



# Содержание

Введение .....	9
<b>Часть I. Структуры, способы, материалы</b>	
<b>Глава 1</b>	
<b>Заимствование технологий природы: от ремесла к индустрии .....</b>	<b>14</b>
Изобретения для повседневной жизни .....	14
Передовая линия в индустрии .....	16
<b>Глава 2</b>	
<b>Структуры .....</b>	<b>21</b>
Остовы .....	21
Формы .....	24
Текстуры .....	36
<b>Глава 3</b>	
<b>Способы .....</b>	<b>44</b>
Как лучше соединить .....	44
Как лучше развернуться .....	50
Как лучше обращаться с жидкостями и газами .....	55
Как распространять звуки .....	57
Как лучше освоиться в разных средах .....	60
<b>Глава 4</b>	
<b>Материалы .....</b>	<b>63</b>
Адгезивный продукт — еще один! .....	63
Эластичный продукт .....	66
Стойкие участники сопротивления: Прочность .....	71

**Часть II. Поведение****Глава 5**

<b>От автоматов к аниматам .....</b>	<b>76</b>
Философские игрушки .....	76
Программируемые автоматы.....	82
Прото-роботы .....	84
Кибернетические роботы .....	87
Интеллектуальные системы .....	93
Адаптивные роботы: аниматы.....	99
Изобилие источников для заимствования.....	101

**Глава 6**

<b>Воплощенное действие .....</b>	<b>102</b>
Плавание .....	102
Ползание.....	106
Ходьба.....	108
Полет .....	111
Захват .....	114
Перфорация .....	115

**Глава 7**

<b>Продвинутые сенсоры .....</b>	<b>117</b>
Зрение .....	117
Обоняние .....	124
Осязание .....	125
Мультимодальное восприятие .....	127

**Глава 8**

<b>«Канализированные» архитектуры управления .....</b>	<b>129</b>
Искусственный таракан.....	130
Разум множества .....	137
За пределами простых рефлексов .....	144

<b>Глава 9</b>	
<b>Обучающиеся роботы .....</b>	<b>146</b>
Обучение через подкрепление .....	147
Обучение с помощью подражания.....	154
Обучение по ассоциации.....	156
Коллективное обучение .....	163
<b>Глава 10</b>	
<b>Развитие и эволюция в робототехнике.....</b>	<b>167</b>
Развитие .....	167
Эволюция.....	178
Коэволюция.....	190
<b>Часть III. Гибриды</b>	
<b>Глава 11</b>	
<b>От протезов к киберпротезам.....</b>	<b>202</b>
Древности .....	202
Пассивные протезы.....	203
Эра киберпротезов .....	205
<b>Глава 12</b>	
<b>Искусственные гибриды.....</b>	<b>207</b>
Гибридизация с природными сенсорами .....	207
Гибридизация с природными эффекторами.....	210
Гибридизация с природными архитектурами управления	211
Другие гибридизации.....	218
<b>Глава 13</b>	
<b>Живые гибриды.....</b>	<b>224</b>
Интеллектуальные протезы .....	225
Интеллектуальные эндопротезы .....	230
Протезы, предназначенные для радио-контроля.....	233
Эндопротезы стимулирующие и регистрирующие .....	237
Дух — над материей .....	240



<b>Заключение</b> .....	250
Биология и технологии.....	250
Биология и робототехника .....	252
Органическое и неорганическое .....	257
Перспективы? .....	258
<b>Эпилог</b> .....	261
<b>Благодарности</b> .....	262
<b>Литература</b> .....	263
<b>Примечания</b> .....	267
<b>Предметный указатель</b> .....	278

*Посвящается Агате, пусть она проникнется  
заботой к этой планете, населенной столь  
удивительными созданиями.*

**Агнес Гийо**

Преподаватель университета *Paris-X* и научный сотрудник Института интеллектуальных систем и робототехники Университета им. Пьера и Мари Кюри (*ISIR*), Париж 6.

**Жан-Аркади Мейе**

Директор Института интеллектуальных систем и робототехники Университета им. Пьера и Мари Кюри при Национальном центре научных исследований (*CNSR*), Париж 6.

# Введение

*Природа — великий учитель, особенно для того, кто наблюдателен.*

Карло Гольдони

Нить паутины в пять раз прочнее и вдвое эластичнее нейлонового волокна, а летающий микродрон машет крылышками, как насекомое; кибер-рука позволяет осязать и ощущать тепло. . . Так человек пытается подражать всему возникшему в результате эволюции. Множество тому свидетельств сохранилось в исторических документах или в легендах со времен появления письменности. Двадцать четыре столетия назад один грек создал из дерева летающего голубя; три века спустя в Египте была изготовлена подвижная искусственная рука; по аналогии с текстурой осиних гнезд в начале нашей эры китайцы придумали бумагу.

Во все времена человеческий ум зондировал ум Природы, чтобы по ее подобию усовершенствовать собственные изобретения. Иногда технические возможности человечества этому не соответствовали. Например, навеянные полетом птиц и летучих мышей летательные аппараты, макеты которых рисовал Леонардо да Винчи, не смогли бы подняться в воздух. В его время еще не было достаточно легких материалов и мощных двигателей.

Начиная с XIX века технологический прогресс набрал головокружительные обороты. Вдохновленные индустриальной революцией, инженеры придумывали все новые способы воплощения в жизнь всевозможных природных конструкций и материалов.

В наши дни происходит другая революция. Речь идет об использовании бесконечно малых частиц материи, порядка миллиардной доли метра, при манипуляциях на уровне атомов. Действительно, нанотехнология предлагает совершенно оригинальные устройства,



применяющиеся в различных областях. Важное преимущество этих устройств — в их миниатюрности. Благодаря крошечным размерам механические, электрические и оптические свойства наноматериалов полностью отличаются от свойств макроматериалов. Для исследователей стало достижимым конструирование искусственных структур, имитирующих микроскопические структуры живой клетки.

Параллельно этим направлениям технического прогресса, происходит сближение природных и искусственных систем. В 1940–1950-е годы американский психолог Кларк Леонард Халл (*Leonard Hull*) заявил, что законы, управляющие поведением животных и механизмов, по-видимому, одинаковы и их можно с успехом взять на вооружение. В тот же период математик Норберт Винер (*Norbert Wiener*) основал новую дисциплину, которую назвал кибернетикой. В основу кибернетики положено сходство информационных процессов в природных и в искусственных системах. Чуть позже пионеры искусственного разума прибегли к той же аналогии и даже дошли до заявлений о полном сходстве компьютерного процессора и мозга. С этой точки зрения нечто искусственно созданное стало метафорой живого, а не наоборот, как это обычно бывает.

Идея о том, что науки о живом мире и технические дисциплины могут идти рука об руку, набирала силы. Так, в сентябре 1960 года, после американского симпозиума в Дайтоне (штат Огайо), у всех на слуху оказался термин\* «бионика»<sup>1</sup>. Совмещение биологии и техники, а затем биологии и электроники — заявленный предмет этой науки. Появилась обширная программа, объединяющая компетенцию инженеров и ученых-исследователей из самых разных областей знания: математиков, физиков, химиков, а также биологов и психологов. Это объединение предполагало искать в природе способы преобразования искусственных систем. А то, что можно назвать новой бионикой, пришло десяток лет спустя (и, несомненно, вместе с одним хорошо известным американским фельетоном: «Человек,

---

\*Цифрами в верхнем индексе здесь и далее обозначены примечания авторов, которые можно найти в конце книги (см. раздел «Примечания»). А звездочками и другими нецифровыми обозначениями далее будут отмечаться постраничные сноски переводчика и редактора русского издания.

который стоит 3 миллиарда»). Речь идет о концепции гибридных систем, интегрирующих живые и искусственные компоненты.

Тогда начали развиваться три направления молодой науки. Первое описывало некоторые из множественных технологических воплощений природных структур, приемов и материалов. Например, оно пыталось объяснить, каким образом лапки ящерицы геккона успевают плотно «прилипнуть» за 1/8000 секунды к любой поверхности. Это помогло бы разрешить головоломку, которую представляет собой идея «сухого» прилипания — совершенного удерживания независимо от характера опоры. Второе направление охватывало поле исследования задач, будораживших умы людей с самых давних времен, но возродившихся к жизни лишь в последние годы. Речь идет о концепции автономных роботов, вдохновленной животными и их поведением. Таких роботов относят к так называемой «биоинспирированной робототехнике» (*la robotique bioinspirée*)\*. Она, например, предполагает интерес к следующему феномену: каким образом альбатросу удастся целыми днями напролет планировать в воздухе, ни разу не взмахнув хотя бы одним крылом? Ответ на этот вопрос помог бы разрешить проблему летательных аппаратов с малым резервом горючего, такое решение можно было бы перенести на будущий микродрон. Наконец, третье направление касается атипичных произведений, предполагающих гибридизацию природных и искусственно созданных систем. Скажем, сюда относится задача создания «нейропротеза», который мог бы позволить страдающим тетраплегией<sup>†</sup> пациентам дистанционно управлять механизмами.

В предлагаемой читателю книге мы рассмотрим множество других примеров заимствований у природы и их комбинации, воплощаемые по мере исследования материи. Кроме того, будут поочередно кратко описаны особенности исторического пути различных сфер приложения бионики. В конце работы мы обсудим перспективы —

---

\*Термин можно перевести также выражениями: «биовдохновленная робототехника» или «биоинспирированная робототехника». По-английски: *bioinspired*. — Прим. перев.

<sup>†</sup>Тетраплегия, или квадролегия (от греч. «тетра» — четыре и «plege» — удар, поражение), — паралич всех четырех конечностей, обычно связан с повреждением спинного мозга. — Прим. перев.

по крайней мере так, как их себе представляют некоторые смелые исследователи. Помимо этого мы коснемся определенных ограничений, с которыми сталкиваются исследователи в работах такого рода. Сюда относятся этические проблемы и некоторые иные, затрагиваемые в различных текстах и законодательных актах во всем мире, призванных предотвратить любой риск пагубного применения этих искусственных творений.

**ЧАСТЬ I**

**СТРУКТУРЫ, СПОСОБЫ,  
МАТЕРИАЛЫ**

# ГЛАВА I

## ЗАИМСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИРОДЫ: ОТ ремесла К ИНДУСТРИИ

*Человеческий гений способен породить самые разнообразные изобретения благодаря применению различных инструментов, служащих одной цели. Однако он никогда не сможет создать нечто столь же прекрасное, столь же простое и приспособленное, как творения самой Природы, ибо в них все безупречно и нет ничего лишнего.*

Леонардо да Винчи

Задолго до того, как бионика стала научной дисциплиной, ее практиковали в рамках ремесленного производства — ради улучшения быденной жизни или расширения человеческих возможностей. В XIX веке стали появляться отдельные патенты, защищающие такие изобретения, и их незамедлительно брала на вооружение промышленность.

### Изобретения для повседневной жизни

Восемь веков назад в Китае жители деревни Хонг-Чун, расположенной в горах Хуанг-Шань (что означает Желтые горы), проявили себя как первые архитекторы-бионики. Они придали своей деревне

форму быка и для обеспечения подачи воды придумали водную (гидрологическую) сеть, имитирующую пищеварительную систему. Головой такого быка служил холм, рогами — два больших дерева. Четыре моста изображали ноги, а деревенские дома — тело быка. По кишечнику чистая вода подавалась к подножию каждого дома и затем стекалась к озеру-желудку в форме полумесяца, а потом — к озеру побольше, которое имитировало живот быка, и, наконец, выпадала в реку. Эта канализационная система вплоть до наших дней способна подавать воду, пригодную для питья и орошения сельскохозяйственных культур. Правда, сейчас жители деревни используют ее скорее в туристических видах, нежели в практических целях, тем более что деревня Хонг-Чун была включена в список мирового наследия ЮНЕСКО...

Этот пример имеет еще и символическую интерпретацию. В Китае бык олицетворяет долговечность. Происхождение и источники других заимствований у природы очертить труднее. Предполагают, например, что искусственные плотины из камня, датируемые 3-м тысячелетием до нашей эры, были заимствованы у бобров, что устройство паутины натолкнуло древних рыбаков на идею рыболовных сетей. Кроме того, полагают, что прекрасная терморегуляция ячеистых домов индейцев пуэбло в Новой Мексике — домов, построенных из смешанной с водой глины, — объясняется имитацией архитектуры глиняного гнезда ос-отшельников.

Имена некоторых первооткрывателей забылись, но другие сумели войти в историю. Китайца Чай-Луна\* (или Тсай-Луна) считают изобретателем бумаги. Этот материал он создал в 105 году нашей эры, смешивая бамбук с водой, после внимательного изучения гнезд общественных, т. е. живущих роем, ос — родственниц упомянутых выше одиночных ос. Гнезда этих перепончатокрылых на самом деле состоят из дерева, смешанного со слюной. Они строятся вокруг сот, закрепленных на столбе или другой опоре, которые

---

\*По преданию, Чай-Лун родился в городе Квей-Янге, в Южном Китае. В 75 г. он поступил на службу к императору Хо, а в 89 г. был назначен директором императорского арсенала. Работая в арсенале, Чай-Лун изобрел много видов нового оружия, которое долго употреблялось китайскими войсками. — *Прим. перев. по материалам сайта: <http://expert.urf.ac.ru>*

окружены множеством слоев из того же материала. Гораздо позже, в 1719 году, такая же наблюдательность позволила французскому естествоиспытателю Рене-Антуану Фершо де Реомюру\* предложить рецепт производства более современной и мягкой бумаги на основе вторичного использования тряпья.

## Передовая линия в индустрии

В XIX веке большинство изобретателей, полагаясь на интуицию и продвигаясь на ощупь, все же получили патенты на свои устройства. Ремесленные рынки остались в прошлом. Хороший пример перехода от эры ремесленной к эре индустриальной — история колючей проволоки. На западе США заменителем проволоки с железными колючками изначально служили ветки колючего техасского апельсинового дерева *l'oranger des Osages*, которые использовались индейцами племени сиу. Французские миссионеры вместо исконного местного «*Wazházhe*» дали дереву более легкопроизносимое название «*Osage*», или озаж. Из веток этого дерева индейцы сиу делали луки, а напоминающий каучук сок его несъедобных плодов использовали для раскраски лиц. Первые колонисты-американцы придумали ограждать свои владения зарослями апельсинового терновника, чтобы уберечь домашний скот. Про эту изгородь говорили, что она: «достаточно высокая для лошадей, достаточно прочная для быков и достаточно частая для свиней». Однако такая живая изгородь росла медленно, и некоторые находчивые фермеры заменили естественные заграждения металлической проволокой с железными колючками, имитирующими колючки на ветках терновника. Изобретение, названное индейцами «поясом дьявола», было усовершенствовано

---

\*Рене Реомюр (1683–1757) — человек незаурядный. Его научные труды посвящены математике, физике, химической технологии, зоологии и ботанике. Он разработал способ производства матового стекла. В 1715 г. начал заниматься металлургией железа. В 1730 г. изобрел спиртовой термометр, шкала которого определялась точками кипения и замерзания воды. Шкала Реомюра долгое время была распространена в Европе. — Прим. перев. по материалам сайта: <http://www.physchem.chimfak.rsu.ru/Source/History/Persones/Reaumur.html>

Джозефом Ф. Глидденом, который в 1874 году заявил патент на производство колючей проволоки одному местному коммерсанту.

Распространение этого удобного новшества имело драматические последствия. Ковбои оказались перед лицом технологической безработицы. Изгороди, став съёмными и растяжимыми, спровоцировали ожесточенную борьбу между фермерами, стремившимися во что бы то ни стало заполучить каждый лишний клочок земли. Заграждения позволяли им то и дело расширять свои владения, вытесняя индейские племена и их главную пищу — бизонов, заставляя их перемещаться в местности, все более тесные и скудные. Во время войны между Севером и Югом проволочные заграждения использовались американцами для западни и охраны пленных. Колючая проволока стала «орудием политического управления пространствами»<sup>2</sup>.

Использование изобретений и быстрое освоение любых инноваций в военные времена приносит злополучную выгоду. Первая мировая война для распознавания подводных объектов эксплуатировала гидролокатор, разработку которого к 1915 году завершил французский физик Поль Ланжевен\* (*Langevin*). Этот пример — лишь капля в море. На первый взгляд, гидролокатор представлял собой прямое заимствование принципа эхолокации у морских животных, но на самом деле это не так. Сходство принципов работы искусственного гидролокатора и эхолокаторов у животных было обнаружено значительно позднее. Правда, в качестве реванша, во время Второй мировой войны тот же Поль Ланжевен, по иронии судьбы, оказался причастен к одному изобретению, которое, бесспорно, заимствовано у биологии. Речь идет о часах *Cricket Watch*<sup>†</sup> — первых наручных часах с функцией будильника.

Руководство американской армии стремилось снабдить своих солдат каким-нибудь устройством, позволяющим синхронизировать

---

\*Поль Ланжевен (фр. *Paul Langevin*, 1872–1946) — французский физик и общественный деятель, создатель теории диамагнетизма и парамагнетизма. Член Парижской академии наук (1934), член-корреспондент Российской академии наук (1924) и почетный член Академии наук СССР (1929), иностранный член Лондонского королевского общества (1928). — По материалам Википедии: <http://ru.wikipedia.org/wiki>

†Знаменитые швейцарские часы *Cricket* со звуком сверчка или кузнечика. — Прим. перев.



военные операции. Часы-будильник уже в то время производила, с 1890 года, швейцарская фирма *Vulcain* (Вулкан), но они обладали двумя значительными недостатками. С одной стороны, издаваемые звонком вибрации систематически расстраивали механизм часов. С другой — слабый звук этого будильника легко заглушали окружающие шумы. Инженеры из всех сил старались привести улучшения в это устройство и уже готовы были признать тщетность своих попыток. И тут Поль Ланжевен, будучи с визитом на предприятии, сказал своим собеседникам, что проблема эта вполне разрешима: если такое маленькое насекомое, как кузнечик, способно производить звук, разносящийся на десятки метров, то в часах, разумеется, можно добиться такого же эффекта... Это подтолкнуло идею сделать мембрану (во втором дне, с отверстием, способствующим распространению производимого часами звука) — стальную мембрану, на которой создается резонанс от маленького молоточка, по образцу стрекотательного аппарата насекомого. Часы *Cricket Watch* были усовершенствованы к 1947 году и, начиная с президента Эйзенхауэра, стали культовыми для многих президентов США.

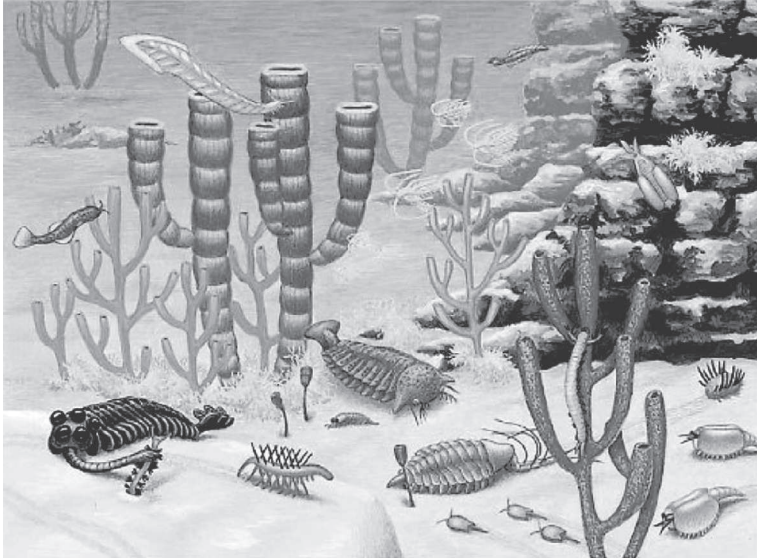
В 1960 году, в эпоху холодной войны, в СССР был сбит американский самолет, а его пилота заключили в тюрьму. Это было в тот период, когда проходила знаменательная конференция в Дайтоне, организованная военно-воздушными силами США на базе Райт-Паттерсон\*. Эта конференция имела широкий резонанс помимо интереса к теме «военных секретов», которых она касалась. Она вдохновила исследования во множестве публичных и частных лабораторий во всем мире. Так, по инициативе одной из лабораторий института *INRA*<sup>†</sup> в 1966 году был организован первый научный симпозиум в Италии, посвященный эхолокации (сонарам) у морских и наземных животных. Затем исследования в области бионики стали быстро распространяться в мире, и особенно в Германии. В 2005 году в рамках Всемирной выставки в Аиши (Япония), павильон Германии

---

\*Об этой конференции упоминалось выше в связи с возникновением термина «бионика». См. также авторский комментарий 1 в разделе примечаний в конце книги.

<sup>†</sup>Видимо, французский Национальный институт исследований в области сельского хозяйства (*Institut National de la Recherche Agronomique*). — Прим. перев.

был целиком посвящен бионике. Однако во Франции, несмотря на официальные заверения, междисциплинарным исследованиям долгое время не уделяли должного внимания. . .



**Рис. 1.1.** Несколько примеров фауны кембрийского периода самых невероятных форм. Большинство из них относятся к группам, в настоящее время совершенно исчезнувшим: из 120 ветвей осталось примерно 33, среди которых можно назвать, например, губок и моллюсков

Три последующие главы посвящены развитию технологических изобретений в области бионики, заимствованных у живых систем. Эти последние экспериментировали и продолжают экспериментировать поныне с помощью множества морфологических форм и механизмов, обеспечивающих их выживание. После двух с половиной миллиардов лет, в течение которых изолированные клетки доказывали свою сверхустойчивость в водной среде, над поверхностью воды развилось множество разновидностей многоклеточных организмов в виде самых сюрреалистических<sup>3</sup> форм. Из этого огромного

множества архитектурных форм осталась лишь малая часть представителей, но зато достаточно вооруженных, чтобы продолжать существовать в морских глубинах до наших дней. Цианобактерии (бактерии, способные к фотосинтезу, которых ранее относили к водорослям) и растения первыми осмелились использовать сушу как новую экологическую нишу. Для противодействия сухому воздуху, силе тяготения, ультрафиолетовым лучам, резким колебаниям климатических условий на поверхности Земли они изменили свою структуру и физиологию. Немного позже появились беспозвоночные животные, затем позвоночные. Их морфология и физиология трансформировались под тем же давлением внешних условий, к которому до них приспосабливались растения.

Таким вот образом жизнь измышляет огромную коллекцию доспехов, адаптированных к невероятному разнообразию форм существования на планете. Но какие ингредиенты лежат в ее основе? Всегда одни и те же! Около 99% углерода, водорода, кислорода и азота, в остатке — примерно двадцать других элементов из сотни прочих, составляющих известную нам Вселенную.

Однако Природа не так легко раскрывает секреты своей кухни. . .

## ГЛАВА 2

# СТРУКТУРЫ

*Переписывать всегда открытую книгу Природы.*

Антонио Гауди

Римский архитектор Витрувий\* 2100 лет назад впервые написал о «расположении зданий храмов и их пропорции в соответствии с измерениями человеческого тела». Образцами для архитектуры стали пропорции природы, особенно наиболее совершенной ее части — человека.

Так продолжалось вплоть до XVIII столетия. Затем круг природных моделей стал охватывать другие создания животного и растительного мира в соответствии с идеей о том, что искусственные структуры подчиняются тем же физическим законам, что и структуры естественные.

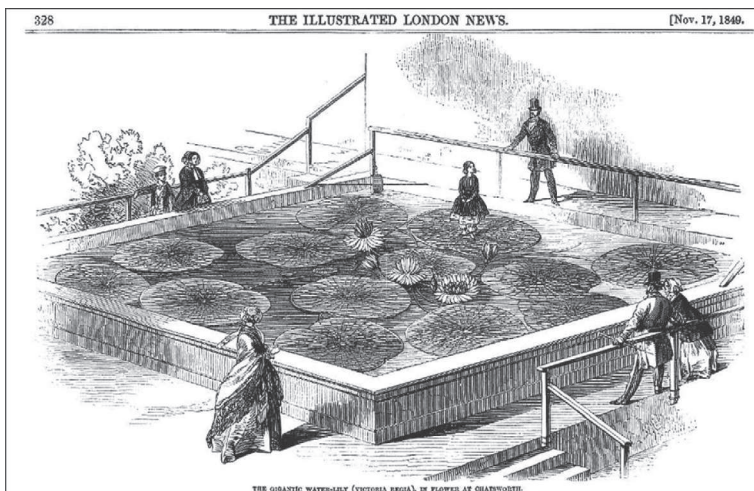
### Остовы

Лист амазонской виктории (лат. *Victoria amazonica*) — водного растения, родственного кувшинке, — может достигать двух метров в диаметре. Радиальные жилки листа виктории, идущие от подводного стебля, значительно усилены множеством гибких концентрических и противоположно направленных жилок. Этот остов делает лист виктории таким прочным, что он оказался способен выдержать вес Анни — внучки британского архитектора Джозефа Пэкстона (*Paxton*)<sup>†</sup>.

---

\*Марк Витрувий Поллион (лат. *Marcus Vitruvius Pollio*) — римский архитектор, инженер, теоретик архитектуры второй половины I века до н.э.

<sup>†</sup>Джозеф Пэкстон (англ. *Joseph Paxton*, 1803–1865) — английский архитектор, садовод и ботаник. Был седьмым сыном небогатого фермера. [ru.wikipedia.org/wiki/](http://ru.wikipedia.org/wiki/)



**Рис. 2.1.** Восьмилетняя малышка Анни Пэкстон демонстрирует прочность листа *Victoria amazonica*

Сначала Пэкстон был садовником, а затем получил статус главного интенданта в поместье Чатсуорт-хаус\*, где и попробовал себя в качестве архитектора. Он вырастил в оранжерее единственный черенок виктории, привезенный из Гайаны. Растение выросло, размножилось и распространялось с таким головокружительным размахом, что он вынужден был придумать другое архитектурное сооружение для его содержания. Он задумал строение из стекла и железа, имеющее такой же каркас, как лист виктории, — его «Дом лилий» (*«Lily House»*) снискал громадный успех.

Затем эта конструкция вдохновила Пэкстона на создание Хрустального дворца в Лондоне, который стал гвоздем международной выставки 1851 года. Пэкстон нарисовал проект этого сооружения всего за 9 дней. Его революционная конструкция была создана из отдельных модулей — 293 000 стеклянных панно, которые мон-

\*Точнее: герцог Девонширский предложил Пэкстону должность главного садовника в своей пышной резиденции Чатсуорт-хаус (*Chatsworth House*) — Прим. перев. по материалам Интернета.

тировались воедино с помощью двух тысяч человек целых восемь месяцев. Эта изящная, но очень прочная конструкция долгое время была центром множества зрелищных выставок, пока ее не разрушил пожар. Однако сохранился построенный по тому же принципу отголосок Хрустального дворца — оранжерея «Виктория» в ботаническом саду Страсбурга, переименованная в оранжерею де Бари (*de Barry*) в честь первого директора этого сада.

**Рис. 2.2.** Оранжерея де Бари в ботаническом саду Страсбурга, каркас которой напоминает остов листа *Victoria amazonica*



Скелеты животных тоже служат хорошими моделями. Конструкция четырех стоек Эйфелевой башни, например, сходна по структуре с бедренной костью человека, сочлененной с костями таза своего рода «консолью с выступом над пустотой»\*, хотя это сходство и оспаривается. Тем не менее это сооружение сочетает в себе необыкновенную легкость (на каждые 30 см по высоте башни оказывается давление менее 10 г) и устойчивость, которая позволяет башне противостоять сильным ветрам, дующим со скоростью более 150 км/ч. . .

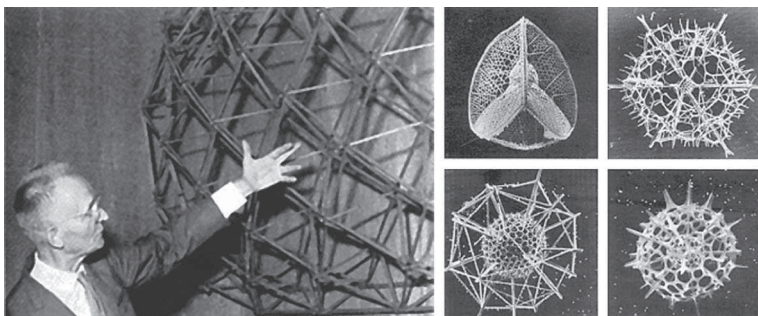
Легкие, очень изящные и прочные микроорганизмы с филигранной конструкцией скелетов появились на Земле почти за 600 миллионов лет до нас. К ним относятся морские простейшие одноклеточные организмы радиолярии, или лучевики, не видимые невооруженным глазом. Эти микроорганизмы состоят из одной-единственной

---

\*Видимо, имеется в виду строение сустава с «напылом» кости сверху. — Прим. перев.

клетки, которая окружена прочной радиальной структурой на основе кремния с характерной для каждого вида радиолярий геометрией. В процессе эволюции организация их скелета модифицировалась в сторону экономии конструкторского материала, став более разреженной в середине клетки: радиолярии четвертичного периода в результате оказались вчетверо легче, чем радиолярии элоцена. Более легкие, но по-прежнему необычайно прочные!

В 1950-е годы этот факт заинтересовал французского архитектора Робера Лё Риколе (*Robert Le Ricolais*), профессора Пенсильванского университета в Филадельфии. Он стал создателем весьма авангардистских конструкций, копирующих скелеты разнообразных радиолярий, которые в XIX веке в совершенстве изобразил немецкий биолог Геккель\* (*Haeckel*).



**Рис. 2.3.** Слева: Робер Лё Риколе около одной из своих архитектурных конструкций, заимствованных у радиолярий. (© René Motro, Университет Montpeiller II.) Справа: ажурные системы и радиолярии, нарисованные Геккелем

## Формы

В 1420 году перед ученым советом, который сомневался в его компетенции построить купол собора Санта Мария дель Фьоре во Флоренции,

\*Эрнст Гёнрих Филипп Август Гёккель (нем. *Ernst Heinrich Philipp August Haeckel*; 1834–1919) — немецкий естествоиспытатель и философ. Автор терминов «питекантроп», «филогенез» и «экология». — По материалам *Википедии*.

ренции, Филиппо Брунеллески\* резким движением положил на стол яйцо — так, что оно немного раздавилось в основании. Все присутствующие смогли убедиться в том, что яйцо в виде вытянутой полусферы остается вертикальным и неподвижным. Архитектору вряд ли удалось бы доказать верность своих расчетов иным способом. . . Яйцо флорентийского Колумба сработало, Брунеллески получил карт бланш, и построенный им гигантский собор стоит на своем месте до сих пор. По совпадению или нет, конструкция собора основана на тех же принципах, что и скорлупа яйца, — из кирпичей, которые обоюдно блокируют друг друга за счет силы трения† и которые стали такими же совершенными классическими опорами, как своды из дерева. Притом хитроумный стык (соединение в паз) двух куполов обеспечил хорошее распределение нагрузок.

Очевидно: яйцо не должно содержать в себе своды, которые стесняли бы развитие зародыша. Однако эта структура способна выдерживать воздействие значительной силы: скорлупа куриного яйца, толщиной 0,3 мм, раскалывается лишь при давлении не менее 3 кг, а скорлупа яйца страуса, которая в 10 раз толще, выдерживает в 20 раз большее давление. В скорлупе использована одна хитрость: кристаллы минеральных солей, из которых она состоит, ориентированы к центру яйца, и тем самым она сама себя блокирует, как кирпичи свода флорентийского собора.

---

\*Сомнения комиссии объяснимы. Купол Флорентийского собора — одно из самых грандиозных архитектурных свершений эпохи Возрождения — брался воздвигнуть архитектор, не получивший специального образования, ювелир по профессии. Правда, для первой половины XV века это было обычным делом. Специального архитектурного образования не существовало. Авторами архитектурных проектов становились скульпторы, живописцы и ювелиры вроде Брунеллески. — *Прим. перев. по материалам сайта <http://www.brunelleschi.ru>*

†Загадка сооружения этого грандиозного купола не разгадана до сих пор. Разумеется, Брунеллески гениально нашел правильный изгиб ребер — дуга в 60 градусов обладает наибольшей прочностью. Вторая техническая находка — способ кладки, когда кирпичи располагаются не горизонтально, а с наклоном внутрь, при этом центр тяжести свода оказывается внутри купола — своды росли равномерно (восемь синхронных групп каменщиков), и равновесие не нарушалось. Кроме того, в каждой лопасти свода ряды кирпичей образуют не прямую, а слегка вогнутую, провисающую линию, не дающую разломов. Кирпич для строительства купола использовали очень высокого качества. — *По материалам сайта <http://www.brunelleschi.ru>*



Эти характеристики недавно были изучены и повторены разными архитекторами<sup>4</sup>, чтобы точнее рассчитать толщину слоев кирпичной кладки перед реконструкцией соборов или определить направление механических напряжений в громадных конструкциях.

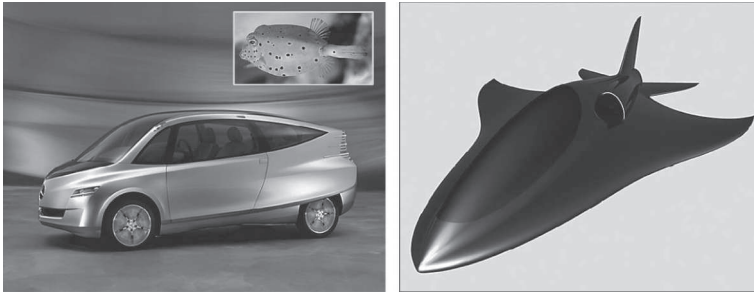
\*\*\*

Обтекаемая форма равным образом известна как быстро движущаяся в воздушной и водной среде, практически не встречая сопротивления. Как ни странно, именно морские животные определили множество моделей всевозможных наземных и воздушных мобилей!

Например, форма тропической рыбы-чемодана (франц. *poisson-coffre*) испытывалась инженерами фирмы Даймлер (*Daimler AG*), чтобы добиться экономии горючего в будущих автомобилях. Эти разработки привели к прототипу, представленному в 2005 году в Вашингтоне. Хотя упомянутая рыба — почти кубическая по форме, это качество парадоксальным образом обеспечивает ей великолепную гидродинамику. Согласно представленным инженерами расчетам, аэродинамические показатели этой рыбы выше, чем у современных автомобилей: ее коэффициент скольжения в воздухе равен 0,06 вместо 0,30 — у автомобилей!<sup>5</sup>

Автомобиль с заявленным именем «мерседес-бенц бионик кар» имеет коэффициент скольжения в воздухе 0,19 и притом экономит 20% топлива и дает на 80% меньше выбросов оксида азота. Кузов этого автомобиля, составленный из многочисленных шестиугольных панелей, напоминает жесткий панцирь рыбы, поддерживаемый позвоночником. Эта машина пытается соперничать с природой в двух ее главных принципах — легкости и прочности, впрочем, те же принципы лежат в основе автомобильной индустрии.

Посмотрите на рисунок 2.4: возможно, самолет будущего тоже будет напоминать по форме рыбу! Самолет *Smartfish*, или «быстрая рыбка», был задуман в нескольких международных исследовательских лабораториях<sup>6</sup>, он вдохновлен формой разных видов рыб, в частности тунца — одного из самых быстрых и ловких морских хищников. Мини-модель этого самолета, всего метр в окружности, была с успехом апробирована в апреле 2007 года.



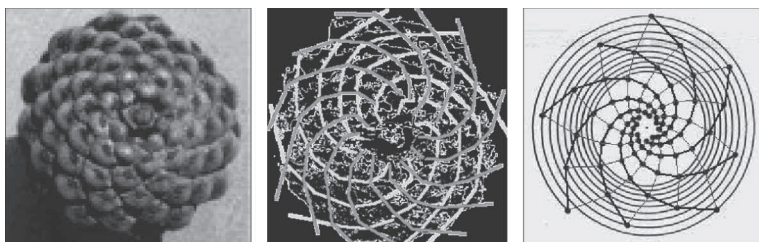
**Рис. 2.4.** Слева: автомобиль «рыба-чемодан» и его природный прототип (Фото © Mercedes-benz Cars, Media materials and pictures, Штуттгарт). Справа: самолет Smartfish (Фото © Koni Schatroth, Team SmartFish GmbH)

Сейчас испытывается связанный с таким же заимствованием весьма продвинутый велосипед, вдохновленной формой антарктических пингвинов. И возможно, в скором времени эта модель покорит лидеров велопробега Тур де Франс. На самом деле, форма этих птиц позволяет им плавать с минимальным расходом энергии, поскольку тормозящее лобовое сопротивление воды сведено к минимуму. По мнению исследователей из Технического университета Берлина<sup>7</sup>, будь пингвины машинами, они могли бы проехать 1500 км на одном литре сжиженного газа! Этот примечательный факт вдохновил концепцию новых наземных средств передвижения, вроде упомянутого велосипеда, а также прототипы самолетов и подводных лодок.

Закончим обзор «биоинспирированных» средств передвижения примером *Shinkansen* серии 500, японской фирмы *TGV*. Нос этой машины имитирует форму головы и клюва зимородка. Такая форма позволяет ему развивать большую скорость и экономить энергию при прохождении аэродинамической трубы. На самом деле проблема приспособленности к разному сопротивлению воздуха за пределами туннеля и внутри него похожа на проблему, которая без труда решается птицами, пересекающими границы сред неодинаковой плотности, например границу воздуха и воды.

## ... Форма в золоте

Есть ли что-нибудь общее между подсолнухом, Страсбургским собором, раковиной улитки, Третьим фортепьянным концертом Бартока, сосновой шишкой, изображенным Моне вокзалом Сен-Лазар, сердцевинной какой-нибудь ромашки, лучезарным городом Корбюзье\*, ананасом и Страдивариусом (скрипкой Страдивари)? Есть. Пропорции золотого сечения...



**Рис. 2.5.** Сосновая шишка и золотое сечение. *Слева:* чешуйки сосновой шишки образуют спирали, число которых соотносится с числами последовательности чисел Фибоначчи. Если представить четыре угла чешуйки сосновой шишки в виде точек и затем соединить эти точки, то мы получим спирали, которые закручиваются вправо, а также другие — закручивающиеся влево. *В центре:* получится 8 спиралей, повернутых в одном направлении (на цветной вклейке они зеленые), и 13 спиралей, идущих в другом (на вклейке они красные). А числа 8 и 13 являются соседними членами ряда Фибоначчи: 1; 1; 2; 3; 5; 8; 13... *Справа:* через каждую точку проходят две спирали. Количество точек на каждой из этих спиралей тоже соотносится с двумя числами последовательности Фибоначчи. (См. цветную вклейку)

Это число вновь и вновь обнаруживают в организации многих природных форм. Замечено, например, что соотношение между радиусами спиральных конструкций аммонитов и улиток соответствует пропорциям золотого сечения. Аналогично, сердцевина подсолнуха или ромашки, чешуйки сосновой шишки или ананаса

\*Ле Корбюзье (1887–1965) — знаменитый французский архитектор конструктивист, урбанист, авангардист, пионер модернизма. Построил несколько зданий в Москве. Например, Дом Центросоюза в 1928–1935. — *Прим. перев.*