

# 3

## Баланс невидимых сил

*Геодезическая линия — это наиболее энергоэкономичное соотношение между любыми двумя событиями.*

Р. Бакминстер Фуллер (1975, 702.01)

**Ключевые моменты:** гетерархии, вложенная модульность, фазовый сдвиг, синергия, тенсегрити.

Фуллер утверждал, что при правильном понимании все естественно сформировавшиеся, а не искусственные природные структуры — от солнечной системы до атома — являются тенсегрити-структурами (хотя и на разных размерных масштабах) (Fuller, 1975, 700.04).

К сожалению, у него была привычка делать громкие заявления, что часто отодвигало на второй план нюансы, которые пытался донести; в результате этот сверхсмелый и амбициозный тезис у многих вызвал скепсис и сомнения. Если тенсегрити встречается повсюду, то какой смысл воспринимать ее как нечто особенное?

В этом возражении есть рациональное зерно, но оно не учитывает основного посыла Фуллера о том, что окружающий нас мир соткан из противодействия разных масштабов материи, которые тем не менее каким-то образом объединяются в относительно устойчивые паттерны и структуры. Именно в причинах этой устойчивости в динамическом мире он и пытался разобраться через понятия синергии и тенсегрити.

Мы постараемся ответить на этот вопрос более подробно, рассмотрев огромный диапазон размеров и масштабов, которые существуют в физическом мире, от уровня субатомных частиц до всей Вселенной. При этом мы постараемся найти золотую середину и будем оценивать утверждения Фуллера в соответствии с более взвешенной точкой зрения, которая придерживается некоторой промежуточной позиции (Noble, 2017).

Мы не можем не признать того, что мир соткан из противоречий. С одной стороны, мы наблюдаем и ощущаем реальность твердых объектов, и разноуровневых взаимодействий между ними. Но, с другой стороны, из физики мы знаем, что атомы, из которых они состоят, в основном являются пустым пространством; то есть, хотя мы и не можем непосредственно видеть и ощущать силы, действующие внутри атомов, однако мы точно знаем, что они там есть!

То есть, по сути, различие между тем, что мы называем сплошным и пустым», не является чем-то единственным, однозначным и навсегда заданным, а определяется исключительно той системой отсчета, которую мы выбираем для анализа. Гениальность Фуллера заключалась в том, что он предложил собственное понимание того, как работают эти силы. Если классическая физика берет за систему отсчета понятие энергии, то Фуллер предложил понятие синергии и тенсегрити как ее архитектуры в материале

В его трактовке все природные структуры синергетичны и соответствуют одним и тем же основным правилам. Фуллер исходил из того, что именно внутренний баланс запертых сил удерживает их вместе (Fuller, 1975, 641.00). Атомы образуют кристаллы и молекулы и связаны друг с другом силами притяжения и отталкивания, благодаря чему они сами по себе являются тенсегрити-структурой на соответствующем масштабе (Edwards et al., 2012; Reilly & Ingber, 2018), но это совсем не означает, что абсолютно любой объект — это тенсегрити-структура. И что, к примеру, дверной косяк нам также следует рассматривать в этом качестве. Подход Фуллера акцентирует фундаментальную разницу физической сущности естественных и инженерно спроектированных, искусственных (рукотворных) материальных систем. Дверной проем, здание, пластиковая ложка — это структуры, которые собраны вместе за счет направленного вливания



дополнительной энергии извне и за счет внешнего инженерного интеллекта: они не синергетичны, поскольку не были образованы в процессах естественной самоорганизации.

Он акцентирует, что принцип синергетики и тенсегрити применим только к природным, естественно эмерджентным, самоорганизующимся структурам. По его мнению, вся наука исторически пошла по неверному пути, взяв за систему отсчета примитивные рукодельные структуры, изготовленные человеком «по линейке» и пытаясь засунуть физику естественного в это квадратное ложе.

При этом традиция естественных наук пошла по пути акцентирования материалов — из чего сделано, а не через фокус на том, как возникло. Привычный акцент на «из каких материалов состоит», разделяющий в первую очередь неживое и живое, приравнивает между собой как неживые естественные, так и неживые инженерные структуры. Поскольку инженерно-спроектированные и сделанные, а также инженерно-извлеченные материалы, отделенные и от их естественной структуры, и от контекста, намного удобнее изучать, то именно на этом сосредоточились так называемые естественные науки. Хотя на самом деле в понимании Фуллера в современных экспериментальных науках ничего собственно естественного не осталось — только инженерное.

Его подход обратный. Сначала мы должны понять физику естественного в ее естественных самоорганизующихся проявлениях, а потом учиться у нее в нашем инженерно-рукодельном деле.

Главные физические принципы запертых сил можно проиллюстрировать с помощью тенсегрити-моделирования, использующего тросы и распорки для отображения двух типов внутренних сил: притяжения (натяжения) и отталкивания (сжатия) соответственно. При этом каждый из этих компонентов несет лишь один тип нагрузки: тросы — натяжения, а стержни/распорки — сжатия (Fuller, 1975, 720.00; Edmondson, 2007, с. 259) (рис. 3.1).

Тенсегрити-моделирование наглядно иллюстрирует основные принципы синергетической геометрии Фуллера.

В них силовые линии являются геодезическими, поскольку силы между структурными элементами передаются по кратчайшему пути взаимодействия. Они плотно упакованы, потому что их составные части сами по себе автоматически приближаются друг к другу настолько близко, насколько это возможно. И они естественным образом сбалансированы в простейшем состоянии с минимальной энергией. Тенсегрити-модели редуцируют внутреннее строение до его самой простой формы, где модели «стержни-и-струны» отображают динамическое поведение внутренних (но невидимых) векторов сил, действующих внутри них (Heartney, 2009). Это делает возможным бесконечное число сложных конфигураций, при этом все они могут быть получены из одной модели: призмы Т3 (Pugh, 1976; Vansod et al., 2014; Vansod & Burša, 2014).

*Главное состоит в том, что спирали две (право- или левосторонняя ориентация). Если одну назвать левой, то другая правая. Это и есть так называемое стандартное соглашение. Но главное не в названии «L» и «R», а в сути — в том, что эти спирали фундаментально различны*

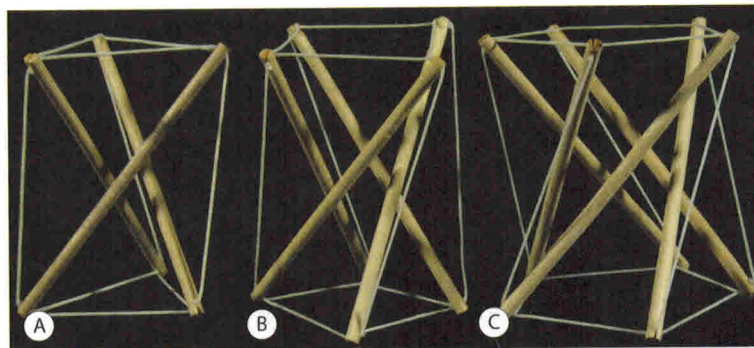


Рис. 3.1. Простые модели тенсегрити. (А) Т3-призма. (В) Т4-призма. (С) Т5-призма. Все они здесь показаны с правосторонним скручиванием — выбор отсчета как лево- и/или правостороннего определяется стандартным соглашением. (© Рори Джеймс)



и не переводятся друг в друга никакими преобразованиями. А значит, указывают на двоичность как на самый минималистический структурный принцип. И ни один элемент не остается в одиночестве сам по себе. Это и есть двоичная основа синергетики.

## ТЕНСЕГРИТИ-МОДЕЛИРОВАНИЕ

### Т-призмы

Наша задача состоит в том, чтобы проиллюстрировать различные комбинации и разнообразие тенсегрити-паттернов, но при этом необходимо быть осторожным и не скатываться в упрощения (кость как стержень, мышца как струна).

Может показаться, что призма Т3 — самая простая модель тенсегрити: три распорки скручены вокруг центральной оси, а треугольник из тросов соединяет их вместе на каждом конце (Castro-Arenas et al., 2016; Zhang et al., 2016) (рис. 3.1А). Эта призма первая в бесконечном ряду, который возникает при добавлении большего количества распорок. После Т3 этот ряд продолжают призма Т4, призма Т5 и т.д.

Название «призма» сложилось исторически, хотя и является очень неудачным для тенсегрити-структуры. В классической геометрии призма — это фигура, в которой левая и правая симметричны и могут быть преобразованы одно в другое, а значит, сущности неотличимы. В тенсегрити-геометрии Фуллера идентичность субэлементов присутствует с самого начала. Даже этот самый простой уровень так называемых т-призм уже является ориентированным, поскольку все они закручены либо в левую, либо в правую сторону, так называемая хиральность. Хиральность устанавливается по простой формуле (Кеннер, 2003, с. 8):

$$\text{Угол скручивания} = 90^\circ - 180^\circ / n, \text{ где } n = \text{количество распорок}$$

Таким образом, призма Т3 имеет скручивание  $30^\circ$  между своим верхним и нижним краями, а призма Т4 имеет скручивание  $45^\circ$  и т.д.

Примечательно, что внутренне стабильные и самоустойчивые наноструктуры ДНК могут быть легко смоделированы в геометрии Фуллера как простые призмы Т3 в сочетании с платоновскими формами Фуллера, способные самопроизвольно собираться *in vitro*, — открытие, которое потенциально может быть использовано в биоинженерии (Zhang et al., 2008; Liedl et al., 2010). Почему встроенная ориентированность тенсегрити-моделей так важна? Все достаточно просто. В структурах ДНК и других биологических молекулах мы наблюдаем спирально ориентированную структуру. Если спиральность первична в структурной геометрии природы, то для спирализации биомолекул это их естественный, встроенный шаг, то есть состояние самоорганизации с минимальными энергозатратами. Тенсегрити-модель отображает эту особенность, а значит, чувствует и предсказывает поведение биологической структуры.

В то время как стандартное моделирование сначала решает задачу как ортогональную, а уже потом вносит поправки на спирализацию как дополнительное условие, которое необходимо каждый раз вычислять и корректировать с энергозатратами и ошибками вместо следования естественному направлению. Чем больше шагов, тем выше энергоцена и тем сильнее накапливается ошибка и неопределенность.

Как всегда, в этой книге мы хотим обратить внимание читателя, что Фуллер называл Т3-призму тенсегрити-октаэдр (шесть узлов или вершин) (Fuller, 1975, 724.10), также она известна как треножник, симплекс и триплекс (Bansod & Burša, 2014), за которым следует квадруплекс

(Т4), пентаплекс (Т5) и гексаплекс (Т6) и т. д., при этом общие контуры т-призм фактически совпадают с контурами класса геометрических фигур, известных как *антипризмы!*

Т-призмы классифицируются как цилиндрические тенсегрити (Kenner, 2003, с. 8), поскольку они имеют одну ось симметрии вращения (аналогично тем распоркам и тросам, которые их образуют). Увеличение количества распорок заставляет их располагаться ближе к внешней стороне цилиндра и формировать трубчатую стенку, а когда они соединены друг с другом, они образуют последовательность и своего рода составную колонну или составной ряд — цепь, известную как т-спираль (рис. 3.2).

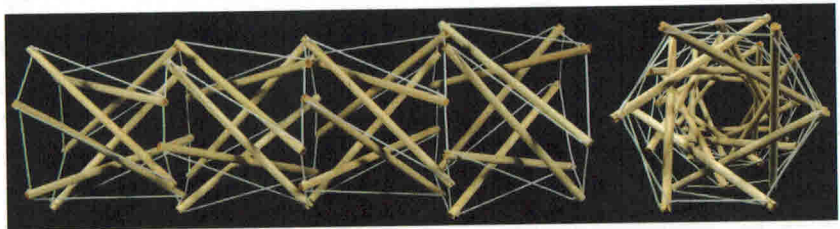


Рис. 3.2.  
Модульная цепь из четырех правосторонних т6-призм, образующих полую т-спираль. (© Рори Джеймс)

## Т-спираль

Тенсегрити-спирали отличаются от классических спиралей столь же сильно, как т-призмы от обычных геометрических призм. Т-спирали не являются непрерывными (в отличие от металлических пружин), они образуют трубки с отдельными модульными частями, как в живых, природных, естественных конструкциях. Именно это делает их более подходящими прообразами для моделирования биологических структур.

Тенсегрити-спираль в сравнении с твердотельной спиралью (металлические пружины) — это очень хорошая иллюстрация тех важнейших нюансов, которые и делают тенсегрити-подход предпочтительным в сравнении с классическим физико-математическим моделированием.

В тенсегрити-моделях каждый трос (струна) и распорка (стержень) также могут состоять из меньшей спирали и содержать части, которые сделаны из еще меньших спиралей в рамках структурной иерархии. Последовательные сегменты в тенсегрити-цепи могут иметь одинаковую или противоположную хиральность, и эти различия влияют на ее физические свойства таким образом, что т-спираль с сегментами одинаковой хиральности будет скручиваться при растяжении или сжатии, тогда как т-спираль с чередующимися хиральностями будет оказывать этому сопротивление.

На этом примере мы снова видим, как тенсегрити-подход позволяет нативно моделировать и понимать биологические структуры, поскольку биологические трубки ведут себя в природе именно таким образом. Двойственность динамического поведения и возможность эмерджентного переключения между режимами хиральной податливости и хиральной жесткости — это важнейшее свойство в функции биологических трубок (от масштаба анатомических мышц до масштаба внутриклеточных микротрубочек).

Геометрические и структурные связи между тетраспиралью (рис. 2.8), тенсегрити и сложными биологическими спиральями будут рассмотрены далее, в главе 6. Между тем призма-Т3 имеет еще одну хитрость про запас.

## Сфера-Т6, тенсегрити-икосаэдр

Эта т-форма (рис. 3.3) самая простая из *сферического* класса тенсегрити (Kenner, 2003, с. 11), но, несмотря на эту простоту, она получила два разных имени. Такая двойственность названий связана с тем,



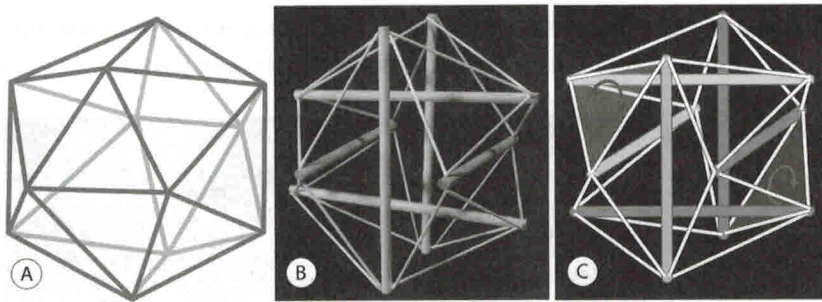


Рис. 3.3.

(А) Икосаэдр; (В) Т<sub>6</sub>-сфера или Т-икосаэдр. (© Рори Джеймс). (С) Группа из трех распорок (желтая), выделенная треугольником натяжения, образует правостороннее скручивание, хиральность (красная стрелка) и находится напротив группы с левосторонним скручиванием, хиральность (зеленая стрелка, если смотреть с другой стороны модели)

водит в заблуждение, когда речь идет о биологии. Интерпретация синергетической геометрии Фуллера дает нам совершенно другое, гораздо более тонкое и информативно заряженное смыслом понимание. Намного информативнее будет рассматривать шесть распорок в группах по три, где каждая распорка расположена под углом  $90^\circ$  по отношению к другим распоркам данной группы и образует одно хиральное скручивание, например левостороннее, а распорки противоположной группы имеют скручивание в другую сторону, например правостороннее (рис. 3.3С). (Fuller, 1975, 724.30). В этом случае треугольники натяжения, соединяющие концы распорок (узлы), демонстрируют две противостоящие группы, и таких групп четыре. Каждая из них сформирована из различных комбинаций распорок, балансирующих друг друга (Bansod et al., 2014; Fuller, 1975, 465.00). Таким образом, левосторонняя и правосторонняя хиральности (из которых, по сути, состоят пары Т<sub>3</sub>-призм) сбалансированы и связывают торсию спирали с всесторонней, всенаправленной (омнинаправленной) симметрией сферы, а ее множественные вложенные симметрии делают ее крайне полезной для создания еще более сложных биологических моделей (приложение 1).

На этом примере мы видим, как одно и то же внешнее наблюдение интерпретируется совершенно по-разному в классической и в синергетической геометриях. Чем более информационно насыщен и чем более внутренне структурно глубок интересующий нас объект физико-геометрического моделирования, чем важнее эти различия.

При анализе обычного твердого тела, в котором преобладает периодическая, информационно сжимаемая до простого алгоритма кристаллическая решетка, а динамическая глубина вырождается в аддитивное накопление сжатий, оба подхода (как классический, так и синергетический) могут быть приемлемы. Однако при исследовании биологических структур, не поддающихся информационной компрессии и внутренне безграничных, синергетическая геометрия намного более информативна, точна и внутренне содержательна, в то время как классическая геометрия не способна уловить эти более тонкие внутренние настройки.

Следует отметить, что сфера-Т<sub>6</sub> больше известна как *тенсегрити-икосаэдр* и *т-икос*, поскольку ее узлы почти соответствуют вершинам икосаэдра (Fuller, 1975, 724.20), хотя иногда ее называют *расширенным октаэдром* (Pugh, 1976, p. 26; Edmondson, 2007, с. 283) и *редуцированным кубоктаэдром*.

Причиной столь разных названий является то, что эта конкретная (жестко-струнная) модель тесно связана с икосаэдрической фазой фуллеровского колебательного джиттербага (рис. 2.18), где вся структура всенаправленно (omnidirectionally) сжимается в направлении октаэдрической фазы и расширяется в направлении векториального равновесия (рис. 3.4). (Fuller 1975, 724.32).

что все ее составные части расположены на одинаковом расстоянии вокруг центральной точки, что характерно как для икосаэдра, так и для сферы. Тенсегрити-модель демонстрирует три пары параллельных распорок. Если мы интерпретируем эту структуру классическим «кубическим» образом, то создается впечатление, что это три пары, подвешенные под углом  $90^\circ$  друг к другу и соответствующие трем осям кубической симметрии, как все канонические платоновы формы.

Однако это наблюдение вво-



и именно с этой точки зрения С. Левин (2002) писал о ее полезности в моделировании биологии. В икосаэдрической фазе фуллеровского джиттербага различные типы тенсегрители-организации (собственно т-икосаэдр; расширенный октаэдр и редуцированный сжатый кубоктаэдр) могут иметь узлы, которые *точно* совпадают с вершинами икосаэдра. Поскольку все эти варианты соответствуют вершинам икосаэдра, то т-икосаэдр и является наиболее подходящим (рис. 3.5А) (Edmondson, 2007, с. 280; Bansod & Burša, 2014; Pars, Online). Все они иллюстрируют то разнообразие возможностей, которое присуще тенсегрители-моделированию.

Такое одновременное существование целого ряда названий и форм выражения для внешне одной и той же т-структуры является плюсом синергетической геометрии, а не ее недостатком, поскольку указывает на многообразие вложенностей в тенсегрители-структурах и делает ее наиболее подходящей для моделирования биологических объектов и процессов благодаря заложенной в ней структурно-динамической глубине.

Таким образом, Т-икосаэдр был обобщен как «...идеальный баланс между сжатием и растяжением, равномерно растянутым вокруг сферической кривой; а сфера тенсегрители — это истинная эфемерная (виртуальная, пространственная) форма, являющаяся

визуальным отражением свойства динамической прочности, отличительной черты всей геодезической геометрии. Для Фуллера это было не чем иным, как идеальной демонстрацией оптимальной эффективности использования материалов, к которой должны стремиться технологии, создаваемые человеком» (DeVarco, 1998, Sec. IV).

## ПРОСТАЯ СЛОЖНОСТЬ ТЕНСЕГРИТИ ТЕНСЕГРИТИ-ВОПЛОЩЕНИЕ (МОДЕЛИРОВАНИЕ)

Тенсегрители-модели состоят лишь из двух структурно-динамических элементов — тросов и распорок (струн и стержней) и являются на удивление прочными и легкими для своего размера,

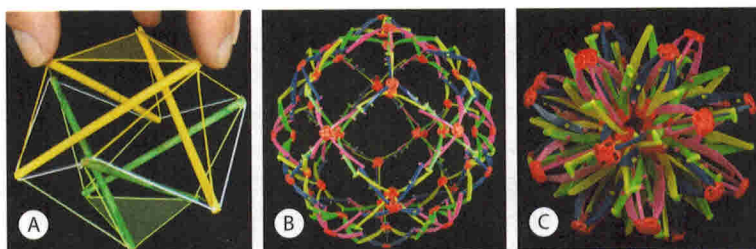


Рис. 3.4.

(А) Сдавливание противоположных треугольников натяжения т-икосаэдра (жесткая нить) навстречу другу вызывает сокращение всей структуры вокруг центральной точки (динамическое увеличение плотности упаковки) и демонстрирует колебательные особенности джиттербага (Castro-Arenas, et al., 2017).

(В и С) показывают аналогичное всенаправленное расширение и сжатие сферы Хобермана соответственно (Ingber, 2003). © Рори Джеймс

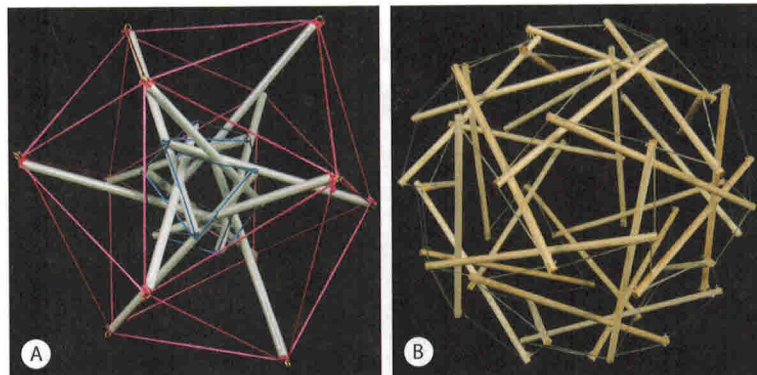


Рис. 3.5.

(А) Модель тенсегрители с 12 распорками (стержнями), где внешние узлы точно совпадают с вершинами классического платонова икосаэдра (выделено красным), а внутренние узлы соответствуют узлам вложенного в него Т-икосаэдра (синий) (Pars, Online). (В) Т30-икосаэдр раскрывает симметрию пятого порядка. © Рори Джеймс

# Неожиданные повороты, или чудеса на спиральных виражах

Может быть, природа и есть азартная вероятностная игра, но в этой игре природа явно тяготеет к игральным костям, уж очень часто выпадают ее любимые комбинации

Стивен М. Левин

**Ключевые моменты:** перекрестная спиральная механика, спиральная геометрия, мягкотканевый насос.

В предыдущей главе мы подробно разобрали истинную биомеханику цитоскелета. Цитоскелет является наиболее важной иллюстрацией биотенсегрити в действии, поскольку он четко отображает связь между структурой и функцией, и мы уже видели, что в основе его механики лежит интегрированная геометрия замкнутых кинематических цепей. Поскольку природа всегда стремится к тому, чтобы все делать наиболее эффективным образом, то неудивительно, что в биологии часто встречаются простые геометрические формы, повторяющие сами себя в разных масштабах. Одной из таких форм является спираль (Chouaieb et al., 2006) (рис. 6.1).

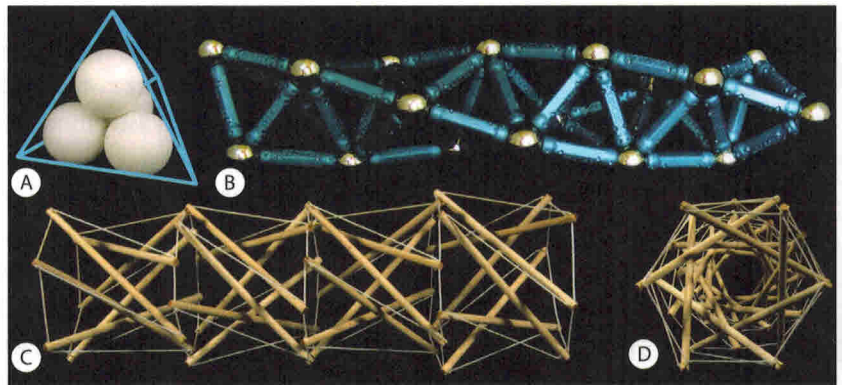


Рис. 6.1.

Модель для биологических спиралей. (A) Тетраэдр — это наименьший объем внутри единичной поверхности. (B) Тетраспираль с правым ходом. (C и D) Т6-спираль (вид сбоку и с конца). (© Рори Джеймс)

## СПИРАЛЬ

Тетраэдр — это энергоформа, представляющая собой наиболее выгодное соотношение между поверхностью и объемом (наименьший объем, заключаемый внутри данной единичной поверхности). У Фуллера ключевой самоорганизационный и самостабилизационный процесс максимальной «утрамбовки» внутреннего пространства, заключенного сферой происходит посредством тетраэдризации.

Тетраспираль Фуллера в классической математике сопоставляется с так называемой спиралью Бордейка — Коксетера. Опять, казалось бы, своим вниманием к тетраспирали ничего нового Фуллер не открывает, поскольку формальное математическое описание уже существует.

Но в очередной раз мы видим, как Фуллер вкладывает совершенно другой, намного более глубокий смысл и в эту геометроэнергоформу в том числе.



С одной стороны, тетраспираль как суперпозиция тетраэдров — это плотная упаковка в пространстве — грань к грани, а значит, тетраспирали в этом смысле эффективны.

Но, с другой стороны, они не обладают способностью полностью заполнить пространство сплошь и без зазоров (Lord & Ranganathan, 2001) (рис. 2.9).

Проблема ли это для Фуллера? Ни в коей мере. Наоборот!

В очередной раз стоит подчеркнуть, что общая плотность упаковки в пространстве геометрии Фуллера не тождественна максимальной плотности вещества. То, что внутри тетраспирали наличествует свободное пространство (см. рис. 6.1D), не проблема, а достоинство, поскольку создает возможности для разнообразия взаимодействий материи на разных масштабах (частотах).

Так, на примере тетраспирали Фуллер поднимает еще один провокационный вопрос. А почему в традиционной геометрии пространство либо пустое, либо полное? Разве в природе мы наблюдаем такую ровно закрашенную однородность? Нет! Фуллер сразу вкладывает встроенные зазоры в свою концепцию плотно упакованного пространства. По сути, это некий пространственный запас, свободная энергия, которая и создает запас эмерджентности при формировании более высоких масштабов, которые он называет частотами. Опять мы видим, как видимая слабость того, что плотная упаковка (геодезическая упаковка) у Фуллера не достигает предельной плотности, обращается в силу.

Благодаря такой энергогеометрической формулировке большинство (если не все) биомолекулярные спирали можно соотнести с тетраспиралью.

С одной стороны, в силу своего происхождения из сложения тетраэдров в геодезическую линию (комбинацию) она является самой простой из всех спиралей по форме. Иначе говоря, по принципу своего образования тетраспираль — это самая простая из спиралей с процессной точки зрения, поскольку не может быть ничего проще (наипростейшая в предельном смысле). Тетраэдр — это простейший элемент, сложение тетраэдров гранями друг к другу — это простейший процесс. Проще не бывает.

Но при этом, несмотря на предельную простоту своего формирования, тетраспираль внутренне сложна и уже содержит внутреннюю гетерархию благодаря трем своим подспиралям разного шага и хиральности.

Именно поэтому тетраспираль — это естественный кандидат на принцип самоорганизованного формообразования в природе. Можно сказать, что для биомолекулярных спиралей она является порождающей энергогеометроструктурой (рис. 6.2) (Lord, 2002).

При таком понимании даже двойная спираль ДНК может быть интерпретирована как тетраспираль, у которой отсутствует одна из длинных нитей (Fuller, 1975, 933.00; Sadoc & Rivier, 2000). Спираль является энергоэффективным решением

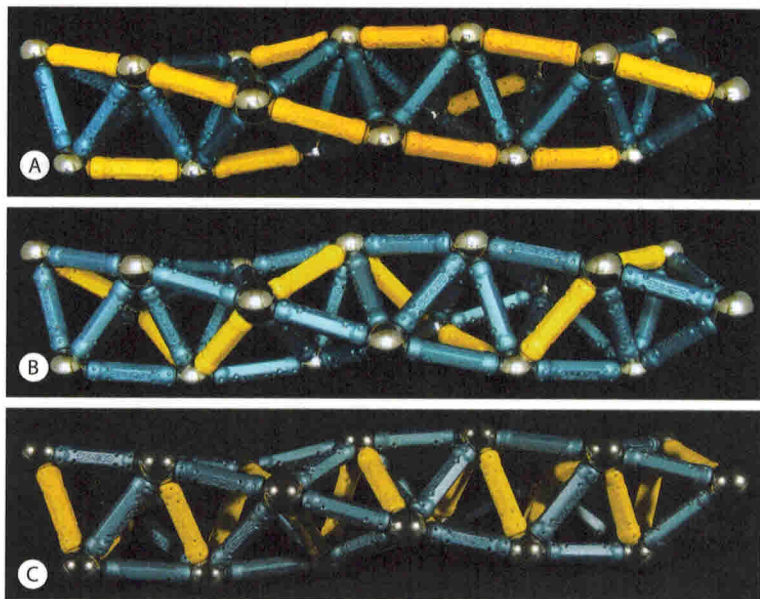


Рис. 6.2. Внутренняя вложенная гетерархия тетраспирали. «Наипростейшая» тетраспираль (с правым ходом) уже содержит три подспирали различной хиральности и шага (желтый). (А и С) С правым ходом; (В) С левым ходом



для молекулярной плотной упаковки и поэтому может считаться общим принципом построения в структуре белка (Snir & Kamien, 2005). Еще один важнейший структурный элемент в биологии — концентрические обмотки, например стенка сосуда, миелиновая оболочка и т.д. Их структурная организация также основана на энергогеометрии спирали (Galloway, 2002; Scarr, 2011; 2016a).

### Молекулярная спираль

Главное и очень распространенное заблуждение, касающееся биологических молекулярных спиралей, — это ошибочное их отождествление с металлическими пружинами. Несмотря на внешнее сходство винтовой формы, это совершенно различные структуры.

Металлические пружины непрерывны, в то время как биологические молекулярные спиральи модульны.

Именно модульность биологических спиралей делает тенсегрити-подход особенно продуктивным при их интерпретации и моделировании, поскольку тенсегрити-структуры тоже организованы по модульному принципу — из множества частей, соединенных вместе.

Еще одной причиной, по которой тенсегрити-моделирование биологических спиралей исключительно перспективно — это формирование внутренней групповой связности. На основании этих ключевых признаков имеет смысл говорить о биомакромолекулярных спиральных структурах, которые самопроизвольно объединяются в наиболее стабильные и энергоэффективные механизмы (рис. 3.8).

Большое количество спиральных молекул состоит из глобулярных белков, которые содержат внутри себя еще меньшие спирали, такие как G-актин и тубулин в цитоскелете (рис. 6.3). Такие спирали могут наматываться друг на друга, образуя сдвоенные суперспирали, которые либо меняют свою внутреннюю хиральность на каждом новом структурном уровне: с левого хода на правый и наоборот (Parry et al., 2008), либо дополнительно объединяются в более сложные гетерархические структуры

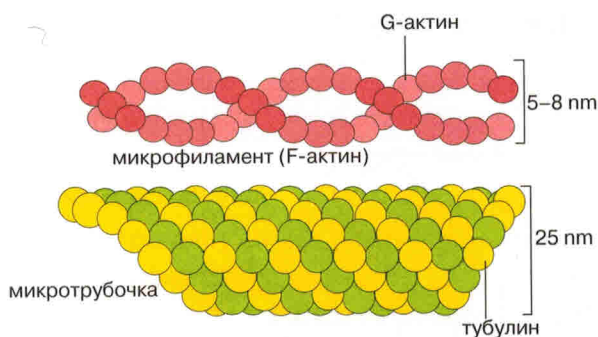


Рис. 6.3. Спиральные молекулы в клеточном цитоскелете. (Перерисовано с Scarr 2010; © Elsevier)

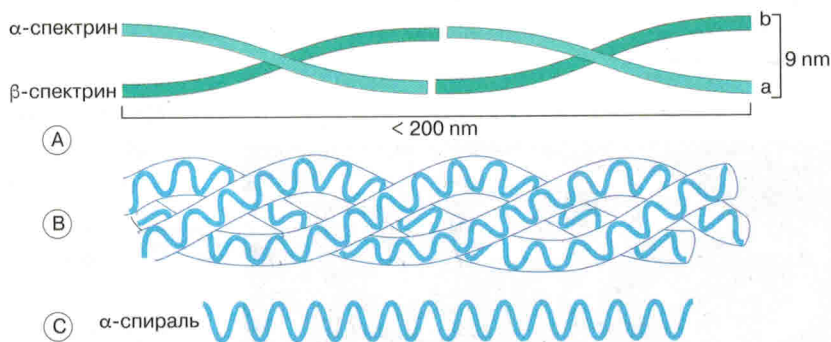


Рис. 6.4. Схематичная диаграмма гетерархии спектрина по уровням организации. (A) 1-й уровень. Спектриновая нить базово состоит из ряда тетрамеров, сделанных из димеров  $\alpha$ - и  $\beta$ -спектрина (правоориентированных). (B) 2-й уровень, вложенный. Каждый димер образован из серии (левоориентированных) сдвоенных и строенных двойных спиралей  $\alpha$ -спиралей спектрина (правоориентированных) (C). 3-й уровень.  $\alpha$ -спираль (правоориентированная) (Воспроизведено с изменениями из Scarr, 2010; © Elsevier)



со специализированными функциями, такие как промежуточные филаменты (кератин, виментин) в цитоскелете (Moll et al., 2008; Qin et al., 2009), хромосомная ДНК (Aranda-Anzaldo, 2016). Пример этого — нитчатый спектрин (рис. 6.4 и 5.3). Для нас наиболее интересным с точки зрения двигательной функции человека является то, что данный принцип суперспирализации рассматривается в волокнах коллагена, составляющих внеклеточный матрикс (ВКМ) (Fratzl, 2008).

## СЛОЖНЫЕ ГЕТЕРАРХИИ

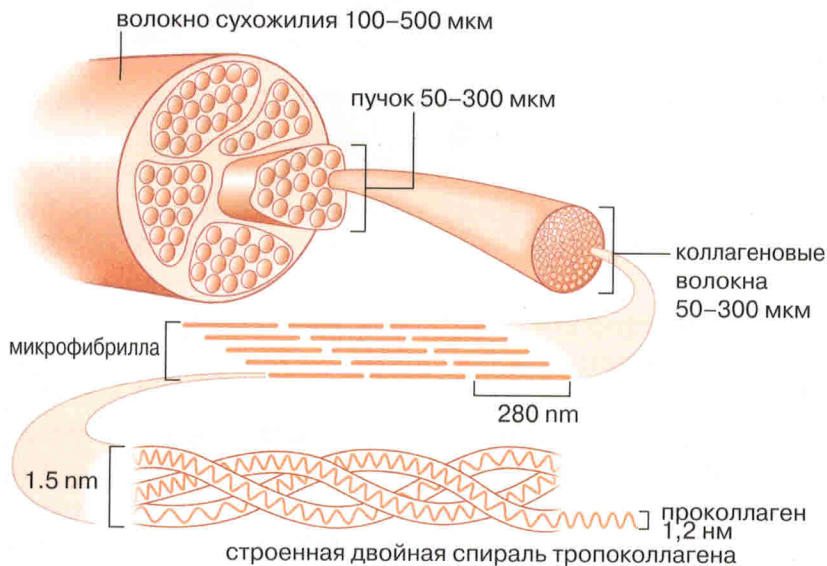


Рис. 6.5. Схематичная диаграмма коллагеновой гетерархии сухожилия. (Воспроизведено с изменениями из Scarr, 2010; © Elsevier)

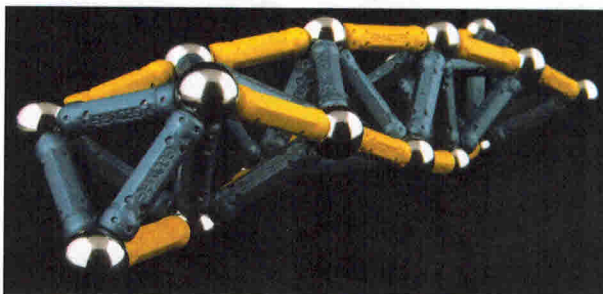


Рис. 6.6. Модель тетраспирального ядра тропоколлагена (желтые и синие соединения). Сферы (металлические шарики) иллюстрируют периодичность расположения атомов водорода глицина, которые выступают внутрь от трех окружающих молекул тропоколлагена (не показано). (© Рори Джеймс)

Коллагены, которые делятся на 28 различных типов, — наиболее распространенная структурная молекула в организме человека. Коллагены имеют сложную структурную организацию и являются одним из основных распределителей натяжения биологических тканей при передаче внешних сил и внутренних напряжений (Fratzl, 2008) (рис. 6.5).

Разложим гетерархические процессы в коллагене по уровням.

В коллагене типа I повторяющиеся последовательности аминокислот синергетически самоорганизуются и самопроизвольно образуют L-ориентированную спираль тропоколлагена. Потом

три из них объединяются в более высокий организационный уровень гетерархии, образуя R-ориентированную молекулу тропоколлагена (Kadler et al., 2008).

Затем они ступенчато укладываются друг на друга, образуя микрофибриллы, фибриллы и пучки во внеклеточном матриксе (ВКМ), костях, сухожилиях, связках и фасции.

Обратите внимание, что термины «микрофибрилла», «фибрилла» и «волокно» часто используются в литературе как взаимозаменяемые в зависимости от контекста. Коллагены также имеют сложные связи с другими молекулами, такими как протеогликаны и эластин (Theocharis et al., 2010), кристаллы гидроксиапатита в костях (Reznikov et al., 2014), в рыбьей чешуе и в кожном панцире (Zimmermann et al.,



2013), и влияют на механические свойства тканей более высокого порядка (Kabla & Mahadevan, 2006).

Коллаген также представляет интерес с геометрической точки зрения. L-закрученные молекулы проколлагена способны объединяться. Чтобы окружить центральное ядро молекулы тропоколлагена, необходимо объединить три молекулы проколлагена (рис. 6.2В).

Кроме того, каждая третья аминокислота в каждой из цепей проколлагена представляет собой глицин с атомом водорода, выступающим в центральное ядро сердцевины тропоколлагена, и поскольку цепи проколлагена расположены ступенчато, эти атомы водорода *точно* совпадают с тетраэдрическими вершинами правозакрученной тетраспирали. Таким образом, атомы в коллагене типа I образуют простой геометрический паттерн в более сложном квазикристаллическом порядке (Lord, 2002; Charvolin & Sados, 2012) (см. главу 10) (рис. 6.6).

Хотя тетраспираль является геометрическим шаблоном/порождающей энергогеометроструктурой для простых биологических спиралей, сочетание левой и правой закрученности значительно увеличивает ее функциональную многопрофильность (Parry et al., 2008; Qin et al., 2009). Левин подчеркнул важность такого одновременного сочетания обоих типов спиральной закрученности с помощью модели, цепи т-икосаэдров — скрещенной спиральной трубки, которая содержит обе хиральности (Levin, 1986; 2002) (рис. 6.7).

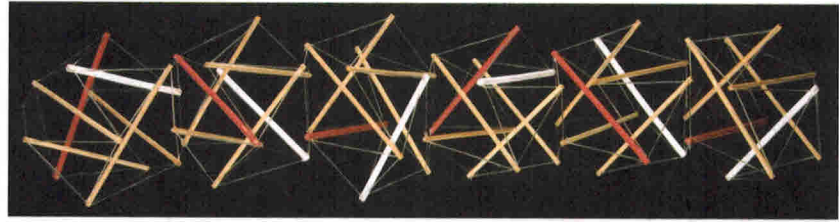


Рис. 6.7. Цепь т-икосаэдров, показывающая отдельные волокна лево и право закрученных (белая и красная, соответственно), которые вместе образуют скрещенную спиральную организацию. (© Рори Джеймс)

## ПЕРЕКРЕСТНЫЕ СПИРАЛЬНЫЕ АНАТОМИЧЕСКИЕ ТРУБКИ

Одна из важнейших функций коллагена заключается в спиральном усилении гибких полых трубок: стенок артерий (Holzapfel, 2006), желудочно-кишечного тракта (Zeng et al., 2003) и дыхательных путей (Carey, 1920). В этот список входят и межпозвоночные диски (Hukins & Meakin, 2000). Хотя, на первый взгляд, межпозвоночные диски сплошные, на самом деле их опорная функция вынесена на взаимодействие множества вложенных спиралей. Все эти анатомические структуры содержат концентрические слои волокон коллагена I типа, расположенные в чередующихся левозакрученных (против часовой стрелки) и правых (по часовой стрелке) спиральных. Наслоения взаимоперекрещенных спиральных волокон обеспечивают усиление стенок и плавность изгибания податливых анатомических

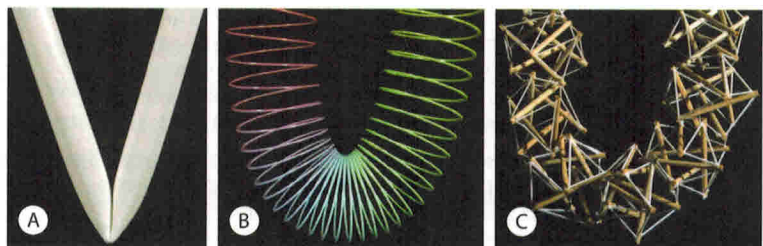


Рис. 6.8. Свойства материала стенки трубы влияют на ее способность изгибаться. Жесткая труба коллапсирует и почти перекрывает поток жидкости (А), в то время как спиральная пружина (В) и скрещенная спиральная тенсегрити (цепь т-икосаэдров) (С) сохраняют внутренние просветы и сохраняют поток жидкости. (© Рори Джеймс)



... идеальные геометрии ... пронизывают морфологию живых организмов, поскольку природа предпочитает наибольшую простоту как оптимальную репрезентацию сил.

Стивен Джей Гулд (Томпсон, 1961, с. XI)

**Ключевые моменты:** понятия «жесткий» и «мягкий» относительны, кинематика замкнутой цепи, терапевтическое прикосновение.

В этой главе мы продолжим использование наглядных анатомических примеров для иллюстрации того, как тенсегрити-моделирование (тенсегрити-подход) позволяет нам справиться с пониманием сложных функциональных взаимодействий и формообразования на примерах, которые вроде бы очень сильно отличаются друг от друга.

Объектами нашего рассмотрения в этой главе будут свод черепа, височно-нижнечелюстной сустав (ВНЧС) и легкое птицы. На первый взгляд, с точки зрения здравого смысла и биомеханики трудно представить более непохожие структуры. И тем не менее вы сможете убедиться в том, что тенсегрити-подход не только дает понимание каждой из них в отдельности, но и позволяет увидеть скрытые фундаментальные общие свойства между столь непохожими анатомическими формообразованиями.

В этой главе мы также продемонстрируем исключительную гибкость и адаптивность тенсегрити-подхода. Для каждой из этих структур тенсегрити позволяет подобрать свою наиболее подходящую модель, каждая из которых естественным образом вырастает из одних и тех же родовых черт тенсегрити. Выбор именно этих трудных примеров связан с тем, что все они на протяжении многих поколений оставались загадочными.

— Несмотря на то что череп был объектом самого пристального внимания анатомов, морфологов, эволюционистов и инженеров на протяжении тысяч лет, многие аспекты его формирования и развития на удивление плохо изучены.

— Что касается легкого птицы, то в этом примере самый загадочный момент — его исключительная механическая прочность, несмотря на то, что легкое с очевидностью состоит из мягких тканей (приложение 4).

— И наконец, выбор височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС), пожалуй, является наиболее очевидным в силу того, что разногласия, связанные с механикой ВНЧС, существуют уже более 100 лет.

В этой главе показано, как модель биотенсегрити помогает объяснить многие аспекты функционирования и формирования этих структур и способствует улучшению нашего понимания их функций.

## СВОД ЧЕРЕПА

Свод черепа представляет собой костный ансамбль верхней, задней и боковых сторон черепа и, по сути, огораживающих и защищающих мозг. Снизу от свода расположены кости основания черепа, а лицевой скелет находится спереди от него (рис. 8.1).

Исторически понимание развития черепа основывалось на двух основных идеях.



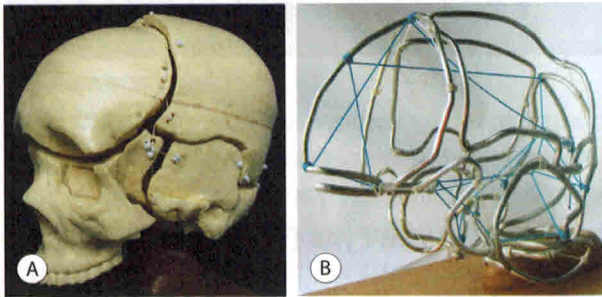


Рис. 8.1.  
Тенсегрити-модели свода черепа.  
(А) Кости в виде распорок и жесткий шнур, представляющий собой внутреннюю мембрану твердой мозговой оболочки. (В) Проволочные контуры костей свода черепа с дуральными пластинами серповидной складки и мозжечка, представленными синим шнуром. (© G. Scarr, любезно предоставлено Хелен Харрисон)

Теория выталкивания костей сейчас подвергается сомнению (Мао, 2005), а что касается подвижности собственно костей черепа, то многие практикующие мануальные терапевты и остеопаты уже давно указывают на наличие небольшого, но очень значимого запаса податливости между костями свода черепа. На этой предпосылке основаны диагностика и лечение широкого спектра состояний (Parsons & Mercer, 2006; Hamm, 2011; Seimetz et al., 2012; Kratz et al., 2017).

Таким образом, сложилась ситуация неопределенности, когда старые модели уже подвергаются обоснованному сомнению, но пока еще не сложилось нового более широкого и глубокого понимания.

Концепция биотенсегрити и тенсегрити-моделирования позволяет нам уверенно разрешить имеющиеся противоречия и неясности.

Хотя человеческий череп в классической анатомии обычно считается сплошной коробкой, в действительности в развертке развития он состоит из 23 костей, восемь из которых составляют свод черепа и остаются достаточно легко обнаруживаемыми на протяжении всей жизни (Sabini & Elkowitz, 2006). Пространства между костями (швы) заполняются фиброзной тканью (шовной связкой), а жесткая дуральная мембрана (твердая мозговая оболочка) выстилает внутренние поверхности свода и простирается вниз к основанию черепа.

Тенсегрити-моделирование черепа позволяет представить, каким образом на ранних мягких этапах может быть реализован совершенно другой механизм процесса расширения свода черепа вместо гидростатической модели физического выталкивания мягких хрящей быстро растущим мозгом в эмбриональном развитии. Почему это важно? Потому что переосмыслив понимание раннего периода развития черепа через тенсегрити-моделирование, мы сможем найти общий знаменатель, который одновременно позволит объяснить, каким образом сочленения костей черепа могут сохранять определенный запас податливости не только по окончании фазы быстрого роста мозга, но даже во взрослом возрасте (Cummings, 1994; Scarr, 2008).

Однако прежде чем углубляться в детали этой конкретной модели, стоит коротко взглянуть на лежащие в ее основе синергетические взаимодействия, которые по своей сути основаны на интерпретации сферы в синергогеометрии Фуллера (Fuller, 1975, 706.10).

Во-первых, основываясь на том факте, что во время своего развития растущий мозг расширяется, считалось, что именно он выталкивает кости свода черепа наружу, поскольку в эмбриогенезе они еще соединены мягкими хрящами, а значит, в этот «мягкий» период мозг как несжимаемая жидкость, еще способен их раздвигать. Этот подход можно назвать гидростатическим (основанным на идее несжимаемости жидкости).

Во-вторых, классическая анатомия настаивала на том, что по мере окостенения хрящей свод черепа заканчивает свой «мягкий» этап и переходит к «твердому» этапу, становясь по сути, единой костью без малейшей подвижности между элементами исходного костного ансамбля.

Однако на практике все оказалось сложнее.



## Геометрическая модель

Как мы уже видели в главе 2, в реальном мире не существует истинных сфер (это недостижимый математический идеал), но существуют реальные воплощения, которые к этому идеалу приближаются и стремятся.

Реальной материализацией, наиболее близкой к идеальной сфере, является высокочастотный икосаэдр — геодезический купол Фуллера (рис. 1.8). Это позволяет нам сделать первый шаг к пониманию того, какие внутренние силы энергетически взаимодействуют при формировании свода черепа. Дело в том, что всенаправленную омнисиметрию геодезического купола Фуллера можно смоделировать с помощью т-икосаэдра (рис. 8.2) и открыть дорогу ко второму шагу!

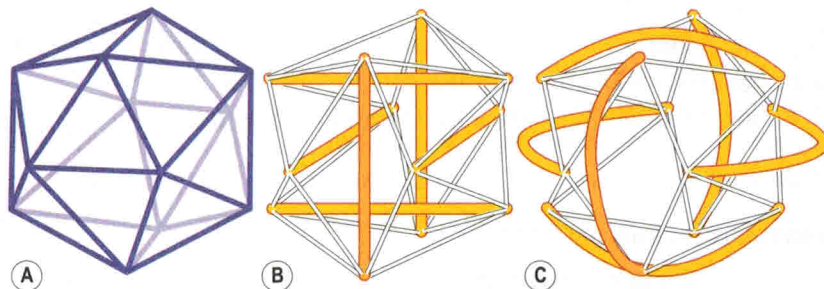


Рис. 8.2.

(А) Икосаэдр. (В) Т-икосаэдр с прямыми распорками (дальнейшее увеличение числа элементов — чисто техническое добавление их сочетаний). (С) Т-икосаэдр с изогнутыми распорками. (Воспроизведено с изменениями из Scarr, 2008; © Elsevier)

В тензегрити-моделировании важны именно балансы внутренних сил и их динамическое поведение, а не конкретные формы, которые принимает материал. Поэтому в т-модели (рис. 8.2) мы можем заменить уже привычные нам прямые распорки (стержни) на изогнутые, а также увеличить их ширину — сущностное содержание т-модели при таком изменении формы распорок не меняется!

Теперь третий шаг т-моделирования становится очевидным — мы завершаем превращение прямых распорок в изогнутые пластины, что дает нам возможность для т-моделирования свода черепа!

Несмотря на то что в действительности свод черепа состоит из большего количества костей, сущность динамического поведения т-модели проявляется уже при этом количестве костей.

Четвертый шаг — дальнейшее увеличение элементов в модели до полного соответствия анатомии — это чисто технический вопрос, поскольку принцип остается неизменным (лицевые кости, клиновидная кость и решетчатая кость на рис. 8.1А были смоделированы как единое целое в соотношении компактности).

## Преобразование прямых в кривые

Конечно же, внимательные читатели вспомнят главу 2, в которой упоминалось, что геодезические линии соединяют точки в пространстве по самому короткому пути (рис. 2.1). Однако школьный курс геометрии учит нас тому, что кратчайшее расстояние — это прямая линия. Поэтому такой читатель может задаться вопросом, откуда и почему внезапно появились все эти кривые при т-моделировании свода черепа. Имели ли мы право заменять прямые распорки на искривленные? Не происходит ли при такой замене потеря принципа максимального близкодействия?

На самом деле такая замена прямых на кривые в т-модели не только возможна, но и необходима потому, что в природе сущность геодезии — это не просто кратчайшее расстояние между точками, а именно кратчайший путь как движение по траектории наименьшего действия. Так, например, на поверхности Земли кратчайший путь — путь наименьшего действия — это именно



движение по кривой (по меридиану). Любые попытки спрямить этот путь, чтобы сократить геометрическое расстояние, приведут к тому, что действие перестанет быть наименьшим! (Вам придется «скрыть» излишки кривизны, затратив много энергии для того, чтобы добиться спрямления в реальном мире). В живой природе имеет смысл только энергогеометрический путь между соседними элементами, то есть наименьшее действие, а не абстрактная геометрия точек.

Поэтому моделирование динамических взаимодействий в своде черепа через т-кривые как раз и является отображением минимального действия — наименьших энергогеометрических расстояний/ кратчайших путей.

В следующей главе этой книги мы развернем эту тему еще подробнее.

### Анатомические основы

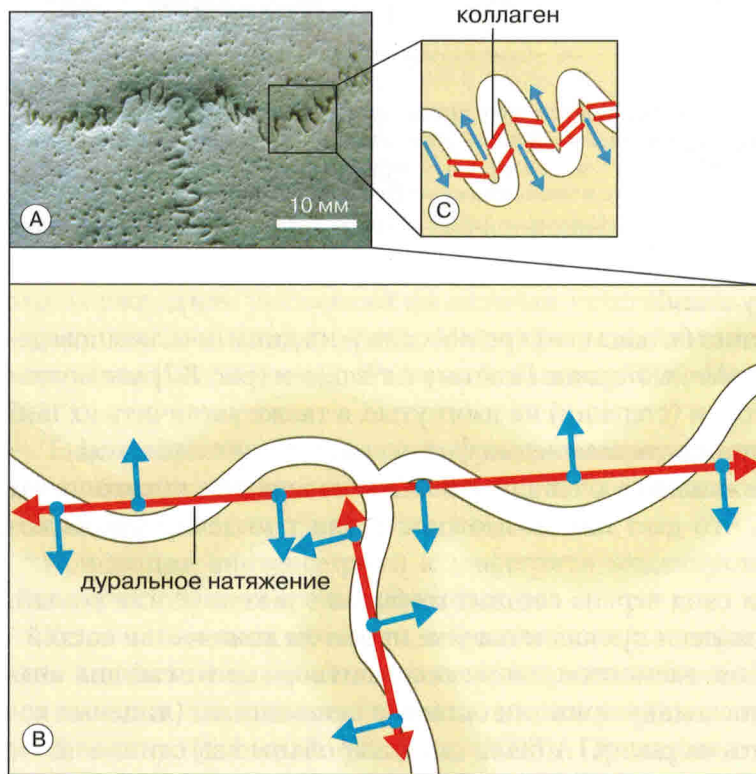


Рис. 8.3.

(А) Вид на соединение сагиттального и венечного швов на вершине черепа (брегма) (номинальная форма 1-го порядка), показывающий как волнистость (плавные изгибы — волнистость — формы 2-го порядка), так и мелкие зазубренные смыкания (формы 3-го порядка — зазубренность). (В) Схема внутренних волнистых костных поверхностей 2-го порядка, показывающих, как первичное натяжение дуральной мембраны (красные стрелки), взаимодействуя с костными изгибами 2-го порядка, приводит к вторичному межшовному разделению костей посредством натяжения (синие стрелки). (С) Расположение коллагена внутри мелкозазубренных швов 3-го порядка. Вторичное натяжение, соответствующее силе раздвижения костей на масштабе плавных изгибов (синие стрелки), создает третичное натяжение на уровне коллагена внутри мелкозазубренных швов 3-го порядка (красные отрезки). (Воспроизведено с изменениями из Scarr, 2008; © Elsevier).

Прежде чем переходить к непосредственному рассмотрению морфологии костей и соединительнотканых мембран черепа и мозговых оболочек, необходимо сказать несколько слов о более общем подходе к топографии вложенных поверхностей и объемов разного масштаба.

Минимально необходимой энергогеометрической связкой для понимания их взаимодействия является триада масштабов (Nominal shape/waviness/roughness), отличающихся друг от друга как минимум в 10 раз (на один порядок). Эти масштабы вложены друг в друга в единой самоорганизующейся системе. Проиллюстрируем эту вложенность на примере анатомии свода черепа.

Первый уровень — номинальная форма (nominal shape) — это общая кривизна свода черепа в целом (масштаб: десятки сантиметров, дециметры).

Второй уровень — вложенный в первый — это волнистость (waviness), плавные изгибы швов в масштабе от 1 до нескольких сантиметров.

Третий уровень — зазубренность (roughness) — это самые мелкие, резкие изгибы в масштабе от 1 до нескольких миллиметров.

Таким образом, в тенсегрити-модели изменения роста костей черепа мы должны отобразить все три уровня вложенности и их взаимосвязь друг с другом.



### Примечание редактора

Возвращаясь к биологии, начнем с уточнения основных понятий. Традиционно в русском языке *dura mater* — это твердая мозговая оболочка. К сожалению, сам термин «оболочка» уже содержательно подразумевает «огибание, описывание формы чего-то», создавая ощущение подчиненного структурного статуса. На самом деле намного более информативно понятие «твердая мозговая мембрана», или, говоря шире, дуральная мембрана.

Перейдем к анатомическим основаниям т-модели развития свода черепа. Как оказывается, у детей наиболее плотные и прочные крепления твердой мозговой мембраны именно по краям кости. Такое крепление создает четко выраженные вектора нагрузок внутри черепа, которые влияют на его рост. В нашей тенсегрити-модели это соотношение отображается через закрепление тенсегрити-тросов, соединяющих распорки, по краям кости. Так создается натяжная перемычка, которая соединяет все выпуклые компоненты изгибов шва в общую силовую линию (рис. 8.3).

Иначе говоря, внутренняя дуральная мембрана создает вектор натяжения, который вытुकло ориентирует весь шов в целом (номинальная форма) независимо от его вложенных изгибов (волнистость и зазубренность). Это приводит к тому, что кости подвергаются раздвижению перпендикулярно линии натяжения. Этот эффект усиливается благодаря тому, что волокна коллагена в более мелких зазубренностях ориентированы таким образом, что они создают дополнительный растягивающий эффект (Jasinowski et al., 2010; Zhang & Tang, 2015).

В силу такой многоуровневой зазубренности большие и малые шовные кривые связаны друг с другом отношениями фрактального подобия, то есть они геометрически связаны между собой и самоподобны в масштабах разного порядка (Yu et al., 2003) (рис. 3.9). Наличие фрактальности в организации швов черепа указывает на наличие еще более тонких настроек в регуляции зависимости между распределениями натяжений через мембраны и морфологией костей черепа. Однако пока что мы не будем углубляться в эти нюансы, а сосредоточимся на том, как наша основная тенсегрити-модель соотносится с реальностью. Для этого нам необходимо подробнее рассмотреть наиболее важные моменты, лежащие в ее основе физиологии, начиная с ранних этапов эмбриональной фазы развития.

### Эмбриональное развитие

Принципиально важен тот факт, что формирование костей свода черепа проходит через несколько этапов.

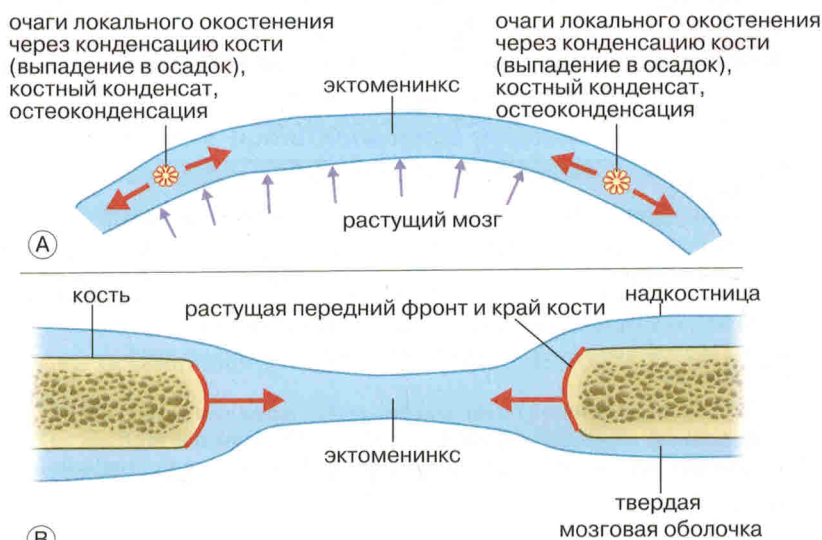


Рис. 8.4.

(А) Растущий мозг первоначально давит на мембрану эктоменинка (фиолетовые стрелки), в которой возникает внутреннее натяжение, приводящее к появлению очагов концентрации нагрузки и запуску процесса локального окостенения.

(В) Процесс окостенения внутри эктоменинка продолжается (красные стрелки), постепенно оформляя его дифференциацию на три слоя: внешний надкостничный, собственно костный, внутренняя дуральная мембрана твердой мозговой оболочки.