 125
- Бернал Джон Десмонд (1901–1971), британский физик, биолог, геофизик и философ.....139
- Бете Ганс Альбрехт (р. 1906), немецкий и американский физик.....110
- Больцман Людвиг Эдуард (1844–1906), австрийский физик 163, 164, 165, 168, 169, 171, 175, 193, 197
- Броун-Секар Шарль Эдуард (1817–1894), французский физиолог 65
- Бэкон Френсис (1561 – 1626), английский адвокат, государственный деятель, философ и писатель ...21, 22
- Бэтсон Уильям (1861–1926), английский генетик..... 70

В

- Вавилов Николай Иванович (1887–1943), российский ботаник и генетик 73
- Вазари Джорджио (1511–1574), итальянский художник, архитектор и писатель.....20
- Вайнберг Вильгельм (1862–1937), немецкий врач и антропогенетик83–86, 90
- Вегенер Альфред Лотар (1880–1930), немецкий метеоролог и геофизик 39, 40
- Вейсман Август (1834–1914), немецкий зоолог-эволюционист 54
- Вернадский Владимир Иванович (1863 – 1945), российский геохимик и минералог37, 39, 133, 179, 183
- Волькенштейн Михаил Владимирович (1912–1992), советский физико-химик и биофизик 118, 119
- Вольтер, наст. имя Аруэ Мари Франсуа (1694–1778), французский писатель, историк и философ.....23
- Воронцов Николай Николаевич, современный российский биолог-эволюционист 155

Г

- Галилей Галилео (1564 – 1642), итальянский математик, астроном и физик22
- Гальтон (Голтон) Френсис (1882–1911), английский биолог и антрополог 63, 64, 68
- Гамов Георгий (Джордж) Антонович (1904–1968), российский и американский физик..... 109, 110, 180
- Гарвей Уильям (1578–1657), английский врач.....22
- Геккель Эрнст Генрих Филипп Август (1834– 1919), немецкий зоолог-эволюционист 54, 55, 60, 92, 94
- Гексли Томас Генри (1825–1895), английский биолог-эволюционист57, 75, 91
- Гёте Иоганн Вольфганг фон (1749–1832), немецкий писатель, художник, государственный и театральный деятель, просветитель, натуралист.....26
- Гиббс Джозайя Уилард (1839–1903), американский физик 167, 168
- Гиппократ Косский (ок. 460–377 до н.э.), древнегреческий врач и философ 52

Гольданский Виталий Иосифович (1923–2001), российский радиохимик и физико-химик	145
Гофф Жак Ле (р. 1924), французский историк	19, 48
Гранин Даниил Александрович, наст. фамилия Герман (р. 1919), современный российский писатель.....	74
Грэхэм Лорен, современный американский историк науки	73
Гук Роберт (1635 – 1703), английский физик.....	22
Гулд Стивен Джей (1941–2002), американский палеонтолог, эволюционист	117

Д

Дарвин Чарлз Роберт (1809 – 1882), английский натуралист	15, 25–28, 30, 31, 36, 48–51, 53, 54, 57–61, 63–66, 74, 75, 78, 87, 89, 91, 117, 121–123, 148, 155
Декарт Рене (1596 – 1650), французский математик, естествоиспытатель и философ.....	21, 22
Депере Шарль (1854–1929), французский геолог и палеонтолог.....	92, 207, 208
Дженкин Флимин (1833–1885), британский инженер-электрик и натуралист-любитель	52, 66
Джинс Джеймс Хопвуд (1877–1946), английский астрофизик и математик	192
Джоли Джон (1857–1933), ирландский физик и геолог.....	31
Джоуль Джемс Прескотт (1818–1889), английский физик.....	163
Дидро Дени (1713–1784), французский писатель и философ-просветитель	23
Добжанский Феодосий Григорьевич (1900–1975), российский и американский генетик.....	73, 74
Дойл Артур Конан (1859–1930), британский писатель	172
Докинз Клинтон Ричард (р. 1941), современный английский генетик, этолог и эволюционист.....	49, 87, 141, 156
Долло Луи (1857–1931), бельгийский палеонтолог.....	61
Дубинин Николай Петрович (1907–1998), российский генетик	74

Е

Ефремов Иван Антонович (1907–1972), российский писатель и палеонтолог	120
---	-----

Ж

- Жордан Алексис (1814–1897), французский ботаник 67
Жоффруа Сент-Илер Этьен (1772–1844), французский натуралист..... 26

И

- Иогансен Вильгельм Людвиг (1857–1927), датский ботаник и генетик 68, 70, 73, 146

К

- Каммерер Пауль (1880–1926), австрийский биолог 124
Кёлликер Рудольф Альберт (1817–1906), немецкий гистолог и эмбриолог 58
Кельвин, лорд, Уильям Томсон (1824–1907), английский физик и инженер 31, 33, 69, 178, 190, 192
Кено Люсьен Клод (1866–1951), французский биолог..... 71
Кернс-Смит Александр Грэм (р. 1931), шотландский химик-органик и молекулярный биолог-эволюционист ... 142, 143, 156
Кимура Мотоо (1924–1994), японский биолог, создатель нейтральной теории молекулярной эволюции.....113
Кларк Артур Чарльз (1917–2008), английский писатель-фантаст 145
Клаузиус Рудольф Юлиус Эмануэль (1822–1888), немецкий физик 36, 158, 159, 163, 175, 191, 192
Климонтович Юрий Львович, современный российский физик 14
Ковалевский Владимир Онуфриевич (1842–1883), русский зоолог и палеонтолог 60, 61, 208, 211, 212
Кольцов Николай Константинович (1872–1940), российский биолог 73
Кондорсэ Жан Антуан Никола де Карета (1743–1794), французский политический деятель и философ-просветитель..... 22, 23
Коп Эдуард Дринкен (1840–1897), американский зоолог и палеонтолог 93, 208
Коперник Николай (1473 – 1543), польский астроном..... 21
Корана Хар Гобинд (1922–2011), американский генетик и биохимик..... 110

- Корренс Карл Эрих (1864–1933), немецкий ботаник и генетик 66
- Крик Френсис Гарри Комптон (1916–2004), британский молекулярный биолог и биофизик 135, 145, 180, 181
- Кун Томас (1922–1996), американский философ и историк науки..... 46
- Кювье Жорж Леопольд Кретъен Фредерик Дагобер, барон (1769–1832), французский зоолог, палеонтолог и государственный деятель 24, 25, 27, 38, 117, 131
- Кюри Пьер (1859–1906), французский физикохимик..... 32

Л

- Лайель Чарлз (1797–1875), шотландский геолог 25, 30
- Ламарк Жан Батист де Моне шевалье де (1744 – 1829), французский биолог-эволюционист .. 12, 23–27, 30, 51, 54, 56, 66, 80, 94
- Левенгук Антони ван (1632–1723), голландский естествоиспытатель-микроскопист 22
- Лем Станислав (р.1921), польский писатель и философ ...126, 200–204, 207
- Ленин Владимир Ильич, наст. фамилия Ульянов (1870–1924), российский публицист, политический и государственный деятель 164
- Леонардо да Винчи (1452 – 1519), итальянский живописец, скульптор, архитектор, инженер, естествоиспытатель 16, 20
- Лепешинская Ольга Борисовна (1871–1963), российский гистолог.....134
- Линней Карл, наст. фамилия Ингмарссон (1707–1788), шведский ботаник и зоолог 60
- Лотси Ян Паулус (1867–1931), голландский ботаник 70
- Луи XVI (1754–1793), французский король из династии Бурбонов 23
- Лысенко Трофим Денисович (1898–1976), российский биолог и агроном.....27, 73, 124, 135, 137

М

- Майварт Сент Джордж Джексон (1827–1900), английский зоолог 58, 59

Майр Эрнст Уолтер (1904–2005), американский зоолог-эволюционист	74
Максвелл Джеймс Клерк (1831–1879), шотландский физик	34, 163
Мальтус Томас Роберт (1766–1834), английский священник и экономист	49
Маршак Самуил Яковлевич (1887–1964), российский поэт	131
Мах Эрнст (1838–1916), австрийский физик и философ... ..	164
Мендель Грегор Иоганн (1822–1884), австрийский генетик и натуралист	52, 66, 82, 124
Мензбир Михаил Александрович (1855–1935), российский зоолог и зоогеограф.....	70
Мережковский Константин Сергеевич (1855–1921), русский биолог	99
Мечников Илья Ильич (1845–1916), русский биолог, патолог и иммунолог.....	62
Микеланджело Буонарроти (1475 – 1564), итальянский скульптор, архитектор и художник	20
Миллер Стенли Ллойд (1930–2007), американский химик	140
Милликен Роберт Эндрюс (1868–1953), американский физик	192
Мичурин Иван Владимирович (1855–1935), российский селекционер	124
Моисеев Никита Николаевич (1919–2000), российский математик и эволюционист.....	205
Молчанов Альберт Макарьевич, современный российский математик и биолог	141
Муллис Кэри Бэнкс (р. 1944), американский биохимик ...	148

Н

Немцов Борис Ефимович, современный российский политический и государственный деятель	187
Нернст Вальтер Герман (1864–1941), немецкий физик и химик	159, 192
Ниренберг Маршалл Уоррен (1927–2010), американский биохимик.....	110
Нобл Г.К. (XX в.), английский зоолог	124

Ньютон Исаак (1643 – 1727), английский физик и математик 22, 34, 69

О

Оккам Уильям (ок. 1285 – ок. 1348), монах-францисканец, философ и теолог 94

Опарин Александр Иванович (1894–1980), российский биохимик 134, 137–140, 150

Оргел Лесли, современный британский биохимик 145

П

Пастер Луи (1822–1895), французский микробиолог и химик 97, 134, 139, 145

Пеннет Реджиналд Крендолл (1875–1967), английский генетик 83

Пий XII, наст. имя Эудженио Мария Джузеппе Джованни Пачелли (1876–1958), папа римский 191

Писарев Дмитрий Иванович (1840–1868), русский публицист, литературный критик и философ 26

По Эдгар Аллан (1809–1859), американский писатель и поэт 172

Поппер Карл Раймунд (1902–1994), британский философ 133

Пушкин Александр Сергеевич (1799–1837), русский поэт . 58

Р

Райт Сьюэлл (1889–1982), американский генетик 74

Ребане Карл Карлович (1926–2007), советский и эстонский физик 188, 197

Резерфорд Эрнест (1871–1937), британский физик 32, 33

Реймерс Николай Федорович, современный российский эколог 15, 38, 81, 125, 155

Рихтер Герман (1818–1976), немецкий медик 135

Ромашов Дмитрий Дмитриевич (1899– 1963), российский генетик 74

Руссо Жан-Жак (1712–1778), французский философ и писатель 190

С

Симпсон Джордж Гейлорд (1902–1984), американский палеонтолог 74, 105

Смит Уильям (1769–1839), английский инженер и геолог	30
Спилберг Стивен (р. 1947), американский кинорежиссер	90
Сталин Иосиф Виссарионович, наст. фамилия Джугашвили (1879–1953), российский политический деятель	135
Стеббинс Джордж Ледьярд (1906–2000), американский генетик	74, 119, 155
Стоун Ирвин (1903–1989), американский писатель биографического жанра	26
Стэнли Гарри Юджин (р. 1941), американский физик, специалист по приложениям статистической физики	173

Т

Терлецкий Яков Петрович (1912–1993), советский физик	194, 197
Тимирязев Климент Аркадьевич (1843–1920), русский физиолог растений, популяризатор дарвинизма	26, 60
Тимофеев-Ресовский Николай Владимирович (1900–1981), российский генетик	73, 74, 155
Тургенев Иван Сергеевич (1818–1883), русский писатель и поэт	26
Тюрго Анн Робер Жак (1727–1781), французский государственный деятель, философ-просветитель и экономист	22, 23

У

Уилер Джон Арчибальд (1911–2008), американский физик-теоретик, автор терминов Черная дыра и Кротовая нора	175
Уоллес Альфред Рассел (1823 – 1913), английский натуралист	50, 53
Уотсон Джеймс Дьюи (р. 1928), американский генетик и биофизик	181
Уэлдон В. (XIX в.), английский зоолог-эволюционист	64

Ф

Фердинанд Франц (1863–1914), эрцгерцог Австро-Венгрии	127
Филипченко Юрий Александрович (1882–1930), российский генетик	53

- Фишер Роналд Эймер (1881–1945), американский статистик и генетик 74
 Фриз Гуго де (1848–1935), голландский ботаник.... 66, 67, 69, 70, 71

X

- Хаббл Эдвин Пауэлл (1889–1953), американский астроном 44
 Хайям Омар (1048–1131), персидский поэт, математик и астроном16
 Хаксли Джулиан Сорелл (1887–1975), английский эмбриолог и биолог-эволюционист.....74, 75
 Харди Годфри Харолд (1877–1947), английский математик 83–86, 90
 Хаттон Джеймс (1726–1797), шотландский геолог, химик и натуралист 25
 Хокинг Стивен Уильям (р. 1942), английский физик.....176
 Холдейн Джон Бердон Сандерсон (1892–1964), английский биохимик и генетик74, 75

Ч

- Чермак-Зейзенегг Эрх фон (1871–1962), австрийский генетик 66
 Четвериков Сергей Сергеевич (1880–1959), российский энтомолог, генетик, эволюционист 73, 74, 77, 81, 85
 Чимабуе, наст. имя Бенвенуто ди Джузеппе (до 1251–1302), итальянский художник..... 20

Ш

- Шеннон Клод Элвуд (1916–2001), американский математик и инженер174–176
 Шмальгаузен Иван Иванович (1884–1963), российский зоолог-эволюционист 74
 Шманкевич Владимир Иванович (1839–1880), русский зоолог 65
 Шрёдингер Эрвин (1887–1961), австрийский физик..180, 197

Э

- Эддингтон Артур Стэнли (1882–1944), английский астроном, физик и математик192

Эйген Манфред (р. 1927), немецкий физик и химик	143–146, 156
Эймер Теодор Густав Генрих (1843–1898), немецкий зоолог	122, 123
Эйнштейн Альберт (1879–1955), немецкий физик.....	43, 175
Элдридж Нильс (р. 1943), американский палеонтолог	117
Энгельс Фридрих (1820–1895), немецкий философ.....	192

Ю

Юри Гарольд Клейтон (1893–1981), американский химик	140
--	-----