



НИЛ ШУБИН

ВНУТРЕННЯЯ РЫБА

История человеческого тела с древнейших
времен до наших дней



СЕРИЯ ЭЛЕМЕНТЫ.

Annotation

Почему мы выглядим так, как выглядим? Что общего между человеческими руками и, допустим, крылышками бабочки? И как связаны между собой волосы, молочные железы и сложное устройство нашего уха? Эти вопросы только кажутся праздными — на деле ответы на них позволят нам лучше понять строение человеческого организма, а значит, найти причину его слабостей и болезней. Нил Шубин, профессор анатомии, известный палеонтолог и один из первооткрывателей легендарного тиктаалика (промежуточного звена между рыбами и наземными животными), предлагает читателю совершить увлекательное путешествие к истокам эволюции и посмотреть, как на протяжении трех с половиной миллиардов лет формировалось и совершенствовалось наше тело.

- [Внутренняя рыба. История человеческого тела с древнейших времен до наших дней.](#)
 -
 - [Предисловие](#)
 - [Глава 1. В поисках нашей внутренней рыбы.](#)
 -
 - [Добываем ископаемые — видим самих себя](#)
 - [Глава 2. Откуда такая хватка.](#)
 -
 - [Обратимся к рыбам](#)
 - [Открытие пальцев и запястий рыб](#)
 - [Глава 3. Ручные гены.](#)
 -
 - [Создавая руки](#)
 - [Рецепт на ДНК](#)
 - [Дадим акуле руку](#)
 - [Глава 4. Повсюду зубы.](#)
 -
 - [Зубы и кости — что крепче?](#)
 - [Зубы, железы и перья](#)
 - [Глава 5. Включи голову.](#)
 -

- [Беспорядок в головах](#)
- [Суть в эмбрионах](#)
- [Внутренняя акула](#)
- [Гены жаберных дуг](#)
- [Идем по головам: от безголовых морских чудищ до наших головастых предков](#)
- [Глава 6. Лучший план тела.](#)
 -
 - [Общий план: сравним эмбрионы](#)
 - [Эксперименты с эмбрионами](#)
 - [О мухах и людях](#)
 - [ДНК и организатор](#)
 - [Внутренняя актиния](#)
- [Глава 7. Приключения с бодибилдингом.](#)
 -
 - [Поиск доказательств: где тело?](#)
 - [В поисках тела](#)
 - [Тело как улика](#)
 - [Бодибилдинг для капель](#)
 - [Происхождение тел как "идеальный шторм"](#)
- [Глава 8. Курс на запах.](#)
- [Глава 9. Зрение.](#)
 -
 - [Молекулы — светоуловители](#)
 - [Ткани](#)
 - [Гены](#)
- [Глава 10. Уши.](#)
 -
 - [Среднее ухо — три слуховые косточки](#)
 - [Внутреннее ухо — движение желе и колебание волосков](#)
 - [Медузы и происхождение глаз и ушей](#)
- [Глава 11 Что все это значит](#)
 - [Внутренний зоопарк](#)
 - [Еще одна прогулка по зоопарку — на сей раз подольше](#)
 - [Как история нас достает](#)
 - [Наследие охотников и собирателей: ожирение, сердечные заболевания и геморрой](#)
 - [Наследие приматов: речь достается недешево](#)
 - [Наследие рыб и головастиков: икота](#)

- [Наследие акул: грыжи](#)
 - [Наследие микробов: митохондриальные заболевания](#)
 - [Послесловие](#)
 - [Примечания, первоисточники и рекомендуемая литература](#)
 -
 - [Глава 1. В поисках нашей внутренней рыбы](#)
 - [Глава 2. Откуда такая хватка](#)
 - [Глава 3. Ручные гены](#)
 - [Глава 4. Повсюду зубы](#)
 - [Глава 5. Включи голову](#)
 - [Глава 6. Лучший план тела](#)
 - [Глава 7. Приключения с бодибилдингом](#)
 - [Глава 8. Курс на запах](#)
 - [Глава 9. Зрение](#)
 - [Глава 10. Уши](#)
 - [Глава 11. Что все это значит](#)
 - [Интернет-ресурсы](#)
 - [Благодарности](#)
 - [notes](#)
 - [1](#)
 - [2](#)
 - [3](#)
 - [4](#)
 - [5](#)
-

Внутренняя рыба. История человеческого тела с древнейших времен до наших дней.

Neil Shubin — Your inner fish: A Journey into the 3.5-Billion-Year History of the Human Body

Издание осуществлено при поддержке Фонда некоммерческих программ Дмитрия Зимина "Династия" Художественное оформление и макет Андрея Бондаренко

Фонд некоммерческих программ "Династия" основан в 2002 году Дмитрием Борисовичем Зиминим, почетным президентом компании "Вымпелком". Приоритетные направления деятельности Фонда — развитие фундаментальной науки и образования в России, популяризация науки и просвещения. В рамках программы по популяризации науки Фондом запущено несколько проектов. В их числе — сайт elementy.ru, ставший одним из ведущих в русскоязычном интернете тематических ресурсов, а также проект "Библиотека "Династии" — издание современных научно-популярных книг, тщательно отобранных экспертами-учеными. Книга, которую вы держите в руках, выпущена в рамках этого проекта.

Более подробную информацию о Фонде "Династия" вы найдете по адресу

www.dynastyfdn.ru.

Посвящается Мишель

Предисловие

Эта книга появилась в результате одного необычного для меня обстоятельства. Из Медицинской школы Чикагского университета ушли некоторые преподаватели, из-за чего мне пришлось вести у студентов-медиков анатомию человека. На занятиях по этому предмету нервные первокурсники вскрывают трупы, параллельно заучивая названия и строение большинства органов, естественных отверстий, нервов и сосудов человеческого тела. Этот курс вводит студентов в мир медицины, дает им опыт, без которого нельзя стать врачом. На первый взгляд, сложно представить худшего кандидата на должность наставника нового поколения врачей: по специальности я палеонтолог и занимался в основном изучением ископаемых рыб.

Но, оказывается, быть палеонтологом очень полезно для преподавания анатомии человека. Почему? Лучшая карта человеческого тела — в телах других животных. Простейший способ дать студентам представление о нервах в голове человека состоит в том, чтобы показать им, как устроены нервы акул. Легчайшая дорога к познанию наших конечностей — изучение рыб. Рептилии очень помогают разобраться в строении мозга. И все это потому, что тела этих существ часто представляют собой упрощенные версии наших собственных тел.

В ходе летней экспедиции в Арктику на втором году моего преподавания этого курса нам с коллегами посчастливилось найти ископаемую рыбу, открытие которой пролило немало света на выход позвоночных на сушу, совершившийся более 375 миллионов лет назад. Эта находка вместе с моим вторжением в область человеческой анатомии пробудила во мне желание разобраться в глубинной связи, существующей между двумя этими объектами. Так и возникла эта книга.

Глава 1. В поисках нашей внутренней рыбы.

С тех пор как я стал взрослым, мое лето обычно проходит среди снега и слякоти далеко к северу от полярного круга за раскалыванием камней. Большую часть времени я мерзну, натираю мозоли и не нахожу ровным счетом ничего. Но если немного повезет, мне попадаются кости древних рыб. Так себе сокровище для большинства людей, для меня они — дороже золота.

Кости древних рыб помогают понять, кто мы и как мы стали собой. Мы можем узнать что-то новое о нашем собственном теле из самых странных на первый взгляд источников — начиная от ископаемых червей и рыб, которых можно обнаружить в камнях по всему свету, и мира ДНК и заканчивая в сущности каждым животным, населяющим сегодня нашу планету. Но сначала необходимо объяснить, почему я так уверен, будто скелетные остатки былых времен — а именно остатки рыб — дают нам ключи к познанию основ строения нашего тела.

Как можем мы представить события, происходившие миллионы, а во многих случаях и миллиарды лет назад? К сожалению, нельзя расспросить очевидцев — никого из нас не было тогда на свете. Большую часть времени не было не только ни одного говорящего существа, но и ни одного существа, которое имело бы рот и даже голову. Хуже того, животные, которые жили в те времена, умерли и погребены так давно, что от тел лишь немногих из них вообще хоть что-то осталось. Если задуматься о том, что более 99% всех когда-либо живших видов к настоящему времени вымерло, что лишь очень малая их доля сохранилась в ископаемом виде и что еще меньшую долю от этой доли удастся найти, то может показаться, что любые попытки познать наше прошлое изначально обречены на провал.

Добываем ископаемые — видим самих себя

Впервые я увидел одну из тех рыб, что сохранились внутри нас, снежным июльским днем, исследуя породы возрастом 375 миллионов лет на острове Элсмир, около 80° северной широты. Вместе с коллегами я добрался до этого далекого безлюдного острова, чтобы обнаружить одну из ключевых стадий перехода от рыб к наземным животным. Из скалы торчала рыба голова — и не просто голова, а удивительно плоская. Едва увидев ее, мы поняли, что нашли что-то важное. Если внутри каменного склона нам удастся отыскать другие части скелета этой рыбы, они откроют нам тайны ранних стадий развития нашего черепа, нашей шеи и даже наших конечностей.

Что эта плоская голова сообщала нам о выходе рыб на сушу? Или, если говорить о моих собственных безопасности и комфорте, почему я был в Арктике, а не на Гавайях? Ответить на эти вопросы можно лишь рассказав о том, как мы находим древние ископаемые остатки и как используем их, чтобы разобраться в нашем прошлом.

Ископаемые остатки — один из важнейших источников данных, позволяющих нам познать самих себя. Другие источники подобной информации — гены и зародыши, о них речь пойдет позже. Но немногие знают, что поиск ископаемых — довольно точная наука и мы нередко можем предсказать, что и где обнаружим. В городе мы работаем над тем, чтобы в поле у нас были максимальные шансы преуспеть. А затем полагаемся на удачу.

Это парадоксальное соотношение расчета и случая лучше всех охарактеризовал Дуайт Эйзенхауэр в известном изречении: "Готовясь к сражениям, я всегда убеждался, что планы бесполезны, но планировать необходимо". Эти слова как нельзя лучше выражают суть полевой работы палеонтологов. Мы делаем всевозможные расчеты, как добраться до многообещающих местонахождений ископаемых, но, когда мы прибываем на место, оказывается, что все наши планы полевых исследований можно спокойно выбросить на свалку. Приземленные факты меняют самые блестящие расчеты.

Но все же мы можем задумывать экспедиции с целью ответить на конкретные научные вопросы. Исходя из нескольких простых идей, о которых я расскажу ниже, мы можем предсказывать, где можно обнаружить важные ископаемые остатки. Конечно, у нас никогда нет

сто процентной гарантии успеха, но, если повезет, можно найти что-то по-настоящему интересное. Вся моя научная карьера была построена именно на этом: я искал древних млекопитающих, чтобы узнать о происхождении млекопитающих, древнейших лягушек, чтобы узнать о происхождении лягушек, и некоторых из древнейших четвероногих, чтобы узнать о выходе рыб на сушу.

В наши дни обнаруживать новые местонахождения стало значительно проще, чем прежде. Благодаря геологическим исследованиям, проводимым местными властями и нефтегазовыми компаниями, нам стало больше известно о геологии многих районов. Интернет дает возможность оперативно работать с картами, данными аэрофотосъемки и материалами различных исследований. Где бы вы ни жили, сегодня я, не вставая из-за ноутбука, могу определить, есть ли перспективные места для поиска ископаемых у вас во дворе. Наконец, компьютерные методы построения изображений вместе с радиографическими устройствами позволяют нам видеть некоторые породы насквозь и изучать заключенные в них кости.

Но, несмотря на все эти достижения, охота за ценными ископаемыми во многом осталась такой же, какой она была лет сто назад. Палеонтологам по-прежнему приходится изучать горные породы, в буквальном смысле ползая по ним, и нередко вручную извлекать скрытые в них ископаемые остатки. Разыскивая и добывая такие остатки, нам приходится на месте принимать так много решений, что эти процессы по-прежнему сложно автоматизировать. Кроме того, смотреть в поисках ископаемых на экран монитора — занятие далеко не такое увлекательное, как своими руками добывать их в природе.

Занятие это хитрое, потому что местонахождения ископаемых довольно редки. Чтобы шансы на успех были максимальны, нам нужно, чтобы сошлись три фактора. Мы ищем такие места, где залегают породы определенного возраста и определенного типа, которые могут содержать ископаемые остатки древних животных, и где эти породы выходят на поверхность земли. Есть и четвертый фактор — везение. Это я покажу на примере.

Этот пример — один из важнейших переходных этапов в истории жизни на Земле — выхода позвоночных на сушу. Четыре миллиарда лет назад все живое обитало только в воде. Затем, около 400 миллионов лет назад, живые существа начали осваивать сушу. Для жизни в этих двух средах требуется разное. Для дыхания в воде требуются совсем не такие органы, как для дыхания на суше. То же относится к выделению,

питанию и передвижению. Чтобы выйти на сушу, живым организмам понадобилось радикально перестроить свое тело. Граница между водной и наземной средой кажется на первый взгляд почти непреодолимой. Но научные факты позволяют увидеть эту проблему в другом свете. То, что могло показаться невозможным, случилось на самом деле.

В наших поисках горных пород определенной эпохи нам помогает одно примечательное обстоятельство. Ископаемые остатки в породах Земли распределены далеко не случайным образом. Местоположение содержащих такие остатки пород и характер этих остатков — все это подчиняется строгим правилам, и мы можем использовать эти правила, планируя свои экспедиции. Менявшийся за миллиарды лет облик Земли оставил следы в виде последовательности из множества различных слоев горных пород. Легко проверяемое рабочее предположение, из которого мы исходим, состоит в том, что слои, расположенные ближе к поверхности земли, моложе слоев, залегающих глубже. Обычно так и бывает в районах, где слои залегают ровно, образуя что-то вроде слоеного торта (например, Большой каньон). Но движения земной коры приводят к появлению разломов, которые меняют взаимное расположение слоев, иногда переворачивая их так, что более древние оказываются над более молодыми. К счастью, если разобраться, как именно прошел тот или иной разлом, нередко первоначальную последовательность слоев можно восстановить.

Заключенные в этих породах ископаемые также соответствуют определенной последовательности. В нижних слоях захоронены совсем не те виды ископаемых, что в верхних слоях. Если бы мы могли добыть единую колонку из горных пород, отложенных за все этапы истории Земли, перед нами предстало бы необычайное разнообразие ископаемых остатков. В самых нижних слоях видимых свидетельств существования жизни было бы немного. В более высоких наблюдались бы отпечатки самых разных животных с мягким телом — вроде медуз. Еще выше залегали бы слои с остатками скелетных организмов, у которых были различные придатки и другие органы — например глаза. Над ними лежали бы слои с первыми позвоночными животными. И так далее. Слои с древнейшими людьми залегали бы намного выше. Разумеется, единой колонки из пород, отложенных за все этапы истории Земли, не существует. В каждой точке земной коры залегают породы, отражающие лишь некоторые, сравнительно небольшие отрезки времени. Чтобы получить общую картину, мы составляем эти отрезки вместе, сравнивая

и сами породы, и захороненные в них ископаемые остатки, как бы собирая гигантский пазл.

Неудивительно, что в колонке горных пород содержится последовательность ископаемых организмов. Менее очевидно, что на основании сравнения ископаемых видов с современными мы можем довольно точно предугадывать, как будут выглядеть организмы, которые мы обнаружим в том или ином слое. Накопленные знания дают нам возможность заранее предвидеть, какие ископаемые будут обнаружены в определенном слое древних пород. Более того, последовательность ископаемых можно во многом предсказать, основываясь лишь на сравнении нас самих с животными из какого-нибудь зоопарка или аквариума.

Как прогулка по зоопарку может помочь нам узнать, в каких породах искать особо ценные ископаемые остатки? В зоопарке есть много живых существ, по-разному отличающихся друг от друга. Но отвлекаясь от их различий: чтобы справиться с поставленной задачей, нам нужно сосредоточиться на их сходстве, чтобы выявить признаки, общие для многих видов, и выделить группы животных со сходными признаками. Всех живых существ можно распределить по таким группам, заключенным одна в другой, как матрешки, так что меньшие группы находятся в составе больших. Сделав это, мы увидим одно фундаментальное свойство живой природы.

У всех животных в зоопарке или аквариуме есть голова и пара глаз. Назовем таких животных "всеми". В пределах этой группы будет подгруппа животных с головой и парой глаз, у которых есть четыре конечности. Назовем таких животных "всеми с четырьмя конечностями". Подподгруппа этих животных, наделенных головой, глазами и четырьмя конечностями, будет включать организмы с огромным мозгом, ходящие на двух ногах и разговаривающие. Эта подподгруппа — мы, люди. Таким способом мы могли бы, конечно, выделить и намного больше групп, но даже эта трехуровневая схема имеет некоторую предсказательную силу.

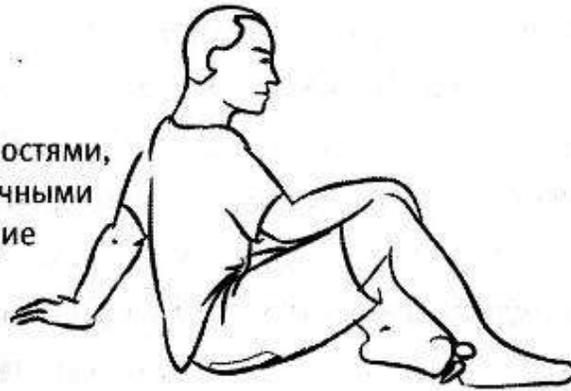
Ископаемые остатки, заключенные в горных породах, обычно соответствуют именно такой последовательности, и мы можем с ее помощью планировать новые палеонтологические экспедиции. Воспользуемся приведенным выше примером. Первые представители группы "всех", существа с головой и парой глаз, встречаются в ископаемом виде в более глубоких слоях, чем первые из "всех с четырьмя конечностями". Говоря точнее, первые рыбы (полноценные

представители "всех") встречаются раньше, чем первые земноводные (представители "всех с четырьмя конечностями"). Очевидно, эту схему можно усовершенствовать, рассматривая многих других животных и признаки, по которым их можно объединить в группы, а также оценивая абсолютный возраст горных пород.

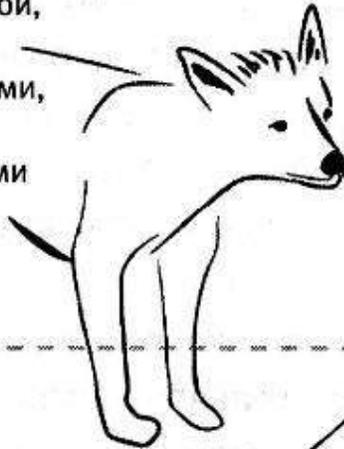
Именно это мы и делаем в своих лабораториях, используя тысячи и тысячи признаков и видов животных. Мы обращаем внимание на мельчайшие различия анатомических черт, а нередко также и на крупные куски ДНК. Данных накоплено так много, что нам часто необходимы мощные компьютеры, чтобы их обрабатывать и получать длинные последовательности групп, заключенных одна в другой. Этот подход лежит в основе всей биологии, потому что он позволяет нам выдвигать гипотезы о том, в каком родстве живые существа состоят друг с другом.

Кого мы видим в зоопарке

Все с головой,
четырьмя конечностями,
волосами и молочными
железами, ходящие
на двух ногах



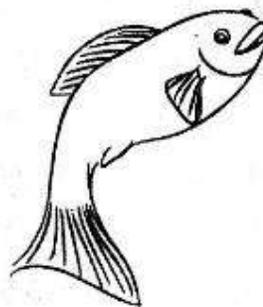
Все с головой,
четырьмя
конечностями,
волосами
и молочными
железами



Все с головой
и четырьмя конечностями

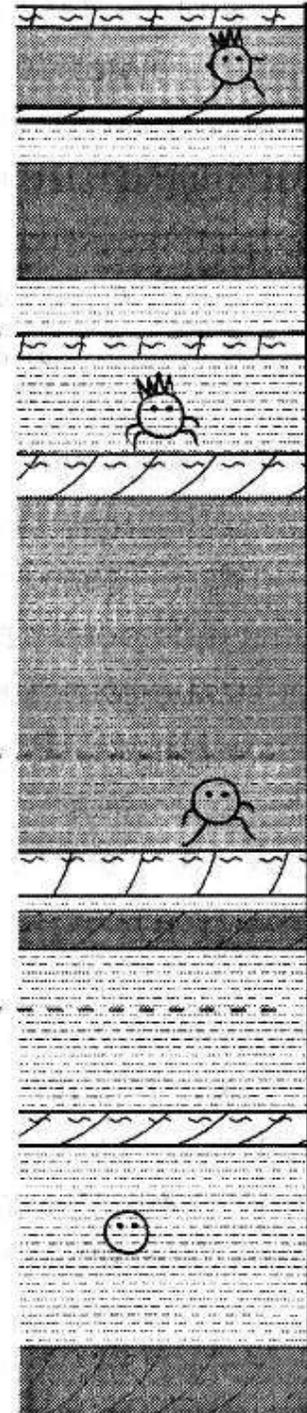


Все с головой



Ископаемая летопись

молодые породы



древние породы

Существа, которых мы видим в зоопарке, отражают последовательность залегания ископаемых остатков в горных породах нашей планеты

Ископаемые остатки, накопленные за сотни лет сбора, не только помогают нам группировать живые организмы по степени родства. Благодаря коллекциям этих остатков у нас в распоряжении имеется обширная библиотека, или каталог, разных периодов истории Земли и жизни на ней. Теперь мы можем приблизительно оценить, когда происходили важнейшие изменения. Вы интересуетесь происхождением млекопитающих? Обратитесь к породам времени, называемого ранней мезозойской эрой. Геохимический анализ говорит нам, что этим породам где-то около 210 миллионов лет. Интересуетесь происхождением приматов? Обратитесь к меловому периоду, к породам, залегающим выше, возраст которых порядка 80 миллионов лет.

Порядок залегания ископаемых остатков в горных породах Земли дает нам богатый материал для изучения нашей связи со всей остальной жизнью. Если бы в породах, которым около 600 миллионов лет, мы нашли остатки древнейших медуз, залегающие по соседству со скелетом сурка, нам пришлось бы переписать наши учебники, потому что это означало бы, что первый сурок появился в палеонтологической летописи раньше древнейших известных млекопитающих, рептилий и рыб — даже раньше первых червей. Более того, этот древний сурок показал бы нам, что значительная часть того, что, как нам кажется, мы знаем об истории Земли и жизни на ней, не соответствует действительности. Однако, несмотря на то что люди уже больше 150 лет ищут ископаемые остатки древних организмов на всех материках и во всех доступных слоях горных пород, ничего подобного этому сурку никогда не находили.

Теперь вернемся к проблеме поиска родственников первых рыб, которые вышли на сушу. В нашей трехуровневой схеме эти существа должны находиться где-то между "всеми" и "всеми с четырьмя конечностями". Соотнесем это с тем, что нам известно о горных породах, и придем к выводу, что геологические данные указывают нам на промежуток времени от 380 до 365 миллионов лет назад. Близкие этому промежутку более молодые породы, которым около 360 миллионов лет, содержат ископаемые остатки различных животных, в которых все мы узнали бы амфибий (земноводных) и рептилий (пресмыкающихся). Моя коллега Дженни Клэк из Кембриджского

университета и некоторые другие палеонтологи нашли остатки амфибий в Гренландии в породах, которым около 365 миллионов лет. Их шея, органы слуха и четыре ноги делают их непохожими на рыб. Но в породах возрастом около 385 миллионов лет мы находим остатки настоящих рыб, которые и похожи на рыб. У них были плавники, голова конической формы и чешуя, а шеи не было. Учитывая эти обстоятельства, неудивительно, что мы обратили особое внимание на породы возрастом около 375 миллионов лет, чтобы найти переходные формы между рыбами и наземными позвоночными животными.

Итак, мы определились с промежутком времени, который хотим исследовать, а значит, и с теми слоями геологической колонки, в которых нужно искать. Теперь наша задача состоит в том, чтобы найти породы, сформировавшиеся при таких условиях, что в них могут залежать ископаемые остатки живых организмов. Вулканические породы нам в целом не подходят. Ни одна известная нам рыба жить в лаве не может. Даже если бы такая рыба существовала, остатки ее костей не выдержали бы страшного перегрева, необходимого для формирования базальтов, риолитов, гранитов и других магматических пород. Мы можем также отбросить метаморфические породы, такие как кристаллический сланец и мрамор, потому что с начала своего образования они претерпели или перенагрев, или воздействие крайне высокого давления. Какие бы ископаемые остатки в них ни залежали, они давно пропали. Идеально для захоронения остатков живых организмов подходят осадочные породы: известняки, песчаники, алевролиты и глинистые сланцы. По сравнению с вулканическими и метаморфическими породами эти породы возникли в менее экстремальных условиях, в том числе на дне рек, озер и морей. В таких средах могут обитать животные, и, что не менее важно, в них происходят процессы осадконакопления, в ходе которых и образуются осадочные породы, где с большой вероятностью сохраняются ископаемые остатки. К примеру, в океане или в озере из толщи воды на дно постоянно оседают различные частицы. Со временем, по мере накопления этих частиц, их начинают сдавливать новые, более высокие слои. Постепенное сдавливание в сочетании с химическими процессами, происходящими внутри этих пород в течение долгого времени, дает скелетам, заключенным в таких породах, неплохие шансы сохраниться в виде ископаемых остатков (фоссилизироваться). Сходные процессы происходят в реках и в их долинах. Общее правило здесь таково: чем медленнее река или ручей, тем лучше сохраняются ископаемые.

У каждого лежащего на земле камня есть своя история — история о мире в те времена, когда сформировалась порода, ид которой этот камень состоит. Внутри камня хранятся сведения о былом климате и об условиях, часто сильно отличающихся от тех, в которых он находится сегодня. Пропась между теми и другими может быть почти немьслимо глубока. Возьмем такой исключительный пример, как гора Эверест, у вершины которой, на высоте почти девяти километров, залегают породы, когда-то находившиеся на дне древнего моря. На Северной стене, практически в пределах прямой видимости со знаменитой Ступени Хиллари, можно найти ископаемые морские раковины. Подобный контраст между настоящим и прошлым есть и в Арктике, где мы работаем. Зимой морозы здесь нередко достигают минус сорока градусов по Цельсию. Однако в некоторых из горных пород в этих краях заключены остатки организмов, обитавших в древней тропической дельте, чем-то похожей на дельту Амазонки. Растения и рыбы, остатки которых мы здесь находим, могли жить только в теплом и влажном климате. Находки на огромных высотах и на Крайнем Севере ископаемых видов, приспособленных к жизни в тепле, свидетельствуют о том, как сильно может меняться наша планета: на ней вырастают и разрушаются горы, климат становится то теплее, то прохладнее, а континенты непрерывно движутся. Полученные на сегодня представления о том, за какое огромное время происходили эти необычайные изменения, позволяют нам использовать такого рода сведения, организуя новые экспедиции для охоты за ископаемыми.

Итак, если мы хотим разобраться в происхождении наземных позвоночных животных, нам надо обратить особое внимание на породы, возраст которых составляет примерно от 375 до 380 миллионов лет и которые сформировались в океанах, озерах или реках. Исключим из рассмотрения вулканические и метаморфические породы, и круг мест, где мы можем надеяться найти то, что ищем, еще больше сузится.

Мы проделали пока лишь часть работы, необходимой для планирования новой экспедиции. Нам не подходят осадочные породы указанного возраста, залегающие глубоко под землей или где-нибудь под полями, торговыми комплексами или городами. Здесь нам пришлось бы копать вслепую. Нетрудно представить, насколько мала вероятность успеха, если мы просто примемся бурить землю в первом попавшемся месте в расчете обнаружить ископаемые. Это примерно как стрелять по мишени в полной темноте.

Лучше всего искать ископаемые в таких местах, где можно многие

километры идти по обнаженным горным породам в поисках участков, и где из-за выветривания на поверхности оказались заключенные в геологических слоях кости. Ископаемые остатки костей нередко тверже, чем окружающая их порода, поэтому их разрушение под действием эрозии идет несколько медленнее и на поверхности породы проступают выпуклые очертания этих костей. Идя по обнаженной породе, мы можем найти на ее поверхности следы костей и начать раскопки в этом месте.

Вот мы и получили рецепт новой экспедиции за ископаемыми: нужно найти породы определенного возраста, определенного типа (осадочные) и залегающие открыто, и можно браться за дело. Для охоты за ископаемыми идеальны районы, где мало почвы, растительности и следов деятельности человека. Принимая все это во внимание, разве удивительно, что значительная часть открытий совершается в пустынях? В пустыне Гоби. В пустыне Сахара. В штате Юта. В полярных пустынях — например в Гренландии.

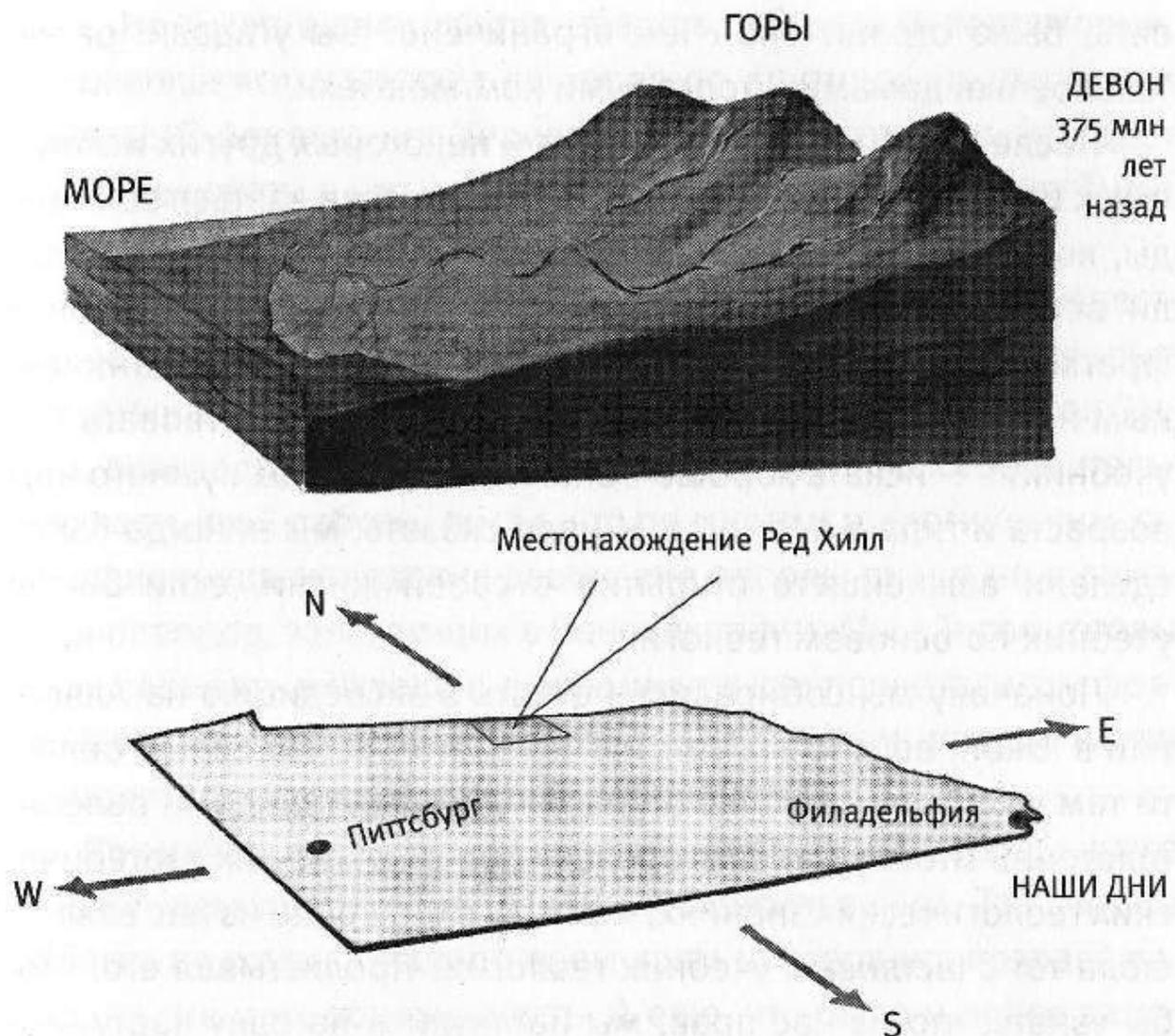
Все это звучит вполне логично, но не будем забывать и еще об одном факторе — везении. По правде говоря, именно везение помогло нашей группе выйти на след той самой рыбы. Наши первые важные открытия были сделаны не в пустыне, а у обочины дороги в Пенсильвании, где породы отнюдь не залегают открыто. И вдобавок нам пришлось искать там лишь потому, что у нас было довольно мало денег.

Чтобы отправиться в Гренландию или в Сахару, нужно довольно много денег и времени. А на исследования где-нибудь неподалеку, напротив, не требуется больших научных грантов, только деньги на бензин и платные автострады. Для аспиранта или молодого преподавателя колледжа этот фактор может играть ключевую роль. Когда я устроился на свою первую работу в Филадельфии, меня особенно интересовала группа горных пород, известная под собирательным названием "пенсильванская формация Кэтскилл". Эту формацию интенсивно изучают уже более 150 лет. Ее возраст хорошо известен, он охватывает поздний девонский период. Кроме того, эти породы прекрасно подходят для того, чтобы в них сохранились древнейшие наземные позвоночные и их ближайшие родственники. Чтобы понять почему, надо представить себе, как выглядела Пенсильвания в девонский период. Давайте выбросим из головы образы Филадельфии, Питтсбурга и Гаррисберга и представим что-то вроде дельты Амазонки. В восточной части штата располагалось нагорье. Несколько больших рек стекали с этого нагорья на запад и впадали в

обширное море, которое плескалось там, где сейчас стоит Питтсбург.

Для поиска ископаемых лучше не придумайшь, если не считать того, что сегодня Пенсильвания вся покрыта населенными пунктами, лесами и полями. Обнажения горных пород встречаются в основном лишь там, где работники Пенсильванского департамента транспорта решили построить большие дороги. А для строительства дорог они используют взрывы, и эти взрывы обнажают горные породы. Обычно это не самые подходящие обнажения, но за неимением лучших приходится пользоваться ими. Занимаясь недорогой наукой, получаешь то, что можешь себе позволить.

Сопутствовало нам и везение другого рода: в 1993 году ко мне приехал Тед Дешлер, который стал заниматься палеонтологией под моим руководством. Это сотрудничество изменило жизнь каждого из нас. У нас совсем разные характеры, и поэтому мы прекрасно дополняем друг друга: мне никогда не сидится на месте, и я все время думаю о том, где мы будем искать дальше, а Тед терпелив и знает, когда нужно остановиться и копать, чтобы не пропустить золотую жилу. Мы с Тедом начали исследовать девонские породы в Пенсильвании в надежде найти новые материалы о происхождении конечностей наземных позвоночных. Начали мы с того, что отправлялись на машине чуть ли не во всякое место на востоке штата, где проводилась выемка грунта под дорогу.



По обочинам дорог в Пенсильвании мы искали то, что осталось от древней дельты реки, во многом похожей на сегодняшнюю Амазонку. Штат Пенсильвания (внизу) и схема его топографии в девоне (вверху).

К немалому нашему удивлению, вскоре после того, как мы начали свои исследования, Тед нашел великолепную ископаемую лопатку. Мы назвали ее обладателя *Huernerpeton* (хайнерпетон), что переводится с греческого как "маленькое ползающее на брюхе животное из Хайнера". Хайнер (Huerner) — это название ближайшего городка. *Huernerpeton* имел очень мощную лопатку, из чего можно заключить, что у этого существа, скорее всего, были сильные конечности. К сожалению, нам так и не удалось найти полный скелет этого животного. Количество обнажений, которые нам удалось исследовать, было ограничено. Чем ограничено?

Вы угадали: растительностью, домами и торговыми комплексами.

После открытия хайнерпетона и некоторых других ископаемых из этих пород нам с Тедом не терпелось взяться за породы, которые были бы лучше обнажены. Если бы мы построили всю свою научную деятельность на добывании жалких фрагментов, мы смогли бы работать над очень ограниченным набором проблем. Поэтому мы решили, действовать "по учебнику" — искать хорошо обнаженные породы нужного нам возраста и типа в пустынях. И надо сказать, мы никогда бы не сделали важнейшего открытия в своей жизни, если бы не учебник по основам геологии.

Поначалу мы собирались поехать в экспедицию на Аляску или в Юкон, во многом потому, что в интересующей нас области там уже были сделаны открытия другими группами палеонтологов. В итоге у нас разгорелся спор о некоторых эзотерических геологических знаниях, и в пылу спора один из нас взял со стола тот счастливый учебник геологии. Пролистывая его, чтобы узнать, кто из нас прав, мы наткнулись на одну карту — и прямо остолбенели. На ней было нанесено все, что мы искали.

Мы тут же перестали спорить и стали заново планировать свою экспедицию.

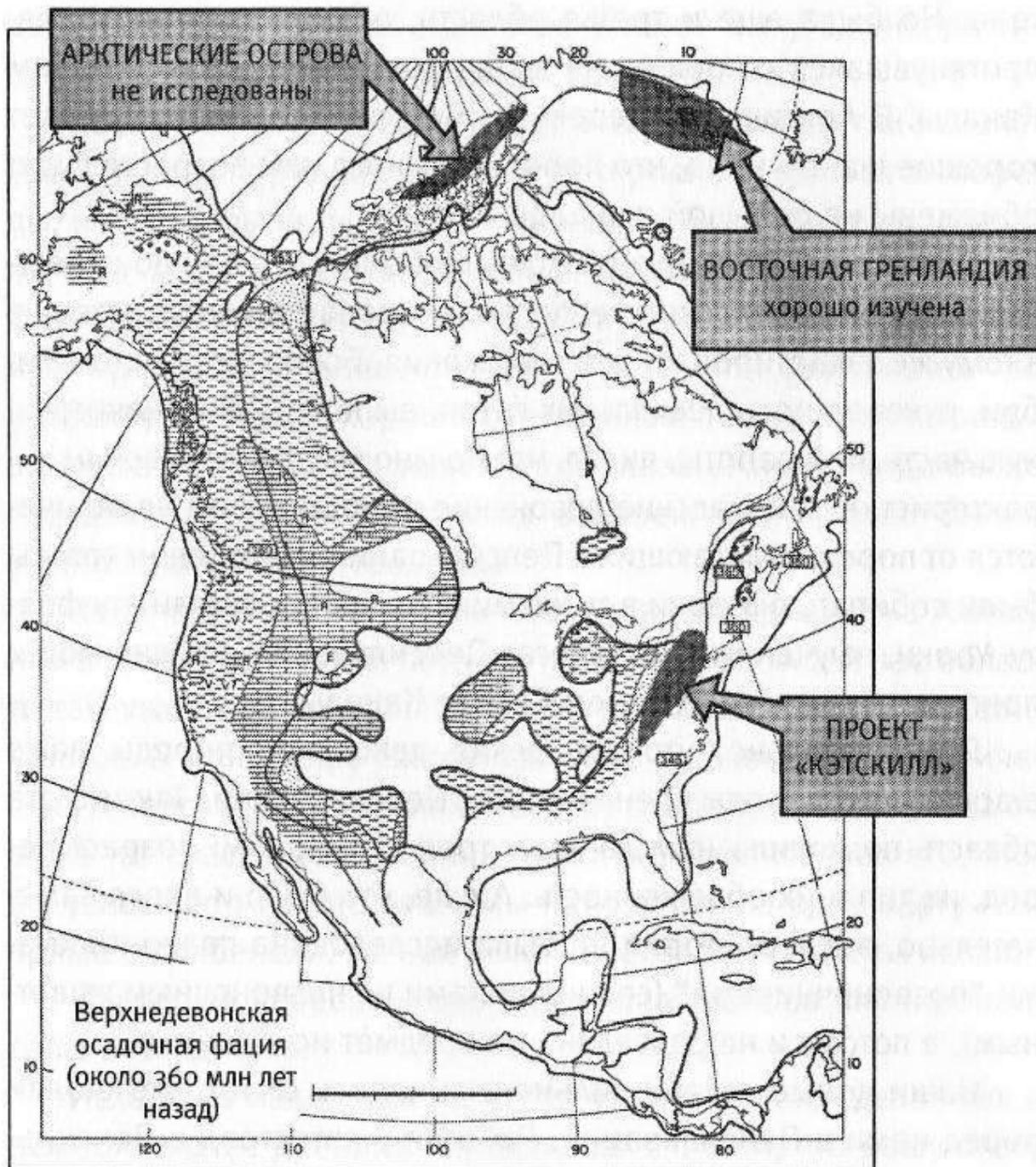
Исходя из известных на тот момент находок, сделанных в немного менее древних породах, мы считали, что нашу охоту лучше всего начать в отложениях древних рек. На карте в учебнике были показаны три области залегания девонских пресноводных отложений, каждое из которых соответствовало системе речных дельт. Первая область — восточное побережье Гренландии. Здесь Дженни Клэк нашла свое ископаемое — очень древнее существо с четырьмя конечностями, одно из древнейших известных наземных позвоночных (или тетрапод, то есть четвероногих). Вторая — восточное побережье Северной Америки, где мы уже работали и нашли лопатку хайнерпетона. Но была еще и третья область, обширная территория, протянувшаяся с востока на запад по арктическим островам Канады. В Арктике нет деревьев, мусора и городов. Это дает хорошие шансы на то, что породы нужного нам возраста будут обнажены на большой площади.

Обнажения в канадской Арктике были уже хорошо известны, особенно канадским геологам и палеоботаникам, которые к тому же закартировали эти обнажения. Более того, Эштон Эмбри, руководитель нескольких групп, выполнивших значительную часть этой работы, писал, что по многим геологическим характеристикам канадские девонские породы ничем не отличаются от пород, залегающих в

Пенсильвании. Мы с Тедом готовы были собирать рюкзаки в ту же минуту, как прочитали эту фразу. Уроки, выученные на дорогах Пенсильвании, вполне могли пригодиться нам на Крайнем Севере Канады.

Примечательно, что канадские девонские породы даже старше, чем породы Гренландии и Пенсильвании. Так что эта область подходила нам по всем трем критериям: возраст пород, их тип и их обнаженность. А еще, что было и вовсе замечательно, эта территория не была исследована палеонтологами — "позвоночниками" (специалистами по позвоночным животным), а потому и не разведана на предмет ископаемых.

Наши новые задачи сильно отличались от тех, что стояли перед нами в Пенсильвании. Работая у автострад в Пенсильвании, мы рисковали погибнуть под колесами грузовиков, которые проносились мимо, пока мы искали своих ископаемых. В Арктике мы рисковали быть съеденными белыми медведями, израсходовать запасы пищи или оказаться отрезанными от людей из-за плохой погоды. Там у нас больше не будет возможности набрать с собой бутербродов и ехать на машине за ископаемыми.



Карта, с которой все и началось. На этой карте Северной Америки показано как раз то, что мы искали. Различной штриховкой обозначены породы девонского периода как морские так и пресноводные. Стрелки указывают три области, которые когда-то были речными дельтами. Воспроизведено с изменениями по рис.13.1 из книги: R.H. Dott and R.L. Batten, *Evolution of the Earth* (New York: McGraw-Hill, 1988). Публикуется с разрешения издательства McGraw-Hill.

Теперь нам придется тратить не меньше восьми дней на планирование каждого дня работы в поле, потому что до нужных нам пород теперь можно добраться только по воздуху, а ближайшая база снабжения находится в 400 километрах. Мы можем привезти с собой лишь необходимое количество еды и оборудования плюс небольшой неприкосновенный запас. И, что еще более важно, строгие ограничения на вес самолета позволяют нам забрать с собой лишь малую долю обнаруженных на месте ископаемых. Прибавьте к этим ограничениям тот краткий промежуток времени, в течение которого мы могли нормально работать каждый год в условиях Арктики, и вы убедитесь, что нам предстояли совершенно новые и весьма обескураживающие трудности.

Здесь в дело вступил мой бывший научный руководитель из Гарварда, доктор Фэриш Дженкинс-младший. Он много лет возглавлял экспедиции в Гренландию и обладал опытом, необходимым для осуществления нашего рискованного предприятия. И вот вся наша команда в сборе. Представители трех академических поколений — Тед, мой бывший студент, Фэриш, мой бывший руководитель, и я — собирались отправиться в Арктику, чтобы попытаться найти ископаемые свидетельства перехода от рыб к наземным животным.

Практического руководства по занятию палеонтологией в Арктике не существует. Снаряжаясь в экспедицию, мы полагались на советы друзей и коллег. Мы также читали книги, которые лишь убеждали нас в том, что решительно ничто не поможет нам подготовиться к непосредственному опыту такой работы. Никогда подобные вещи не ощущаются столь же остро, как когда вас впервые высаживают с вертолета в каком-нибудь Богом забытом уголке Арктики. Первая мысль, которая тут же приходит на ум, — белые медведи. Несчетное число раз я обзирал окрестности в поисках движущихся белых пятнышек. Если все время об этом думать, можно что-нибудь и увидеть. В первую неделю нашей работы в Арктике один из членов нашей группы заметил одно такое пятнышко. По виду это был белый медведь на расстоянии где-то в полкилометра. Мы, как герои полицейской комедии, в суматохе стали хвататься за оружие, сигнальные ракеты и свистки, пока не разглядели, что наш медведь был на самом деле белым полярным зайцем метрах в шестидесяти от нас. В Арктике нет домов и деревьев, чтобы правильно оценить расстояние, и зрение легко нас обманывает.

Арктика — большой и пустынный край. Обнажения нужных нам пород простираются здесь на расстояние около полутора тысяч километров. А ископаемые животные, которых мы искали, были длиной порядка метра с небольшим. Нам надо было как-то найти на этих просторах небольшой участок породы, содержащий нужное нам ископаемое. Среди рецензентов заявок на гранты попадаются люди совершенно беспощадные. Они всегда указывают в своих рецензиях на данное затруднение. Лучшее из всех об этом написал рецензент одной из первых заявок Фэриша на исследования в Арктике. Как было сказано в его рецензии (должен заметить, не особенно доброжелательной), шансы найти в Арктике новых ископаемых "еще меньше, чем найти пресловутую иголку в стоге сена".

Нам понадобилось четыре экспедиции на остров Элсмир и более шести лет исследований, чтобы найти нашу иголку. Это к вопросу о везении.

Стараясь учиться на своих ошибках, мы нашли то, что искали, после многих попыток и неудач. Вначале, в полевой сезон 1999 года мы добывали ископаемых далеко на западе канадской Арктики, на острове Мелвилл. Тогда мы еще не знали этого, но нас высадили на дне древнего океана. В породах было полно ископаемых, и мы нашли в ней остатки множества разных рыб. Беда была в том, что все они были, по-видимому, глубоководные, совсем не такие, как нужные нам обитатели речных или озерных мелководий, от которых произошли наземные позвоночные. Пользуясь данными геологического анализа, проведенного Эштоном Эмбри, в 2000 году мы решили перенести нашу экспедицию к востоку, на остров Элсмир, потому что там мы ожидали найти породы, образовавшиеся из отложений древних рек. Вскоре мы начали находить там сохранившиеся в ископаемом виде кусочки рыбьих костей размером с четвертак^[1].



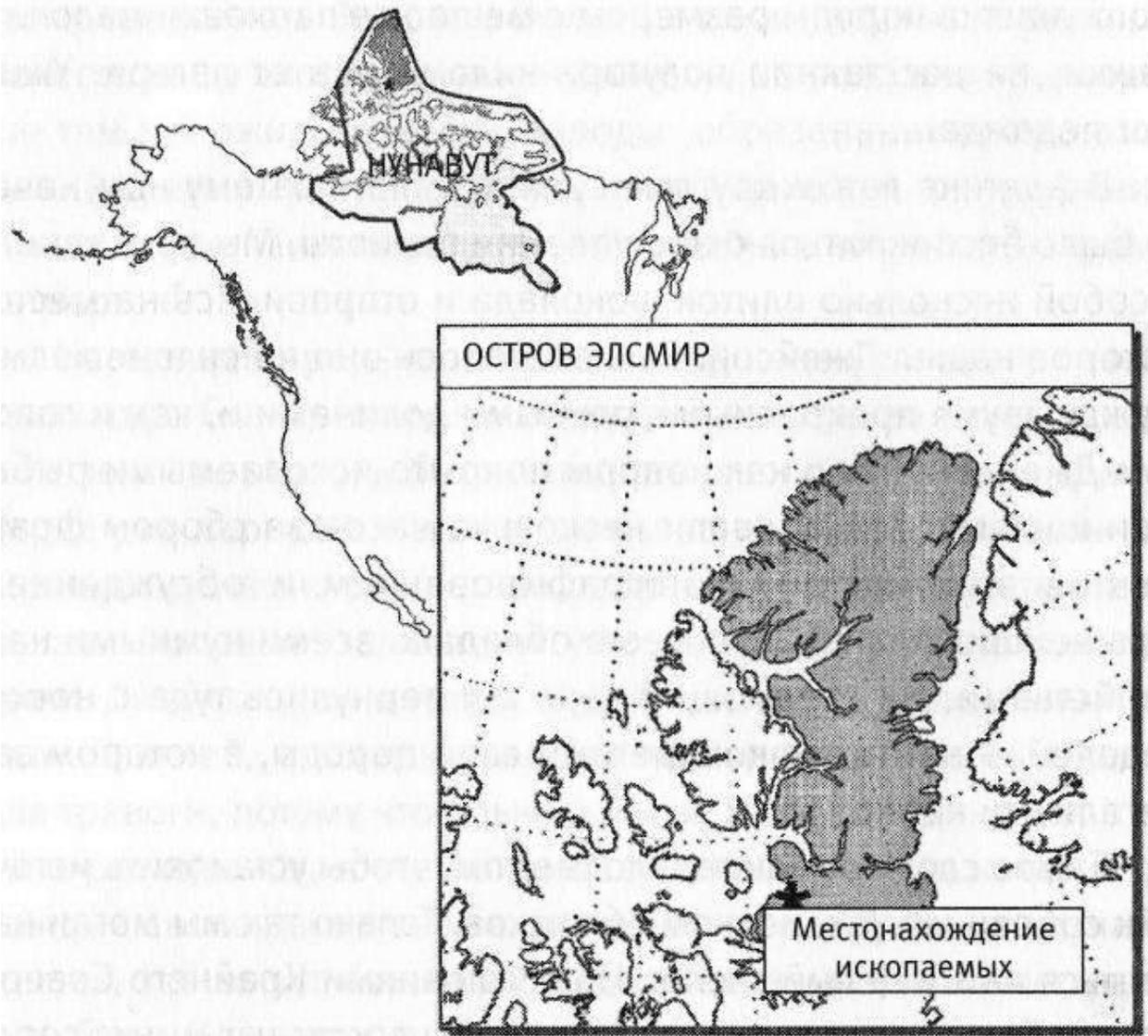
Наш лагерь (вверху) кажется крошечным на фоне окружающего ландшафта. Мой летний дом (внизу) — небольшая палатка, обычно обложенная камнями, чтобы защитить ее от ветров, которые могут дуть здесь со скоростью больше двадцати метров в секунду. Фото автора.

Настоящий прорыв произошел под конец полевого сезона 2000 года. Было это прямо перед ужином, где-то за неделю до того, как нас должны были забирать для возвращения домой. Отряд уже вернулся в лагерь, и мы занимались обычными вечерними делами: разбирали собранные за день материалы, делали полевые заметки и уже начинали организовывать ужин. Джейсон Дауне, тогда студент колледжа, увлеченный палеонтологией, в лагерь вовремя не вернулся. Это был повод для тревоги, потому что обычно мы не ходим поодиночке, а если и расходимся, то четко договариваемся о том, когда и где каждый снова даст о себе знать. Нельзя полагаться на случай в местах, где живут белые медведи и неожиданно может накатить буря. Помнится, я сидел в главной палатке вместе со всеми, и с каждой минутой наша тревога за Джейсона нарастала. Когда мы уже начали планировать поисковые работы, я услышал звук расстегиваемой молнии на входе в палатку. Первым, что я увидел, была голова Джейсона. Когда он весь забрался внутрь, мы сразу поняли, что дело было не в белых медведях: ружье по-прежнему висело у него за плечом. Нам стало ясно, почему он задержался: трясущимися руками он стал доставать горсть за горстью ископаемые кости, которыми были набиты все карманы его одежды — куртки, брюк, рубашки, — а также его маленький рюкзак. Думаю, он напихал бы их и в носки, и в ботинки, если бы смог в таком виде добраться до лагеря. Все эти небольшие кости были собраны им на поверхности небольшого участка породы размером с место для парковки малолитражки, на расстоянии полутора километров от лагеря. Ужин мог подождать.

В Арктике летом круглые сутки светло, поэтому нам нечего было беспокоиться о наступлении темноты. Мы прихватили с собой несколько плиток шоколада и отправились на место, которое нашел Джейсон. Располагалось оно на склоне холма между двумя прекрасными речными долинами и, как и говорил Джейсон, было как ковром покрыто ископаемыми рыбьими костями. Мы провели несколько часов за сбором фрагментов этих костей, фотографированием и обсуждением дальнейших планов. Это место обладало всеми нужными нам

свойствами. На следующий день мы вернулись туда с новой задачей — найти тот конкретный слой породы, в котором залежали эти кости.

Самое сложное заключалось в том, чтобы установить источник собранных Джейсоном обломков. Только так мы могли надеяться найти целый скелет. Но с условиями Крайнего Севера просто беда: каждую зиму температуры достигают минус сорока по Цельсию. Летом, когда солнце вовсе не опускается за горизонт, температура поднимается почти до плюс 10. Такие циклы замерзания и оттаивания приводят к тому, что обнаженные горные породы и заключенные в них ископаемые остатки растрескиваются. Каждую зиму они охлаждаются и сжимаются, каждое лето — нагреваются и расширяются. За тысячи лет таких расширений и сжатий ископаемые в породе у поверхности распадаются на фрагменты. Столкнувшись с валяющимися в беспорядке на склоне холма обломками, мы не могли с ходу сказать, какой именно слой послужил их источником. Несколько дней подряд мы пытались отследить путь этих обломков, копали пробные шурфы, пользовались нашими геологическими молотками, как лозоходцы лозой, чтобы разобраться в том, из какой же части склона происходили эти кости.



Вот где мы работаем: южная часть острова Элсмир, территория Нунавут (Канада), полторы тысячи километров к югу от северного полюса.

Через четыре дня мы наконец нашли этот слой и в итоге обнаружили множество скелетов ископаемых рыб, нередко лежащих один на другом. Два следующих лета были во многом посвящены тому, чтобы извлечь эти скелеты из породы.

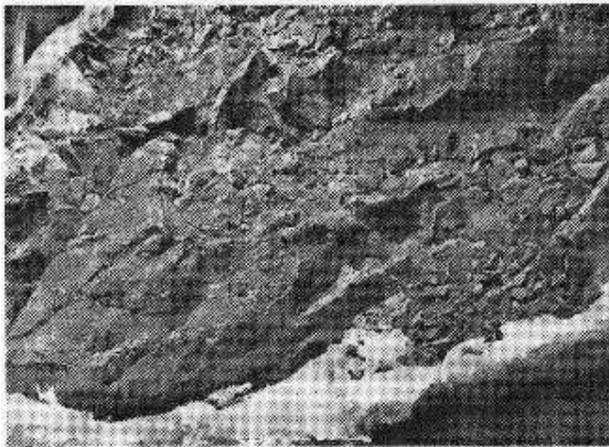
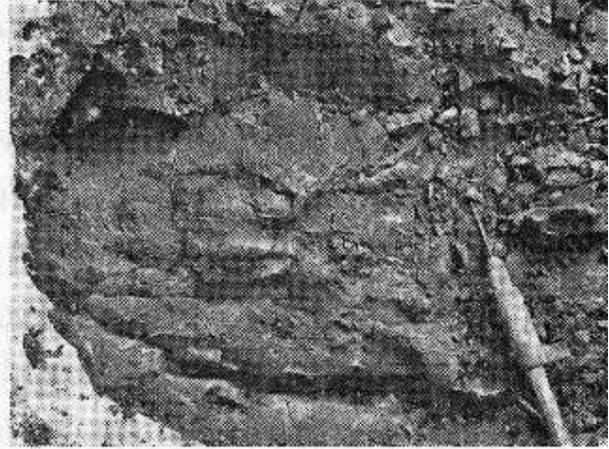
И вновь неудача: все обнаруженные нами рыбы относились к хорошо известным видам, собранным в местах, где залегают близкие по возрасту породы, в Восточной Европе. А кроме того, эти рыбы были довольно далекими родственниками наземных позвоночных. В 2004 году мы решили сделать еще одну попытку. Положение у нас было —

или пан, или пропал. Расходы на наши арктические изыскания были непомерно высоки, и если бы нам не удалось найти ничего примечательного, от дальнейших поисков пришлось бы отказаться.

Все изменилось за четыре дня в начале июля 2004 года. Я переворачивал камни на дне карьера, где приходилось чаще колоть лед, чем породу. В одном месте, проломив лед, я увидел картину, которой никогда не забуду: участок, покрытый чешуей, не похожей ни на что из того, что мы до сих пор находили в этом карьере. По соседству с этим участком я заметил выпуклость, тоже покрытую льдом. Она напоминала челюсти. Но эти челюсти не были похожи на челюсти ни одной из виденных мной рыб. Похоже, что голова, которая несла эти челюсти, была плоской.

На следующий день мой коллега Стив Гейтси переворачивал камни в верхней части того же карьера. Из одного извлеченного им камня на него уставилось рыло ископаемой рыбы. Как и у рыбы, обнаруженной мною на дне карьера, у нее была плоская голова. Такого мы раньше не находили, и это было важно. Но еще важнее было то, что находка Стива, в отличие от моей, была многообещающей. Перед нами был передний конец тела, а значит, если повезет, остальной скелет может быть заключен в глубине каменного склона. Остаток лета Стив провел за постепенным извлечением фрагментов породы, чтобы мы могли привезти ископаемый скелет в лабораторию и очистить его. Благодаря мастерству, с которым Стив выполнил эту работу, был добыт один из лучших известных образцов ископаемых, отражающих выход позвоночных на сушу.

Образцы, которые мы привезли с собой в лабораторию, в целом выглядели как каменные глыбы, внутри которых были заключены ископаемые остатки. В течение двух месяцев препараты постепенно, по кусочкам удаляли породу, часто вручную, используя зубоорудование и зубочистки. Каждый день открывал нам новые подробности строения этого ископаемого.



Процесс поиска ископаемых начинается с постепенного извлечения фрагментов породы. На этих photographs показаны этапы извлечения ископаемых остатков и их транспортировки с поля в лабораторию, где образец тщательно очищается от лишней породы, и перед нами предстает скелет животного, ранее не известного науке. Слева сверху — фото автора, остальные любезно предоставил Тед Дешлер (Академия естественных наук Филадельфии).

Едва ли не всякий раз, когда обнажался новый большой участок его скелета, мы узнавали что-то новое о происхождении наземных позвоночных.

Ископаемое, которое постепенно открывалось нашим взорам осенью 2004 года, представляло собой прекрасную промежуточную форму между рыбами и наземными позвоночными. Между этими группами животных есть немалая разница. Голова у рыб коническая, в то время как у древнейших наземных позвоночных головы были плоские, с глазами наверху, как у крокодилов. У рыб нет шеи, их лопатки прикреплены к черепу рядом костных пластинок. У древнейших

наземных позвоночных, как и у всех их потомков, шея имеется, то есть голова может двигаться независимо от лопаток и плечевого пояса конечностей.

Есть и другие существенные отличия. У рыб все тело покрыто чешуей, а у наземных позвоночных нет. Кроме того, что немаловажно, у рыб есть плавники, в то время как у наземных позвоночных имеются две пары конечностей, оканчивающихся и запястьем, и лодыжкой (на конечностях передней и задней пары соответственно), и пальцами. Список отличий рыб от наземных позвоночных можно продолжать и дальше.

Но открытое нами существо стирало грань между этими двумя группами животных. Как рыба, оно было покрыто чешуей и имело перепончатые плавники. Но голова у него была плоской, как у наземных позвоночных, а еще у него была шея. Внутри передней пары его плавников находились кости, соответствующие плечевой, локтевой и лучевой и даже некоторым костям запястья. Эти кости были к тому же соединены суставами: перед нами была рыба с плечевым, локтевым и лучезапястным суставами!

Почти все черты, общие для этого существа и для наземных позвоночных, весьма примитивны. К примеру, его плечевая кость по форме и строению отчасти похожа на рыбью, а отчасти — на плечевую кость амфибий. То же относится к строению черепа и лопаток.

Нам потребовалось шесть лет, чтобы найти это ископаемое, но эта находка подтвердила наше палеонтологическое предсказание: открытая нами рыба не только занимала промежуточное положение между двумя разными группами животных, она также была обнаружена в *отложениях определенного периода истории Земли, сформировавшихся в определенной среде*. Как мы и ожидали, мы нашли это ископаемое в породах возрастом около 375 миллионов лет, образованных отложениями древней реки.

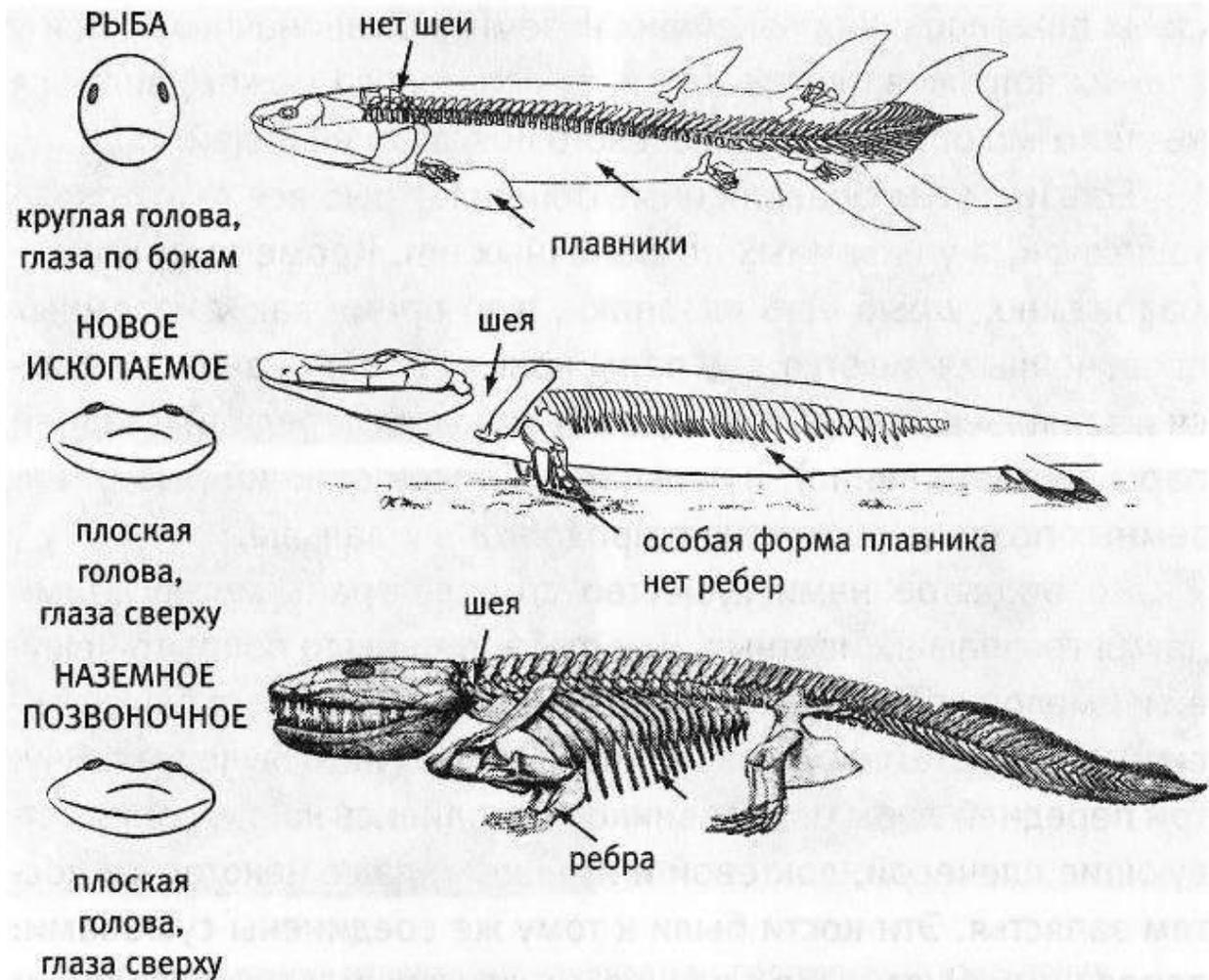


Рисунок говорит сам за себя. Тиктаалик – переходное звено между рыбами и примитивными наземными животными

Как первооткрыватели этого существа Тед, Фэриш и я имели почетное право дать ему формальное научное название. Нам хотелось, чтобы название отражало происхождение этой рыбы с арктической территории Нунавут, отдавая наш долг эскимосскому народу за право работать на его земле. Мы связались с советом старейшин Нунавута, официально называющимся *Inuit Qaujimaqatuqangit Katimajit*, с просьбой предложить название этому существу на эскимосском языке инуктитут. Конечно, меня беспокоило, что совет с таким названием предложит нам слово, которое мы будем не в состоянии произнести. Я послал им изображение этого ископаемого, и старейшины предложили два варианта: *Siksagiat* и *Tiktaalik*. Мы выбрали *Tiktaalik* — потому, что это слово сравнительно легко произнести человеку, не говорящему по-эскимосски, а еще из-за того, что на языке инуктитут оно означает

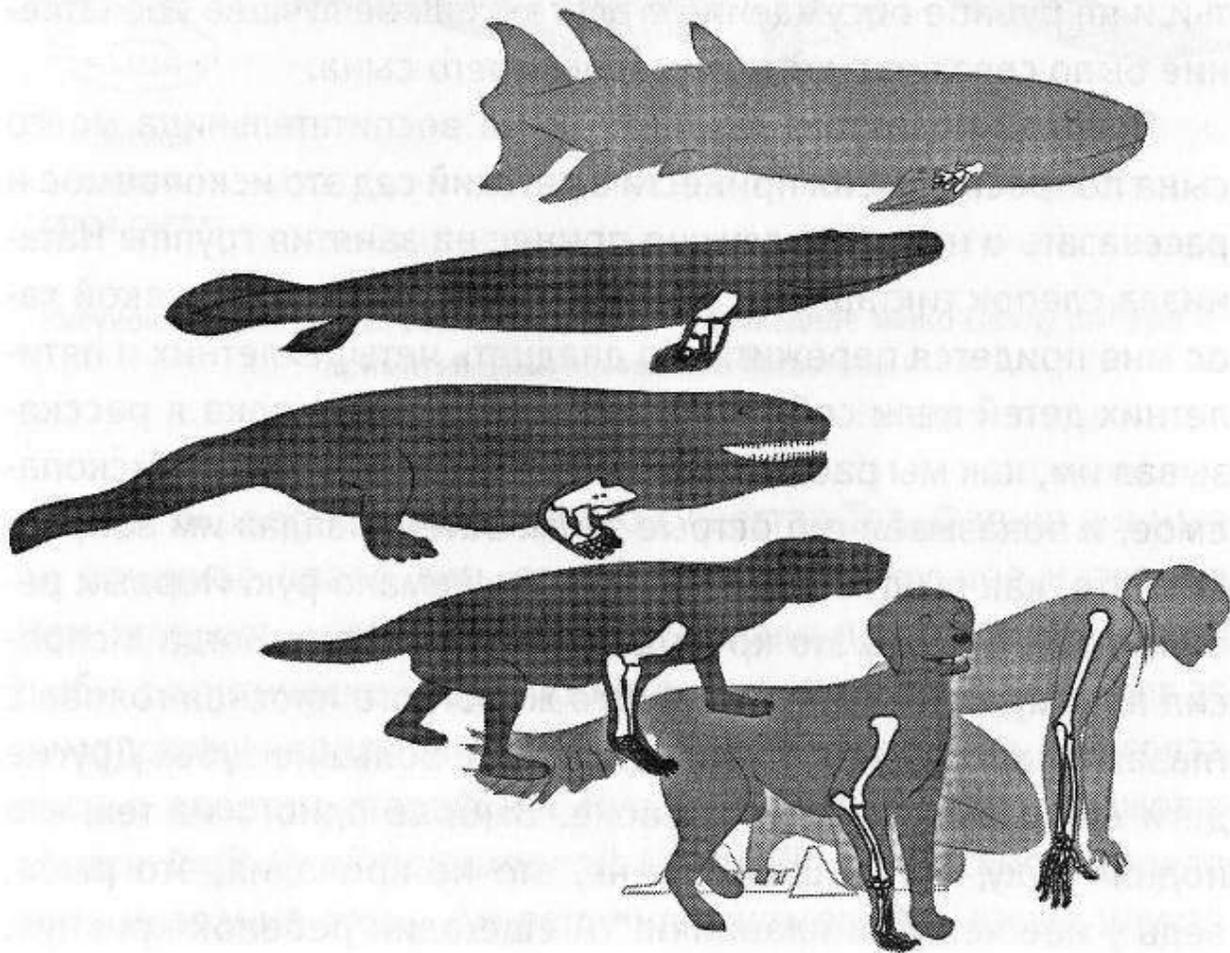
"крупная пресноводная рыба".

На следующий день после того, как в апреле 2006 года мы объявили о своем открытии, во многих газетах вышли статьи, посвященные тиктаалику, и даже в таких солидных изданиях, как New York Times, о нем писали с большими заголовками. Из-за всеобщего внимания к нашей находке мне довелось пережить самую странную неделю в моей обычно спокойной жизни. Но для меня самым ярким моментом всей этой шумихи стали не посвященные тиктаалику карикатуры, не редакционные статьи и не бурное обсуждение в блогах. Самое лучшее впечатление было связано с детским садом моего сына.

Посреди поднятого газетами шума воспитательница моего сына попросила меня принести в детский сад это ископаемое и рассказать о нем. Я послушно принес на занятия группы Натаниэла слепок тиктаалика, мысленно готовясь к тому, какой хаос мне придется пережить. Но двадцать четырехлетних и пятилетних детей вели себя на удивление хорошо, пока я рассказывал им, как мы работали в Арктике, чтобы найти это ископаемое, и показывал его острые зубы. Затем я задал им вопрос: "Кто это, как вы думаете?" Поднялось немало рук. Первый ребенок ответил, что это крокодил или аллигатор. Когда я спросил почему, он сказал, что у этого животного плоская голова с глазами наверху, как у крокодила. Еще большие зубы. Другие дети стали выражать несогласие. Выбрав одного из тех, кто поднял руку, я услышал: "Не-не, это не крокодил, это рыба, ведь у нее чешуя и плавники!" А еще один ребенок крикнул: "А может, это и то и другое сразу?" Вот о чем нам говорит тиктаалик — и говорит так недвусмысленно, что это поняли даже ребята из детского сада.

Но тиктаалик может поведать нам и нечто более глубокое. Эта рыба позволяет узнать новое не только о рыбах — в ней есть также что-то и от нас самих. В первую очередь именно поиск этой связи и привел меня в Арктику.

Откуда у меня такая уверенность в том, что это ископаемое что-то говорит о моем собственном теле? Рассмотрим шею тиктаалика. У всех рыб, живших до него, был набор костей, с помощью которых череп был соединен с плечевым поясом, так что всякий раз, когда рыба поворачивала тело, вместе с ним поворачивалась и голова. А тиктаалик не такой. У него голова не соединена с плечевым поясом.



Путь развития скелета передних конечностей — от рыб до собак и людей.

Такое строение объединяет его с амфибиями, рептилиями, птицами и млекопитающими, к которым относимся и мы сами. Переход от рыб к этим животным начался, когда рыбы вроде тиктаалика утратили несколько маленьких косточек.

Можно сходным образом проанализировать развитие костей запястья, ребер, слуховых косточек и других частей нашего скелета — все эти части развились из структур рыб вроде тиктаалика. Это ископаемое — такая же часть нашей истории, как африканские гоминиды, например австралопитек афарский (*Australopithecus afarensis*) — знаменитая Люси. Изучая Люси, мы разбираемся в истории нас как продвинутых приматов. Изучая тиктаалика, мы разбираемся в истории нас как потомков рыб.

Итак, что мы узнали? В нашем мире царит такой высокий порядок, что прогулку по зоопарку можно использовать, чтобы предугадать,

какого рода ископаемые будут обнаружены в тех или иных слоях горных пород, залегающих по всему свету. Такие предсказания могут позволить найти ископаемых, свидетельствующих о важных событиях в древней истории жизни на нашей планете. Следы этих событий записаны внутри нас в виде черт нашего строения.

О чем я еще не сказал, так это о том, что проследить нашу историю можно также по генам, то есть с помощью ДНК. Эти сведения о нашем прошлом не хранятся в горных породах — они хранятся в каждой клетке нашего тела. Мы воспользуемся и ископаемыми, и генами, чтобы разобраться в своей истории — в истории возникновения наших тел.

Глава 2. Откуда такая хватка.

Увиденное на практических занятиях по анатомии человека невозможно забыть. Представьте себе, что вы заходите в комнату, где вам предстоит в течение нескольких месяцев разбирать человеческие тела по частям, слой за слоем, орган за органом, а также выучить десятки тысяч названий.

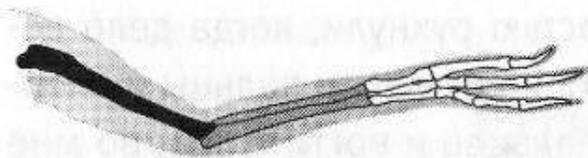
За месяцы перед тем, как мне впервые пришлось препарировать тело человека, я старался подготовиться к тому, что увижу, как на этоотреагирую и что почувствую. Оказалось, что мир моего воображения нисколько не подготовил меня к этому опыту. Тот момент, когда мы сняли простыню и впервые увидели мертвое тело, был совсем не таким напряженным, как я ожидал. Нам предстояло вскрыть грудную клетку, поэтому мы обнажили ее, оставив голову, руки и ноги закрытыми пропитанной фиксирующей жидкостью марлей. Ткани этого тела казались не такими уж человеческими. Обработанное рядом фиксирующих растворов, тело не кровоточило в местах разрезов, а кожа и внутренние органы имели консистенцию резины. Я начал думать, что труп больше похож на куклу, чем на человека. Прошло несколько недель, в течение которых мы исследовали органы грудной клетки и брюшной полости. Мне казалось, что я уже достиг некоторого профессионализма. После изучения большинства внутренних органов во мне развилась уверенность в себе, основанная на всем полученном опыте. Я уже много раз своими руками резал и препарировал и выучил анатомию большинства основных органов. Все это делалось механически, бесстрастно, по-научному.

Эти приятные иллюзии полностью рухнули, когда дело дошло до кистей рук. Когда я освободил от марли пальцы и впервые увидел суставы, подушечки пальцев и ногти трупа, во мне высвободились эмоции, которые никак не проявляли себя в последние несколько недель. Это была не кукла, не манекен — когда-то это был живой человек, который носил что-то в этой руке и кого-то ею ласкал! Внезапно механическое занятие, препарирование, стало чем-то прочувствованным и глубоко личным. До этого момента я не испытывал к этому мертвому телу ничего. Я уже доставал из него желудок, желчный пузырь и другие органы, но какой душевно здоровый человек почувствует себя по-человечески связанным с другим при виде желчного пузыря?

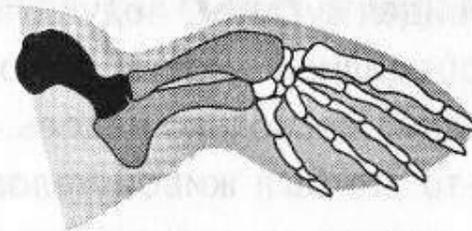
Что такого есть в руке, что она кажется квинтэссенцией человеческого? Наверное, на этот вопрос можно ответить так: рука — это явная связь между нами, это символ того, что мы есть и чего можем достичь. Наша способность хватать, держать, строить и воплощать свои замыслы заключена в этом наборе костей, мышц, нервов и сосудов.

Первое, что бросается в глаза, когда видишь человеческую руку изнутри, — это ее компактность. Возвышение большого пальца (тенар) содержит четыре разных мышцы. Повертите большим пальцем и наклоните кисть, и одновременно слаженно заработают десять мышц и по крайней мере шесть костей. Внутри запястья не меньше восьми маленьких косточек задвигаются друг относительно друга.

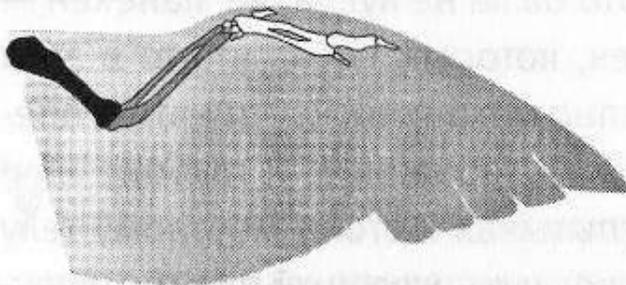
Рука человека



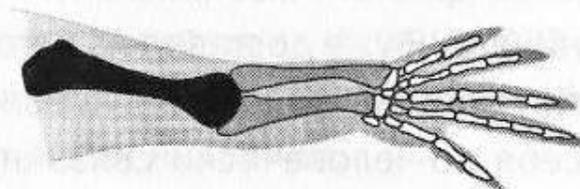
хищный динозавр



тюлень



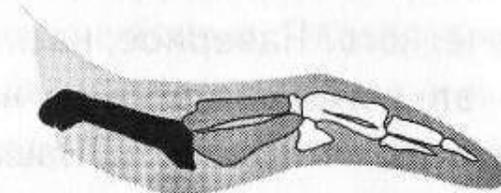
птица



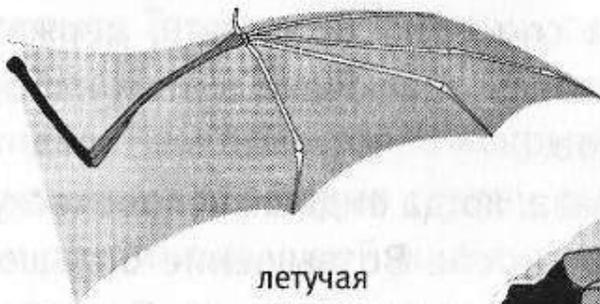
ящерица



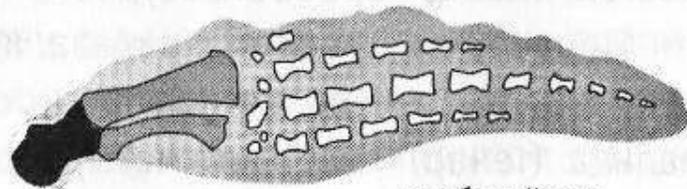
птерозавр



пингвин



летучая мышь



горбатый кит

Общий план строения конечностей позвоночных животных: одна кость за ней две кости за ними маленькие косточки запястья или лодыжки, за ними пальцы

Сгибаемая кисть, вы используете несколько мышц, которые начинаются у локтя, переходят в сухожилия и заканчиваются внутри ладони. Даже самые простые движения предполагают сложное взаимодействие разных структур, заключенных в небольшом пространстве руки.

Сложность и поразительная человечность наших рук уже давно вызывают интерес и восторг ученых. В 1822 году выдающийся шотландский хирург сэр Чарльз Белл написал классическую книгу об анатомии кистей рук. Ее заголовком уже все сказано: "Рука, ее механизм и важнейшие функции как свидетельство высшего замысла". По мнению Белла, строение руки совершенно, потому что она сложна и как нельзя лучше приспособлена для нашего образа жизни. Ему представлялось, что такой совершенный замысел мог иметь лишь божественное происхождение.

Одним из ведущих ученых, занимавшихся поиском божественного порядка в наших телах, был великий анатом сэр Ричард Оуэн. Ему повезло быть анатомом в середине XIX века, когда науке еще предстояло открыть в удаленных уголках Земли немало групп животных, совершенно неизвестных ранее. По мере того как европейцы исследовали новые районы нашей планеты, в лаборатории и музеи попадали самые разнообразные экзотические существа. Оуэн впервые описал строение гориллы по экземпляру, привезенному из экспедиции в центральную Африку. Он впервые предложил термин "динозавр" — так он назвал ранее неизвестную группу ископаемых, одно из которых было обнаружено в Англии. Изучение всех этих причудливых созданий позволило ему увидеть определенный порядок в кажущемся хаосе биологического разнообразия.

Оуэн открыл, что наши руки и ноги, в том числе кисти и ступни, соответствуют некой общей для многих животных схеме. Анатомы и задолго до Оуэна знали схему строения скелета человеческой руки: одна плечевая кость, две кости предплечья, набор из девяти маленьких косточек запястья и пять пальцев, состоящих из нескольких последовательно соединенных костей. Скелет ноги устроен сходным образом: одна кость, две кости, много маленьких косточек и пять пальцев. Сравнивая эту схему со схемой строения разнообразных

скелетов, привезенных со всего света, Оуэн сделал замечательное открытие.

Гений Оуэна проявился не в том, что он выявил *различия* между разными скелетами. Он открыл и впоследствии пропагандировал в своих лекциях и книгах черту *исключительного сходства* в строении таких непохожих существ, как лягушки и люди. У всех представителей наземных позвоночных конечности, будь то крылья, лапы, ноги или руки, принципиально устроены одинаково. Одна кость, плечевая в передних конечностях и бедренная в задних, соединена суставом с двумя костями, которые в свою очередь соединяются с рядом маленьких косточек, которые соединяются с костями пальцев. Такова схема строения любых конечностей наземных позвоночных. Хотите получить крыло летучей мыши? Сделайте пальцы очень длинными. Ногу лошади? Удлините средний палец и сократите остальные. Ногу лягушки? Удлините кости ноги и срастите некоторые из них друг с другом. Различия между скелетами этих существ состоят в форме и размере костей, а также в числе пальцев и косточек, с которыми они соединяются. Несмотря на существенные изменения функций и облика конечностей, принципиальный план их строения всегда остается одним и тем же.

Открытие общего плана строения конечностей было для Оуэна лишь первым этапом. Исследуя черепа и позвоночники, да и весь скелет разных животных, он везде обнаружил то же самое. Существует фундаментальный план строения скелета, общий для всех позвоночных. Лягушки, летучие мыши, люди и ящерицы представляют собой вариации на одну и ту же тему. По мнению Оуэна, эта тема есть не что иное, как божественный замысел Создателя.

Вскоре после того, как Оуэн опубликовал свои выводы в классической монографии "О природе конечностей", Чарльз Дарвин нашел этим фактам изящное объяснение. Причина, по которой крыло летучей мыши и рука человека обладают общей схемой строения, состоит в том, что летучие мыши и люди происходят от общего предка. То же относится к руке человека и крылу птицы, ноге человека и ноге лягушки – и к любым конечностям любых наземных позвоночных. Между теориями Оуэна и Дарвина есть принципиальная разница: теория Дарвина позволяет нам делать довольно точные предсказания. Следуя Дарвину, мы можем ожидать, что описанный Оуэном план имеет историю, которую можно проследить вплоть до существ, у которых вовсе не было конечностей. Где же нам искать истоки этой схемы? Их

нужно искать в рыбах и в скелетах их плавников.

Обратимся к рыбам

Во времена Оуэна и Дарвина пропасть между плавниками рыб и конечностями наземных позвоночных казалась почти непреодолимой. Между этими органами нет никакого очевидного сходства. Снаружи плавники большинства рыб оторочены перепонкой. Наши конечности не имеют таких перепонок, как и конечности всех других наземных позвоночных, в том числе вторично вернувшихся в воду. Если мы вскрыем плавник и рассмотрим его скелет, сравнить то, что мы увидим, со строением скелета наших конечностей будет ничуть не проще. У большинства рыб нет ничего, что можно было бы сравнить с выявленной Оуэном схемой (кость — две кости — много косточек — пальцы). У всех наземных позвоночных в основании находится одна длинная кость — плечевая в передних конечностях и бедренная в задних. У рыб весь скелет выглядит совсем по-другому. В основании типичного рыбьего плавника расположено четыре или более костей.

В середине XIX века анатомы впервые познакомились с загадочными рыбами, живущими на южных материках. Одна из первых таких рыб была открыта немецкими учеными, работавшими в Южной Америке. Она похожа на обычную рыбу с плавниками и чешуей, но глубже глотки у нее имеются два больших сосудистых мешка — легкие! И все же у этого существа есть чешуя и плавники. Первооткрыватели этого животного были столь озадачены, что дали ему название *Lepidosiren paradoxa*, что означает "парадоксальное чешуйчатое земноводное". Другие рыбы, тоже, как и лепидосирен, наделенные легкими, были вскоре обнаружены в Африке и в Австралии. Они получили название двоякодышащих. Исследователи Африки привезли одну такую рыбу Оуэну. Некоторые ученые, например Томас Гексли и Карл Гегенбаур, находили, что эти рыбы представляют собой что-то вроде гибрида между амфибией и рыбой. Местные жители считали их вкусными.

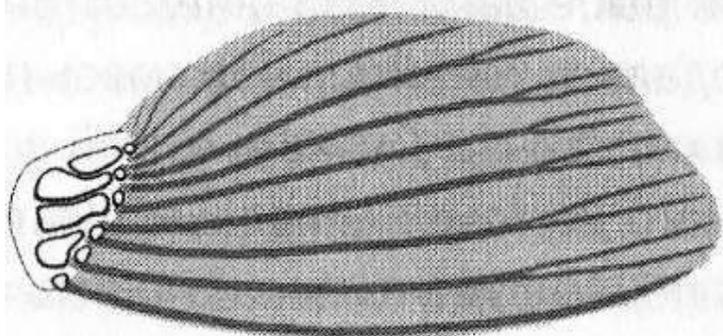
Схема строения скелетной основы плавников этих рыб, в которой на первый взгляд нет ничего особенного, сыграла в науке немалую роль. В основании их плавников находится всего одна кость, которая крепится к лопатке. Для любого анатома сходство с наземными позвоночными очевидно. У нас тоже есть всего одна плечевая кость, которая крепится к лопатке. Стало быть, двоякодышащие — это рыбы, у которых есть

плечевая кость. Примечательно, что эти рыбы, кроме того, обладают легкими. Что это, простое совпадение?

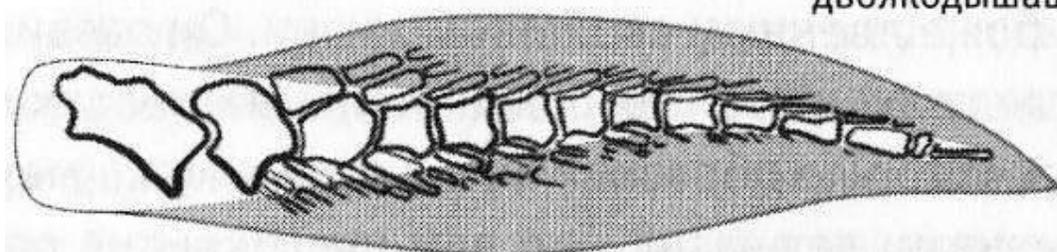
Когда горстка живущих в наши дни видов этой группы стала известна науке XIX века, в распоряжение ученых стали поступать и свидетельства иного рода. Как вы уже, наверное, догадались, речь идет об ископаемых древних рыбах.

Одна из первых таких рыб была обнаружена на берегах полуострова Гаспе в Квебеке (Канада) в породе возрастом около 380 миллионов лет. Этой рыбе дали название *Eusthenopteron*. У эустеноптерона наблюдалась удивительная смесь признаков рыб и земноводных. Из описанных Оуэном костей конечности (кость — две кости — много косточек — пальцы) плавники эустеноптерона содержали первые два элемента (кость — две кости). Стало быть, у некоторых рыб плавники были устроены подобно конечностям позвоночных. Оуэновский архетип не был извечным божественным свойством жизни. Он развился постепенно, и следы его развития сохранились в породах девонского периода, которые образовались в промежутке между 390 и 360 миллионами лет назад. Это важное открытие определяло новую программу для дальнейших исследований: где-то в породах девонского периода нужно искать свидетельства возникновения пальцев.

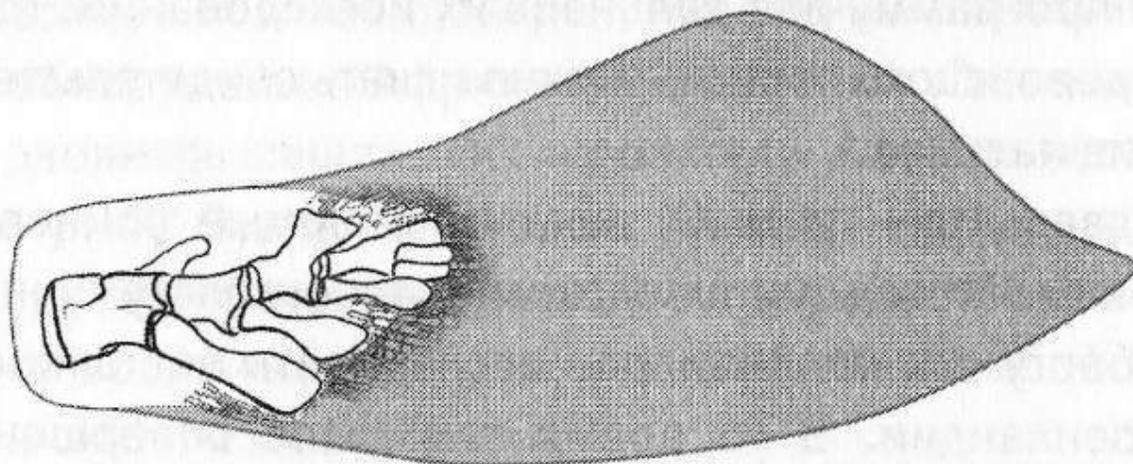
В двадцатые годы XX века ископаемые принесли новые сюрпризы. Молодому шведскому палеонтологу Гуннару Саве-Содербергу посчастливилось исследовать восточное побережье Гренландии. В то время там была совершенная *terra incognita*, но Саве-Содерберг установил, что эта территория необычайно богата девонскими отложениями. Он был одним из немногих палеонтологов-полевиков того времени и благодаря неутомимому духу исследователя и исключительному вниманию к деталям смог добыть за свою недолгую жизнь немало ценных для науки ископаемых. (К сожалению, его жизнь трагически оборвалась: он умер молодым от туберкулеза вскоре после того, как его экспедиции принесли науке ряд поразительных открытий.) В ходе экспедиций, предпринятых в период с 1929 по 1934 год, команда Саве-Содерберга открыла ископаемых, которые в те времена прославились как одно из важнейших недостающих звеньев палеонтологической летописи. Об этом открытии писали газеты всего мира, его высмеивали в карикатурах и обсуждали его важность в редакционных статьях.



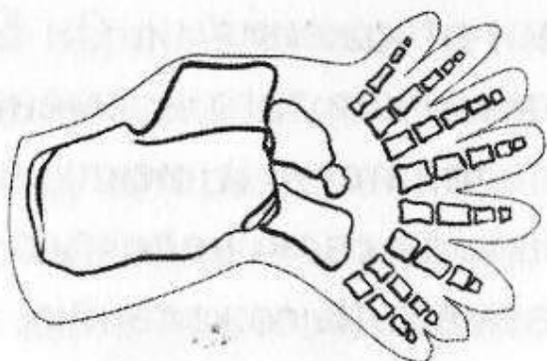
рыба-зебра



двоякодышащая рыба



эустеноптерон



акантостега

У большинства рыб (например, у рыбы-зебры сверху) плавники окружены перепонкой а в их основании находится много косточек. Двоякодышащие рыбы (вторая сверху) привлекли внимание ученых тем что у них как и у нас в основании конечности располагается одна кость. Эустеноптерон (второй снизу) показал как заполнялся промежуток между рыбами и наземными животными: у него уже имеются кости подобные нашему плечу и предплечью, Акантостега (внизу) повторяет структуру конечности эустеноптерона за тем исключением, что у нее уже наличествуют полностью сформированные фаланги пальцев.

Открытые группой Саве-Содерберга ископаемые обладали настоящим калейдоскопом признаков — голова и хвост напоминали рыбы, но конечности были вполне сформированные, как у наземного позвоночного (с развитыми пальцами), а позвонки необычайно похожи на позвонки земноводных. После смерти Саве-Содерберга его друг и коллега Эрик Ярвик описал этих ископаемых, и одно из них получило название *Ichthyostega soderberghi* (ихтиостега Содерберга) в честь Гуннара Саве-Содерберга.

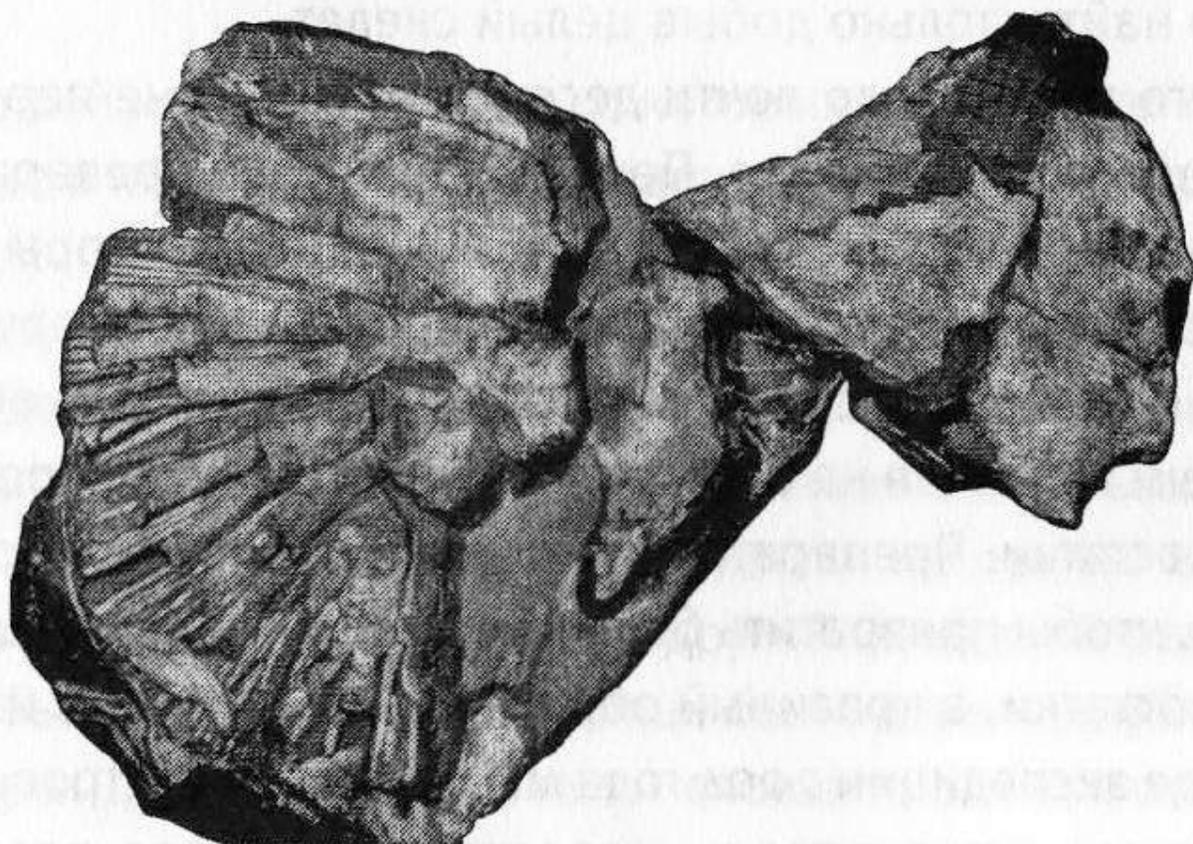
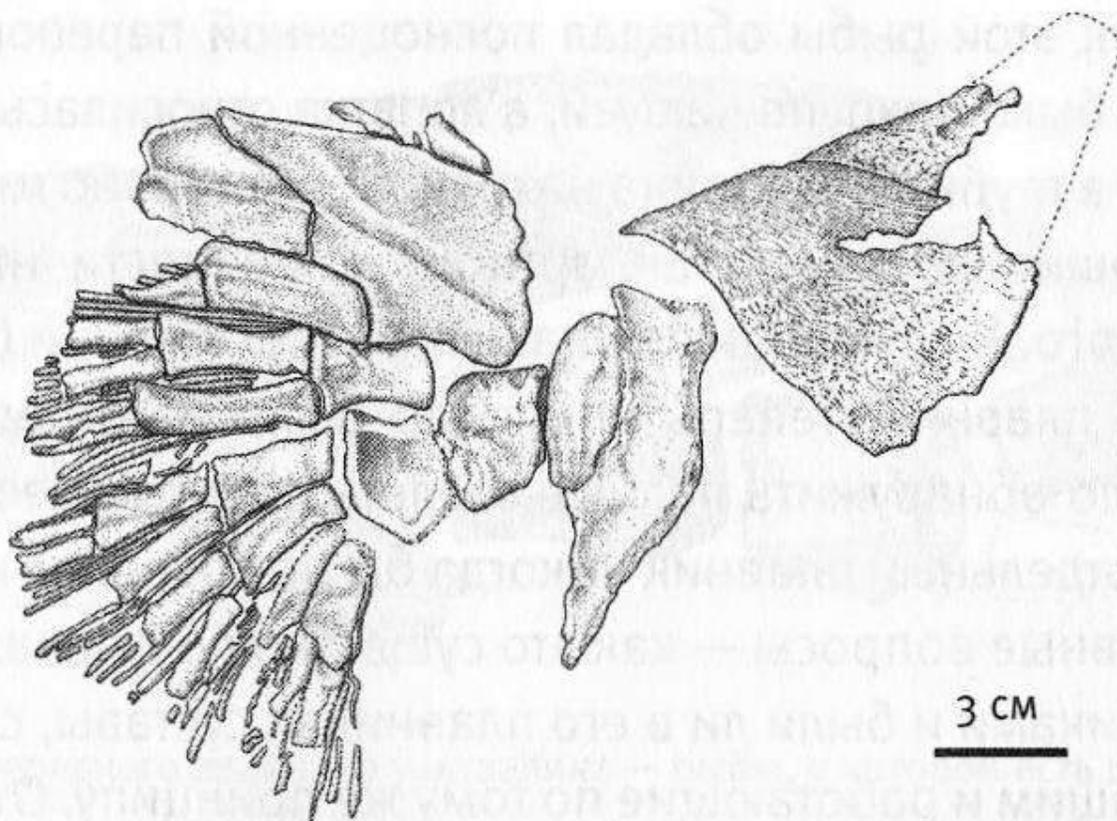
К сожалению, ихтиостега не сильно помогла решению нашей проблемы. По ряду черт строения головы и позвоночника она и правда была весьма примечательной промежуточной формой, но мало говорила о происхождении конечностей, потому что у нее уже были пальцы на ногах, как у всех настоящих амфибий (земноводных). Несколько десятилетий спустя другое открытое Саве-Содербергом ископаемое, которому, когда о нем было объявлено, не уделили особого внимания, позволило сильно продвинуться в решении вопроса о происхождении конечностей наземных позвоночных. Этому второму ископаемому суждено было оставаться загадкой до 1988 года, когда моя коллега-палеонтолог Дженни Клэк, представленная читателям в первой главе, вернулась на исследованные Саве-Содербергом местонахождения и обнаружила там новые остатки этого древнего существа. Это животное было описано по добытым шведским ученым фрагментам еще в двадцатые годы и получило название *Acanthostega gunnari* (акантостега Гуннара). Новые находки позволили выяснить, что у акантостеги тоже были полноценные конечности с развитыми пальцами. Но один из ее признаков оказался настоящим сюрпризом: Дженни Клэк установила, что конечность акантостеги имела форму плавника, подобного лапам тюленя. Исходя из этого Дженни предположила, что древнейшие конечности наземных позвоночных возникли как орган для плавания, а

не для передвижения по суше. Эта идея была ощутимым прорывом, но по-прежнему оставался без ответа вопрос, как именно возникли конечности, ведь у акантостеги были вполне сформированные пальцы, а также запястье и лодыжка и не было свойственной рыбьим плавникам перепонки. Конечности акантостеги были полноценными конечностями наземного позвоночного, хотя и весьма примитивного. Чтобы узнать, как возникли кисти рук и ступни ног, запястье и лодыжка, нужно было искать более древних ископаемых. Так обстояли дела вплоть до 1995 года.

Открытие пальцев и запястий рыб

Как-то раз в 1995 году мы с Тедом Дешлером вернулись домой в Филадельфию, после того как проехали по всей центральной Пенсильвании в поисках новых дорожно-строительных работ. Мы нашли чудесный участок выемки грунта на 15-й трассе к северу от Уильямсфорта, где департаментом транспорта был сотворен гигантский обрыв из песчаника возрастом около 365 миллионов лет. Песчаник здесь взрывали динамитом, и вдоль дороги были оставлены груды больших камней. Это было идеальное место для охоты на ископаемых. Мы вышли из машины и стали ползать по камням, многие из которых были размером с небольшую микроволновую печь. На поверхности некоторых из них попадалась рыба чешуя, и мы решили захватить несколько таких камней с собой в Филадельфию. Когда мы приехали к Теду домой, его четырехлетняя дочка Дейзи выбежала встречать папу и спросила, что мы нашли.

Показывая Дейзи один из камней, мы внезапно осознали, что из него выступает фрагмент плавника крупной рыбы. В поле мы этого почему-то не заметили. Вскоре нам предстояло узнать, что это не обычный рыбий плавник: внутри его было немало костей.



Наш несравненный плавник. К сожалению, нам удалось найти только этот отдельный образец. Рисунок сверху воспроизведен с разрешения Скотта Ролинса (Университет Аркадия). Фото автора.

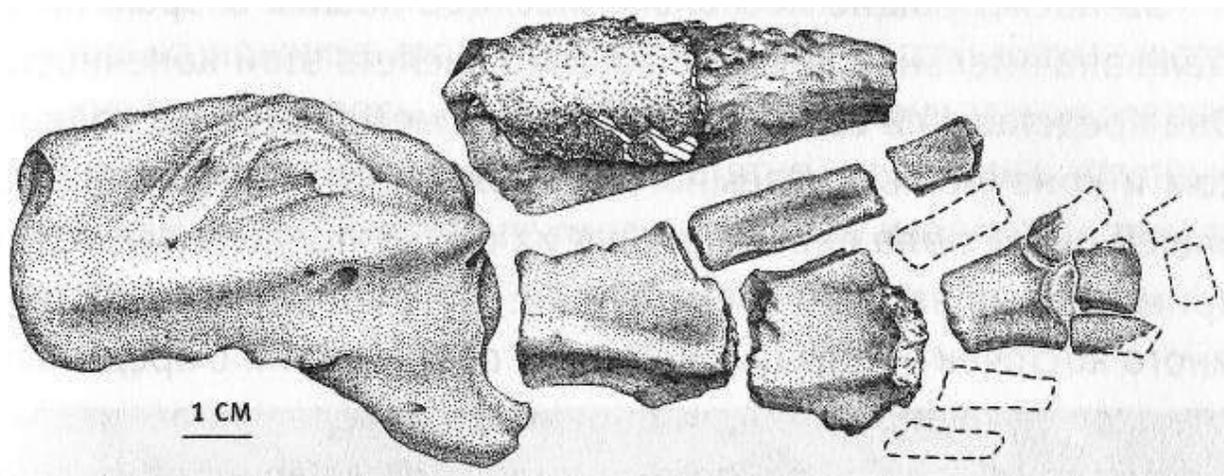
Препараторы в лаборатории потратили около месяца на извлечение скелета этого плавника из камня, и когда он был извлечен, взорам людей впервые предстали остатки скелета рыбы, соответствующие схеме Оуэна. Ближе всего к туловищу располагалась одна кость. К ней крепились еще две. От них отходили шесть рядов небольших костей. По всем признакам это была рыба, наделенная пальцами.

Плавник этой рыбы обладал полноценной перепонкой, его основание было покрыто чешуей, а лопатка относилась к рыбьему типу, но в глубине плавника находились кости, во многом соответствующие костям "стандартной" конечности наземного позвоночного. К сожалению, в нашем распоряжении был лишь отдельный плавник. Теперь нам надо было найти место, где можно было обнаружить полные скелеты таких существ. Единственный отдельный плавник никогда бы не позволил нам ответить на главные вопросы — как это существо пользовалось своими плавниками и были ли в его плавниках суставы, соответствующие нашим и работающие по тому же принципу. Ответ можно было найти, только добыв целый скелет.

На его поиск ушло почти десять лет. И не мне первому посчастливилось увидеть его. Первыми были два препаратора ископаемых, Фред Маллисон и Боб Машек. Препараторы у нас занимаются тем, что с помощью зубоврачебного оборудования удаляют фрагменты породы с собранных нами в поле образцов, тем самым извлекая на свет заключенные в толще породы ископаемые остатки. Препаратору требуются месяцы, а иногда и годы на то, чтобы превратить большой камень, содержащий ископаемые остатки, в красивый образец, доступный для изучения.

В ходе экспедиции 2004 года мы собрали на острове Элсмир три крупных куски породы девонского периода размером с большой предмет ручной клади. В каждом из них были остатки животного с плоской головой: те, что я обнаружил подо льдом на дне карьера, экземпляр Стива и еще один экземпляр, найденный нами в последнюю неделю экспедиции. В полевых условиях мы очистили головы этих ископаемых и извлекли окружавшие их крупные куски породы, чтобы в лабораторных условиях исследовать строение тела этих существ. Затем образцы были упакованы в гипс для транспортировки. Когда в

лаборатории с образцов снимают гипс, это похоже на вскрытие капсулы с посланием из прошлого.



Кости переднего плавника тиктаалика — рыбы, у которой есть запястье.

В этом гипсе заключены фрагменты нашей жизни в Арктике, о которых у нас также имеются сделанные в поле заметки, посвященные каждому собранному образцу. Когда мы снимаем гипс, образцы пахнут тундрой.

Фред в Филадельфии и Боб в Чикаго одновременно удаляли породу с двух разных образцов. Из одного из них Боб извлек маленькую косточку, входившую в состав плавника большой рыбы (тогда мы еще не назвали ее тиктааликом). Но вот что отличало эту кубическую косточку от любой другой известной ранее косточки рыбьего плавника: на ее конце был сустав с углублениями для четырех других костей. Иными словами, эта косточка была поразительно похожа на кость запястья. К сожалению, плавники образца, с которым работал Боб, слишком плохо сохранились, чтобы можно было сказать что-то большее. Новые данные пришли неделей позже из Филадельфии. Фред, пользуясь своими зубоврачебными инструментами, как по волшебству извлек из камня остатки целого плавника. Как раз на правильном месте, на конце плечевой кости, в этом плавнике была *та самая* косточка. И к *той самой* косточке крепились четыре следующих. Нашим взорам предстало свидетельство происхождения части наших собственных тел, заключенное в рыбе возрастом 375 миллионов лет. Мы нашли рыбу, у которой было запястье.

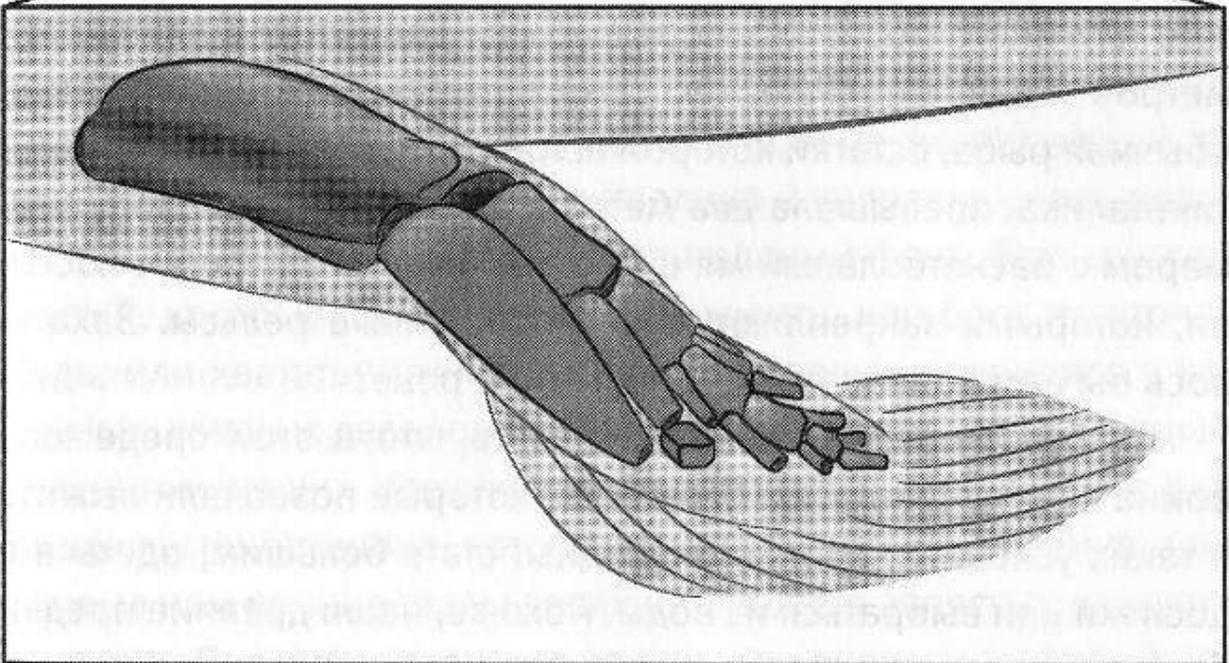
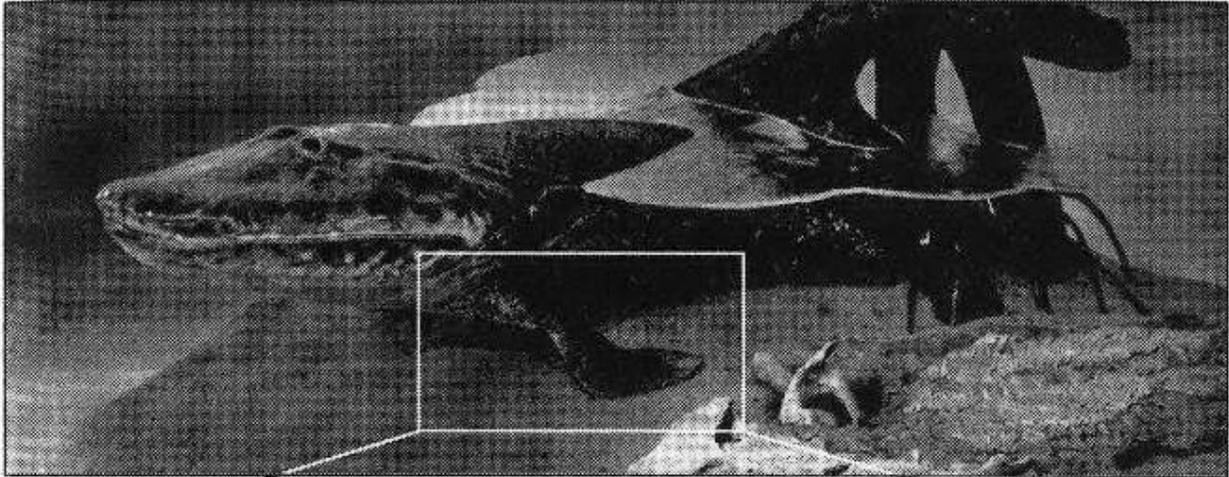
За последующие несколько месяцев нашим взорам предстала

значительная часть остального скелета этой конечности. Она представляла собой нечто среднее между рыбьим плавником и конечностью наземного позвоночного. На плавниках у нашей рыбы была перепонка, но их скелет представлял собой примитивный вариант схемы Оуэна: одна кость — две кости — много косточек — пальцы. В полном соответствии с предсказанием, следующим из теории Дарвина, в определенном месте и в отложениях определенного времени мы нашли форму, промежуточную между двумя разными группами животных.

Находка этого плавника была лишь первой частью нашего открытия. Самое интересное для Теда, Фэриша и меня началось, когда мы стали разбираться с функциями и работой этого плавника и выдвигать гипотезы о том, почему в нем вообще возник сустав запястья. Решение этих проблем можно найти, изучая строение костей и соединяющих их суставов.

Когда мы разобрали по частям скелет плавника тиктаалика, мы обнаружили нечто весьма примечательное: поверхности костей в каждом суставе очень хорошо сохранились. У тиктаалика были лопатка, плечо, предплечье и запястье, состоящие из тех же костей, что и соответствующие части человеческой руки. Изучая строение суставов, соединяющих эти кости, чтобы понять, как они двигались друг относительно друга, мы убедились, что конечности тиктаалика были приспособлены для выполнения довольно необычной функции: эта рыба могла отжиматься.

Когда мы отжимаемся, ладони наших рук прижаты к земле, руки согнуты в локтях, и мы поднимаем и опускаем туловище с помощью грудных мышц. Тело тиктаалика позволяло ему проделывать то же самое упражнение. Конечности могли сгибаться в локтях, как наши руки, а запястье позволяло отогнуть конец плавника в сторону, так что рыба "ладонь" прижималась к земле. Что же до грудных мышц, у тиктаалика они были, по-видимому, прекрасно развиты. Если мы посмотрим на его лопатки и на нижнюю сторону его плечевых костей в том месте, где они соединялись друг с другом, мы увидим массивные гребни и борозды, к которым, вероятно, крепились крупные грудные мышцы. Тиктаалик умел выполнять известный приказ "упал-отжался"!



Реконструкция тиктаалика в натуральную величину (вверху) и рисунок его плавника (внизу). В этом плавнике есть плечо, предплечье и протозапястье, которые позволяли тиктаалику выполнять что-то вроде отжиманий.

Зачем рыбе могло понадобиться отжиматься? Чтобы разобраться в этом, рассмотрим все ее тело. Плоская голова с глазами наверху и ребра, по-видимому, говорят нам о том, что тиктаалик мог успешно передвигаться по дну на мелководьях рек или озерков и даже шлепать по грязи возле берега. Плавники, позволяющие поддерживать тело,

помогали бы рыбе сохранять маневренность во всех этих средах. Эта интерпретация также соответствует геологическим особенностям места, где мы нашли ископаемые остатки тиктаалика. Строение слоев здешних горных пород и зернистая структура самих этих пород обладают характерными признаками отложений, оставленных неглубокой рекой, окруженной обширной, регулярно заливаемой поймой.

Но зачем вообще жить в подобной среде? Что могло заставить рыбу покинуть толщу воды и поселиться на мелководьях? Подумайте вот о чем: едва ли не все рыбы, жившие в реках в те далекие времена, 375 миллионов лет назад, были хищниками того или иного рода. Некоторые из них достигали в длину пяти метров — вдвое больше, чем самый крупный тиктаалик. Самая обычная рыба, остатки которой встречаются рядом с остатками тиктаалика, превышала два метра в длину и имела голову размером с баскетбольный мяч. Ее зубы были размером с костыли, которыми закрепляют железнодорожные рельсы. Захотелось бы вам поплавать в этой древней реке?

Не будет преувеличением сказать, что в этой среде шла война всех против всех. Стратегии, которые позволяли выжить в таких условиях, вполне очевидны: стать большим, одеться в доспехи или выбраться из воды. Похоже, наши древние предки были не из тех, кто лезет в драку.

Эта склонность наших предков избегать конфликтов имеет для нас огромное значение. Мы можем найти истоки структур наших собственных конечностей в плавниках этих рыб. Подвигайте кистью руки, сгибая и разгибая руку в запястье. Сожмите и разожмите пальцы. Делая это, вы пользуетесь суставами, впервые возникшими в плавниках рыб вроде тиктаалика. До этого таких суставов не было. После этого мы находим их в конечностях наземных позвоночных.

Перейдем от тиктаалика к амфибиям и дальше, к млекопитающим, и нам станет совершенно ясно, что древнейшие обладатели костей нашего плеча и предплечья и даже нашего запястья и кисти руки обладали также чешуей и перепонкой на плавниках. Эти существа были рыбами.

Что нам дает этот план строения, одна кость — две кости — много косточек — пальцы, который Оуэн считал замыслом Создателя? У некоторых рыб, например двоякодышащих, у основания скелета плавников тоже имеется одна кость. У других, например у эустеноптерона, есть уже конструкция "одна кость — две кости". Далее идут существа вроде тиктаалика, у которых есть одна кость, две кости и много косточек. В наших конечностях заключена не одна рыба, а целый

аквариум. Фундаментальный план Оуэна был разработан рыбами.

Хотя тиктаалик, по-видимому, действительно мог отжиматься, он никак не мог играть в бейсбол или на фортепиано и ходить на двух ногах. Путь от тиктаалика к человеку очень долог. Но вот важный и во многом удивительный факт: большинство костей, которые позволяют людям ходить, или бросать что-нибудь, или хватать что-нибудь рукой, впервые появились у животных, живших десятки и сотни миллионов лет назад. Предшественники наших плечевых и бедренных костей были у рыб вроде эустеноптерона, которому 380 миллионов лет. Тиктаалик открыл нам ранние этапы эволюции нашего запястья, ладони и пальцев. Первые настоящие пальцы мы видим у амфибий, которым 365 миллионов лет, таких как акантостега. Наконец, полный комплект всех костей человеческого запястья и лодыжки впервые встречается у рептилий возрастом 250 миллионов лет. Скелет наших рук и ног формировался за сотни миллионов лет, сперва в плавниках рыб, затем в конечностях амфибий и рептилий.

Но в чем состояли те важнейшие изменения скелета, которые позволили нам пользоваться руками и ходить на двух ногах? Как они происходили? Давайте обратимся к двум простым примерам о конечностях, чтобы отчасти ответить на эти вопросы.

Мы, люди, как и многие другие млекопитающие, можем вращать большим пальцем руки относительно предплечья. Это нехитрое умение очень важно для использования рук в повседневной жизни — представьте, как сложно нам было бы есть, писать или бросать мяч, если бы наша кисть была зафиксирована неподвижно. Мы обладаем этой способностью потому, что одна из костей предплечья, лучевая, вращается относительно оси, проходящей через локтевой сустав. Его строение на удивление хорошо приспособлено для этого. В конце плечевой кости располагается шарик. Кончик лучевой кости, закрепленный здесь, снабжен красивым маленьким углублением, в которое входит участок поверхности шарика. Этот шаровой шарнир и позволяет нам вращать кистью руки. Такое движение называют "пронация" (вращательное движение кисти снаружи внутрь — правая рука при этом будет двигаться, соответственно, против часовой стрелки, левая — по часовой стрелке) и "супинация" (в обратном направлении). У кого мы находим истоки этой способности? У существ вроде тиктаалика. У тиктаалика на конце локтевой кости располагается удлиненное утолщение, с которым соединяется углубление на конце лучевой кости. Когда тиктаалик сгибал конечность в локте, кончик его

радиальной кости вращался (пронатировал) относительно локтя. Стадии совершенствования этой способности мы наблюдаем у амфибий и рептилий, у которых конец плечевой кости превращается в настоящий шарик, почти такой же, как у нас.

Обратимся теперь ко второй паре конечностей. Здесь мы найдем ключевой признак, который позволяет нам ходить.

Этот признак есть не только у нас, но и у других млекопитающих. В отличие от рыб и амфибий у нас колени и локти смотрят в разные стороны. Это отличие принципиально: представьте себе, каково было бы ходить, если бы колени смотрели назад. Совсем другую картину мы видим у рыб вроде эустеноптерона, у которых сочленения, соответствующие нашим коленям и локтям, смотрят по сути в одну и ту же сторону. В ходе внутриутробного развития колени и локти у нас поворачиваются и занимают положение, свойственное человеку.

Когда мы ходим на двух ногах, движения наших бедер, коленей, лодыжек и ступней несут наше тело вперед в выпрямленном положении, совсем не похожем на приземленную позу таких существ, как тиктаалик. Принципиальная разница заключается в положении бедра. Наши ноги не торчат в стороны, как ноги крокодила или амфибии или плавники рыбы: они направлены вниз, под туловище. Положение ног поменялось благодаря изменениям тазобедренного сустава, таза и бедра: наш таз приобрел форму чаши, вертлужная впадина тазобедренного сустава, в которой крепится бедро, углубилась, а само бедро обрело свою характерную шейку, которая позволяет ему быть направленным вниз, а не вбок от туловища.

Означают ли эти факты нашей древней истории, что людей нельзя считать особенными и уникальными среди других живых существ? Конечно, нет. Напротив, знания о глубоких корнях человечества делают факт нашего существования еще примечательнее: все наши экстраординарные способности развились на основе признаков, выработанных в ходе эволюции древними рыбами и другими животными. Из общих для многих животных частей возникла поистине уникальная конструкция. Мы не отделены пропастью от мира прочих живых существ — мы являемся его частью до мозга костей и, как мы вскоре убедимся, даже до генов, заключенных в наших клетках.

Оглядываясь назад я понимаю, что тот момент, когда я впервые увидел запястье рыбы, означал для меня не меньше, чем тот, когда я освободил от марли пальцы трупа на практических занятиях по анатомии человека. В обоих случаях я открыл для себя глубокую связь

между мной самим и другим существом.

Глава 3. Ручные гены.

В июле 2004 года, пока мы с моими коллегами добывали в Арктике первые образцы тиктаалика, Рэнди Дан, молодой сотрудник моей лаборатории, трудился в поте лица в Чикаго над генетическими экспериментами с зародышами акул и скатов. На морских пляжах нередко можно встретить небольшие черные яйцевые коконы, которые называют "кошельками русалок". Внутри такого "кошелька" заключено содержащее желток яйцо, в котором развивается эмбрион (зародыш) ската. За годы работы Рэнди провел многие сотни часов, экспериментируя с эмбрионами, заключенными в этих яйцевых коконах, нередко продолжая работу далеко за полночь. В то решающее лето 2004 года Рэнди занимался тем, что с помощью шприца вводил в исследуемые яйца химический аналог витамина А. После этого он оставлял зародыши развиваться в течение нескольких месяцев, пока они не вылуплялись из яйца.

Такие опыты могут показаться странным способом проводить большую часть года, тем более для молодого ученого, планирующего успешную научную карьеру. Почему акулы и скаты? Почему витамин А?

Чтобы объяснить, в чем смысл этих экспериментов, надо вернуться на шаг назад и посмотреть, на какие вопросы они могут ответить. В этой главе мы наконец добрались до рецепта, записанного в нашей ДНК, по которому из единственной яйцеклетки развивается все наше тело. В момент оплодотворения яйцеклетки сперматозоидом у нее нет, например, маленьких рук, из которых развились бы руки эмбриона. Руки будут построены на основании информации, содержащейся в яйцеклетке. Здесь мы подходим к очень глубокой проблеме. Одно дело — сравнивать скелет наших рук со скелетом рыбьих плавников. Но что может дать нам сравнение генетического рецепта, по которому формируются наши руки, с рецептом, по которому формируются рыбьи плавники? Чтобы вместе с Рэнди найти ответ на этот вопрос, надо познакомиться с чередой открытий, которые позволили увидеть общие корни наших рук, акульих плавников и даже мушиных крылышек.

Как мы уже убедились, прорубить широкое окно в наше далекое прошлое позволяет открытие существ, которые часто демонстрируют упрощенные варианты наших тел внутри своих. Мы не можем ставить эксперименты с давно вымершими животными. А эксперименты —

великая вещь, потому что они позволяют манипулировать условиями и смотреть, как это скажется на результатах. По этой причине моя лаборатория разделена на два подразделения: половина занимается ископаемыми, а другая половина — зародышами и ДНК. Вот такое у нашей лаборатории раздвоение личности. Закрытое на замок хранилище, где лежат ископаемые остатки тиктааликов, соседствует с морозильной установкой, где хранятся наши драгоценные образцы ДНК.

Эксперименты с ДНК обладают огромным потенциалом для поиска в себе рыбы. Что если поставить такой эксперимент: обрабатывать рыбий зародыш разными химическими веществами и добиться, чтобы его плавник стал отчасти похож на нашу руку? Или эксперимент, который показал бы, что гены, отвечающие за формирование рыбьих плавников, по сути соответствуют генам, отвечающим за формирование наших рук?

Начнем с очевидной загадки. Наше тело состоит из клеток сотен разных типов. Разнообразие клеток определяет строение и функции наших тканей и органов. Клетки, из которых состоят наши кости, нервы, кишечник и другие органы, выглядят и ведут себя совершенно по-разному. Несмотря на эти различия, у всех клеток нашего тела есть одно фундаментальное общее свойство: в них содержится совершенно одинаковая ДНК. Если в ДНК записана информация о том, как должны развиваться наше тело, его ткани и органы, почему же в таких разных клетках, как те, из которых состоят мышцы, нервы и кости, содержится одинаковая ДНК?

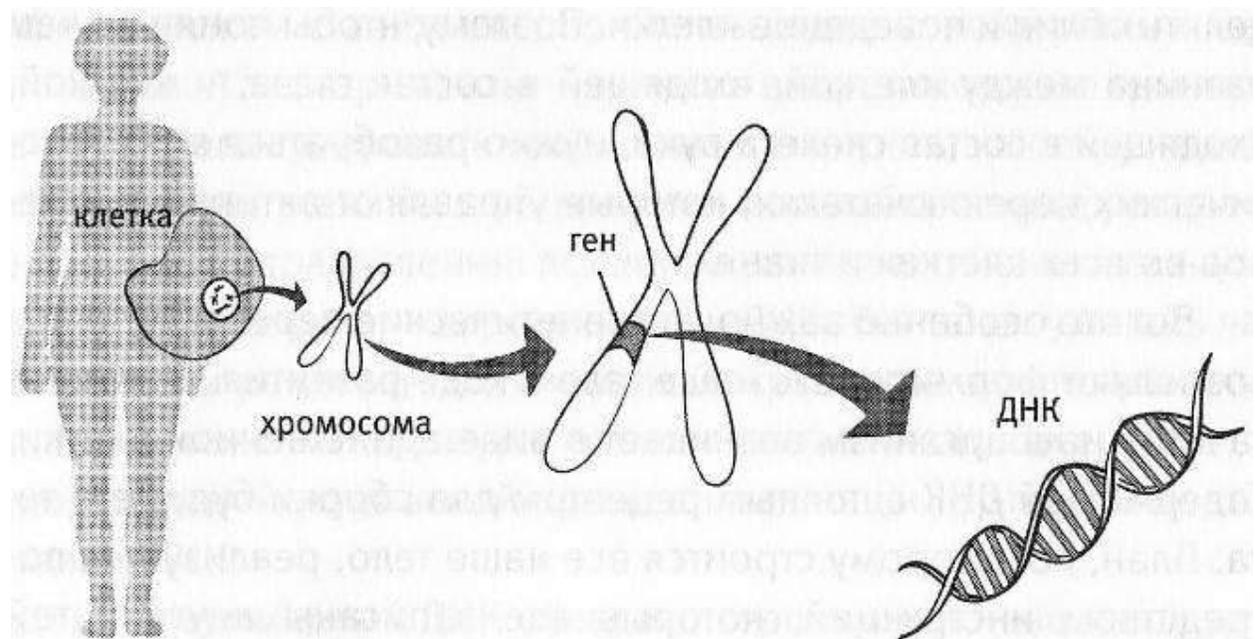
Ответ на этот вопрос состоит в том, что в разных клетках включены и работают разные фрагменты ДНК (гены). Клетка кожи отличается от нейрона (нервной клетки) тем, что в этих клетках работают разные гены. Когда ген включен, по записанному в нем рецепту синтезируется белок, который может определять облик и поведение клетки. Поэтому, чтобы понять, в чем разница между клеткой, входящей в состав глаза, и клеткой, входящей в состав скелета руки, нужно разобраться в тех генетических переключателях, которые управляют активностью генов во всех клетках и тканях.

Вот что особенно важно: эти генетические переключатели и позволяют формировать наше тело в ходе развития. В момент зачатия наш организм возникает в виде единственной клетки, содержащей ДНК с полным рецептом для сборки будущего тела. План, по которому строится все наше тело, реализуется посредством инструкций, которые все записаны внутри этой единственной микроскопической клетки.

Чтобы пройти путь от простой яйцеклетки до всего человека, состоящего из триллионов специализированных клеток, выстроенных в правильном порядке, на строго определенных этапах развития должны включаться и выключаться целые батареи генов. Как симфония, которая получается из того, что множество отдельных инструментов исполняет разные ноты, человеческое тело формируется за счет работы множества генов, включаемых и выключаемых внутри каждой клетки в ходе нашего развития.

Возможность работать с генами — неоценимый подарок для тех, кто изучает строение и работу живых организмов. Благодаря этой возможности мы можем сравнивать действие разных генов и выяснять, какие изменения происходят под их действием при формировании новых органов в процессе развития. Возьмем, к примеру, конечности. Сравнивая набор генов, работающих в клетках формирующегося рыбьего плавника, с набором генов, работающих в клетках развивающейся человеческой руки, мы можем установить, какие различия есть между плавником и рукой на генетическом уровне.

Гены — это отрезки ДНК, содержащейся в каждой клетке нашего тела.



Такое сравнение позволяет нам выявить возможных виновников — генетические переключатели, изменение которых могло привести к превращению плавников в конечности наземного позвоночного. После этого мы можем изучить работу этих генов в организме эмбриона и

попытаться выяснить, как именно они изменились. Можно ставить даже такие эксперименты — манипулировать работой генов и смотреть, как меняется организм эмбриона под действием определенных условий или веществ.

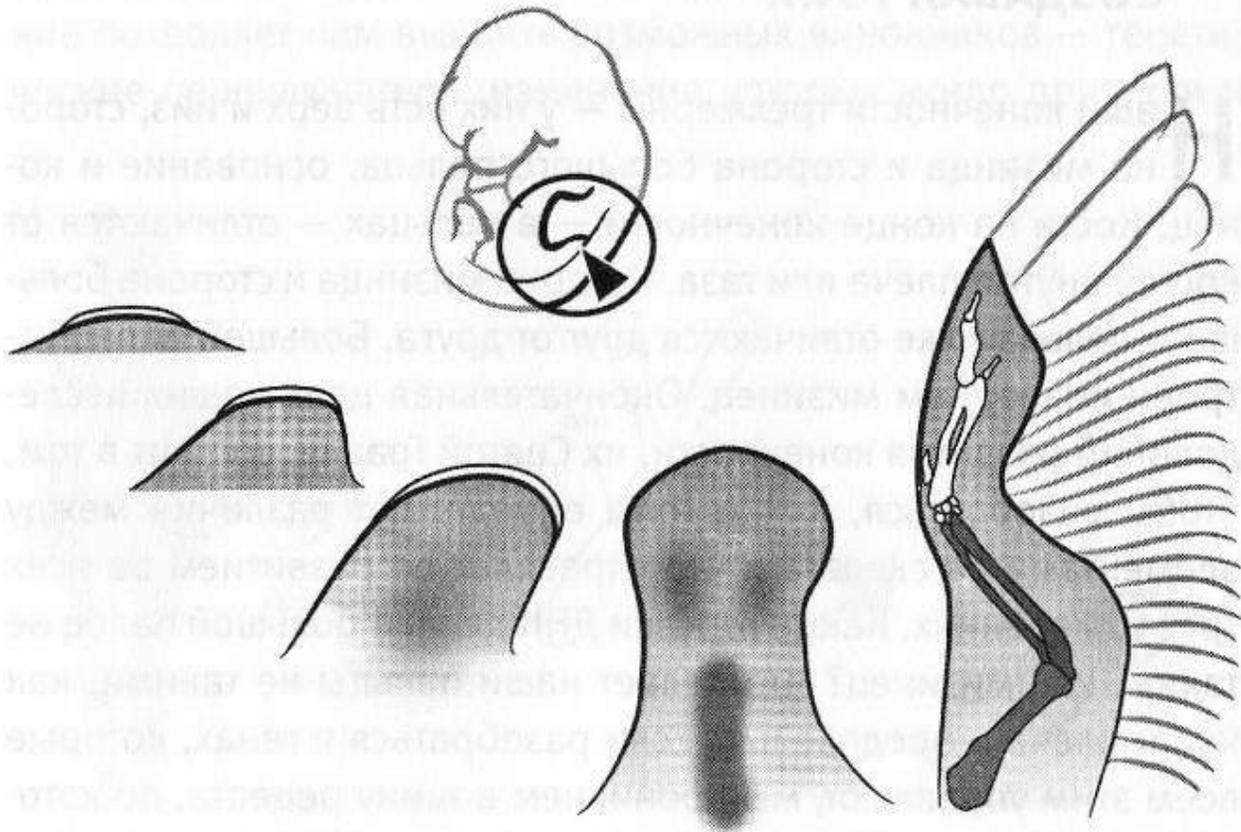
Чтобы разобраться в том, в каких генах записан рецепт формирования наших рук и ног, мы должны действовать подобно криминалистам из телесериала "C.S.I.: Место преступления" — начинать с тела и докапываться до сути. Мы начнем с того, что рассмотрим строение наших конечностей, а затем перейдем к тканям, клеткам и генам, которые это строение определяют.

Создавая руки

Наши конечности трехмерны — у них есть верх и низ, сторона мизинца и сторона большого пальца, основание и конец. Кости на конце конечности — в пальцах — отличаются от костей внутри плеча или таза. Сторона мизинца и сторона большого пальца тоже отличаются друг от друга. Большой палец устроен иначе, чем мизинец. Окончательная цель наших исследований развития конечности, их Святой Грааль, состоит в том, чтобы разобраться, какие гены определяют различия между элементами ее скелета и что управляет ее развитием во всех трех измерениях. Какие отрезки ДНК делают большой палец не таким, как мизинец? Что делает наши пальцы не такими, как кости плеча и предплечья? Если разобраться в генах, которые всем этим управляют, мы проникнем в тайну рецепта, по которому формируется наше тело.

Все генетические переключатели, определяющие формирование пальцев, запястья, костей плеча и предплечья, срабатывают в период с третьей по восьмую неделю после зачатия. В самом начале своего развития человеческие конечности представляют собой крошечные зачатки в виде выростов на поверхности тела эмбриона. Две недели эти выросты увеличиваются в размерах, пока на конце их не образуется уплощенное расширение. Внутри этого расширения располагаются миллионы клеток, из которых в конечном итоге разовьются скелет, нервы и мышцы, которыми человек будет пользоваться всю оставшуюся жизнь.

Для изучения процессов формирования всех этих структур нужно исследовать строение эмбрионов и иногда вмешиваться в процесс их развития, чтобы выяснять, что происходит, когда развитие идет как-то неправильно. Кроме того, нужно исследовать различных мутантов, их внутреннее строение и их гены, иногда на материале специально выведенных мутантных пород.



Развитие конечности на примере крыла цыпленка. Все ключевые стадии развития скелета крыла проходят внутри яйца.

Конечно, нельзя изучать такими методами людей. Главная задача ученых, которые первыми начинали подобные исследования, состояла в том, чтобы найти таких животных, исследование которых откроет нам тайну нашего собственного развития. Пионеры экспериментальной эмбриологии, занявшиеся развитием конечностей в тридцатые и сороковые годы прошлого века, столкнулись с несколькими проблемами. Им нужно было выбрать организм, у которого конечности зародыша были бы доступны для изучения и экспериментов. Этот зародыш должен быть сравнительно крупным, потому что иначе с ним нельзя работать хирургическими методами. Также немаловажно, чтобы этот зародыш развивался в условиях, защищающих его от воздействия сотрясений и других внешних факторов. Кроме того, и это совершенно необходимо, зародыши должны быть доступны круглый год и в большом количестве. Вполне закономерно, что ученые остановили свой выбор на объекте, который мы покупаем в магазине, — на курином яйце.

В пятидесятые и шестидесятые годы некоторые биологи, в том

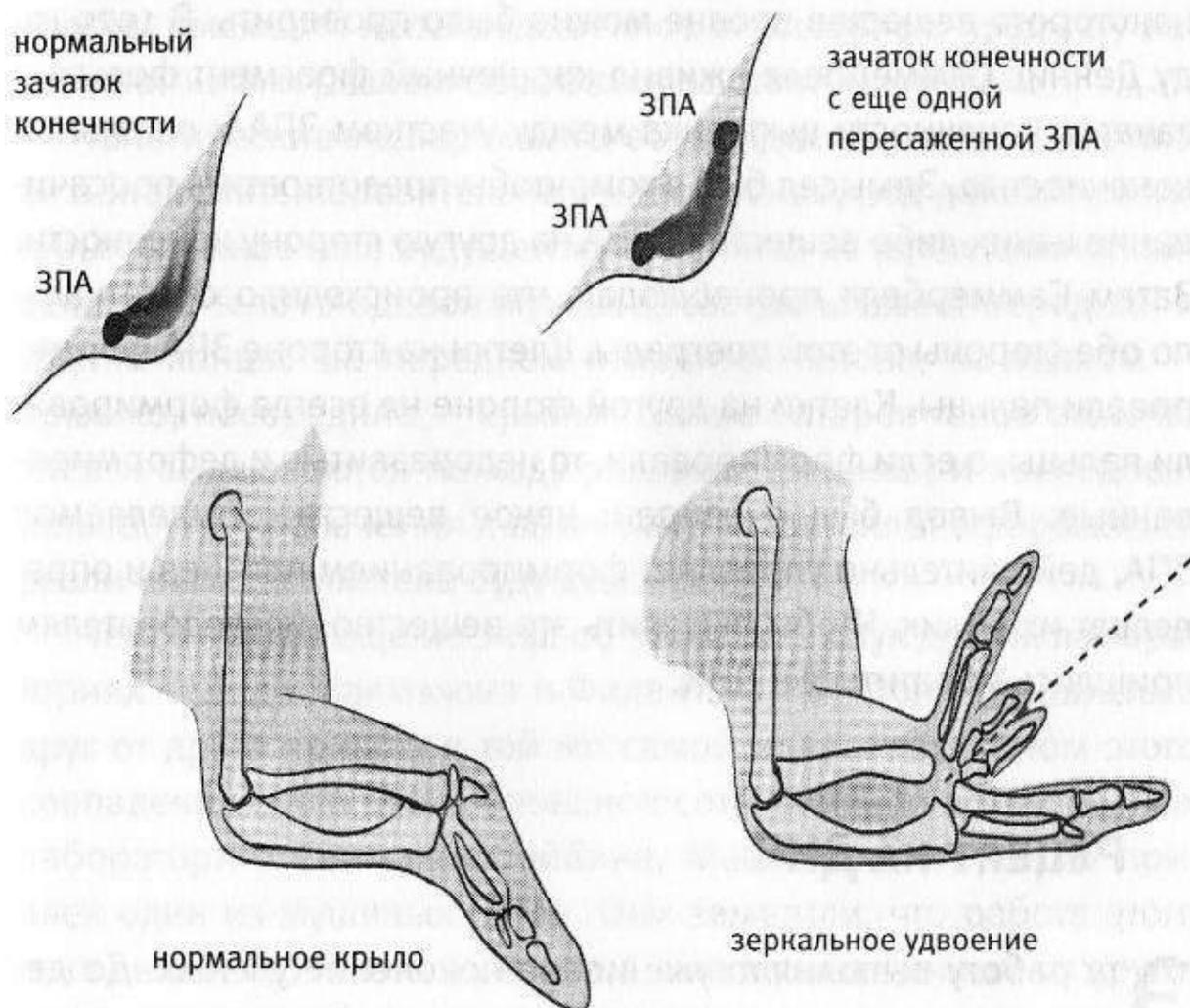
числе Эдгар Цвиллинг и Джон Сондерс, провели ряд остроумных экспериментов на куриных яйцах, чтобы разобраться в том, как формируется структура скелета. Куриные эмбрионы в то время буквально разбирали и собирали по кусочкам. Их оперировали, перемещая на другие места фрагменты разных тканей, чтобы увидеть, как это скажется на развитии эмбриона. Такой подход предполагал использование тончайших методов микрохирургии и манипуляций с кусочками тканей толщиной не больше миллиметра. Пользуясь этими методами, Цвиллинг и Сондерс выявили некоторые ключевые механизмы, лежащие в основе формирования таких разных конечностей, как птичьи крылья, ласты китов и человеческие руки.

Они открыли два небольших участка ткани, которые управляют всем развитием скелетных структур внутри конечности.

Более того, крошечная полоска ткани на самом конце зачатка по сути управляет *вообще всем* процессом развития конечности. Стоит удалить эту полоску, и развитие останавливается. Если удалить ее на раннем этапе, у зародыша разовьется только плечо или его часть. Если удалить немного позже, разовьется плечо и предплечье. Если удалить еще позже, конечность сформируется почти полностью, но пальцы будут короткими и деформированными.

Еще один эксперимент, впервые поставленный Мэри Гасселинг в лаборатории Джона Сондерса, открыл новое перспективное направление исследований. Возьмем небольшой участок ткани с той стороны зачатка конечности, где должна сформироваться сторона мизинца, на раннем этапе развития и пересадим этот участок на противоположную сторону зачатка, чуть пониже того места, где должен сформироваться первый палец. Дадим зародышу цыпленка развиваться дальше и сформировать крыло — и получим результат, который когда-то почти для всех оказался откровением. Крыло цыпленка развилось целиком, но у него был *полностью удвоенный набор пальцев*. Кроме того, что еще примечательнее, дополнительный набор пальцев был зеркальным отражением нормального набора. Очевидно, что-то внутри этого участка ткани, какое-то вещество или ген, направляло процесс формирования всех пальцев конечности. Это открытие вызвало настоящую лавину новых экспериментов, которые позволили узнать, что точно такого же эффекта можно добиться и множеством других способов. Например, можно взять куриный эмбрион и вколоть немного витамина А в зачаток его конечности или просто ввести витамин А в яйцо и дать цыпленку развиваться дальше. Если ввести витамин А в

определенном количестве и на определенном этапе развития, можно получить такие же зеркально удвоенные конечности, как в опытах Гасселинг, Сондерса и Цвиллинга с пересадкой участка ткани. Этот участок назвали зоной поляризующей активности (ЗПА). По сути ЗПА и служит тем фактором, который делает сторону мизинца отличной от стороны большого пальца. Разумеется, у цыпленка нет ни настоящего мизинца, ни настоящего большого пальца, потому что пальцы в птичьих крыльях редуцированы. Мы пользуемся этими терминами условно, для обозначения тех сторон конечности, где у наделенных пятью пальцами позвоночных образуются пятый и первый пальцы соответственно.



Пересадка небольшого участка ткани, так называемой ЗПА, приводит к удвоению пальцев

Эти открытия вызвали немалый интерес: получалось, что ЗПА

каким-то образом управляла образованием пальцев. Но как? Некоторые ученые считали, что клетки ЗПА производят вещество, которое затем распространяется по зачатку конечности, указывая клеткам, какие пальцы им формировать. Главная идея была в том, что в основе всего этого явления могло лежать действие какого-то неизвестного вещества. В участках, близких к ЗПА, где концентрация этого вещества высока, клетки реагируют формированием мизинца. На противоположной стороне развивающейся руки, далеко от ЗПА, это вещество разбавлено, и клетки реагируют на это формированием большого пальца. Клетки, расположенные посередине, тоже реагируют соответственно концентрации этого вещества, формируя указательный, средний и безымянный пальцы.

Идею зависимости формирования пальцев от концентрации некоторого вещества вполне можно было проверить. В 1979 году Деннис Саммербелл вживил крошечный фрагмент фольги в зачаток конечности цыпленка между участком ЗПА и остальной конечностью. Замысел был в том, чтобы предотвратить просачивание каких-либо веществ от ЗПА на другую сторону конечности. Затем Саммербелл пронаблюдал, что происходило с клетками по обе стороны от этой преграды. Клетки на стороне ЗПА формировали пальцы. Клетки на другой стороне не всегда формировали пальцы, а если формировали, то недоразвитые и деформированные. Вывод был очевиден: некое вещество, выделяемое ЗПА, действительно управляет формированием пальцев и определяет их облик. Чтобы выделить это вещество, исследователям пришлось обратиться к ДНК.

Рецепт на ДНК

Эту работу выполняло уже новое поколение ученых. До девяностых годов прошлого века, когда стали доступны новые молекулярные технологии, ученым не удавалось выяснить, какие гены управляют действием ЗПА.

Важный прорыв был сделан в 1993 году, когда охотой на эти гены занялись в лаборатории Клиффа Тейбина в Гарварде. Целью этой охоты было выяснить, какие молекулярные механизмы дают ЗПА способность делать мизинец непохожим на большой палец. К тому времени, когда группа Тейбина начала работу в начале девяностых, ряд экспериментов вроде тех, что я описал выше, привел ученых к убеждению, что в основе всего этого явления лежало какое-то вещество. Великолепная теория, если не считать того, что никто не знал, что это за вещество. Люди предлагали на эту роль то одно соединение, то другое и всякий раз убеждались, что эти вещества не оказывают искомого действия. Наконец сотрудники лаборатории Тейбина применили другой подход, имеющий непосредственное отношение к предмету нашей книги. Они решили обратиться за ответом к мухам.

Генетические эксперименты восьмидесятых годов позволили обнаружить поразительный набор генов, под действием которых сложное тело будущей мухи лепится из единственной яйцеклетки. Тело плодовой мушки дрозофилы имеет передний и задний концы. На переднем находится голова, на заднем — брюшко, посередине — крылья. Целые батареи генов включаются и выключаются по ходу развития личинки, и последовательность их включения и выключения позволяет оформляться различным частям тела будущей мухи.

Тейбин тогда еще не знал об этом, но в двух других лабораториях — Энди Макмэхона и Филадельфии Ингама — тоже независимо друг от друга пришли к той же самой идее. Результатом этого совпадения стало очень успешное сотрудничество трех разных лабораторий. Внимание Тейбина, Макмэхона и Ингама привлек один из мушиных генов. Они заметили, что работа этого гена делает один конец сегмента тела мухи отличным от другого. Генетики, работающие с дрозофилами, назвали этот ген "*hedgehog*" (то есть "ежик"). Разве не напоминает работа "ежика" в ходе формирования тела мухи — делать один участок тела непохожим на другой — работу ЗПА, которая делает мизинец непохожим на большой

палец? От сотрудников трех лабораторий не ускользнуло это сходство. И они взялись за дело, разыскивая ген *hedgehog* в клетках таких животных, как куры, мыши и рыбы.

В этих лабораториях знали, как устроен ген *hedgehog* у мух, и сравнивали его с генами курицы, чтобы найти похожий. Каждый ген обладает определенной последовательностью составляющих его элементов (нуклеотидов). Молекулярные методы позволили исследователям "просматривать" ДНК курицы в поисках такой же последовательности, как в гене *hedgehog*. После долгих проб и ошибок им наконец удалось найти куриный аналог гена *hedgehog*.

Точно так же, как палеонтологи дают названия новым открытым видам, генетики дают названия новым генам. Генетики, занимавшиеся мухами-дрозофилами и открывшие ген *hedgehog*, назвали его так потому, что у мух, у которых в этом гене была мутация, на теле были щетинки, напоминающие колючки ежа. Тейбин, Макмэхон и Ингам назвали куриный аналог этого гена "*Sonic hedgehog*" в честь ежика Соника — персонажа видеоигр, выпускаемых компанией *Sega*.

Настало время для самого интересного вопроса: что именно делает *Sonic hedgehog* в конечностях? В лаборатории Тейбина к молекуле, присоединяющейся к этому гену, приделали пигмент, который позволял наблюдать, в каких клетках зачатка конечности этот ген работает. К немалому удивлению исследователей, они обнаружили, что этот ген задействован лишь в небольшом участке ткани, а именно в ЗПА!

Отсюда с очевидностью следовало, что нужно делать дальше. Ген *Sonic hedgehog* работает точно там же, где работает сама ЗПА. Вспомним, что если обработать конечность ретиноевой кислотой (витамином А), то еще одна ЗПА вступает в действие на противоположном конце конечности. Нетрудно угадать, что будет, если обработать конечность ретиноевой кислотой и после этого посмотреть, где будет действовать *Sonic hedgehog*. Как и следовало ожидать, после обработки ретиноевой кислотой этот ген активен на обеих сторонах конечности — мизинца и большого пальца, — точно так же, как и ЗПА.

Зная строение куриного гена *Sonic hedgehog*, другие исследователи занялись поиском этого гена у других живых существ, наделенных пальцами, от лягушек до людей. Оказалось, что у всех позвоночных с четырьмя конечностями есть *Sonic hedgehog*. И у всех исследованных к настоящему времени животных этот ген активен в ткани ЗПА. Если *Sonic hedgehog* не включается как следует в течение восьмой недели развития, у эмбриона или формируются лишние пальцы, или большой палец и

мизинец оказываются похожи. В некоторых случаях, когда этот ген поврежден, формируется рука, похожая на широкое весло, аж с двенадцатью похожими пальцами.

Сегодня известно, что *Sonic hedgehog* представляет собой один из десятков генов, работа которых позволяет формировать наши конечности от плеча или бедра и до кончиков пальцев за счет их последовательного включения и выключения в определенное время. Примечательно, что работы, проведенные на курицах, лягушках и мышах, дали одинаковые результаты. Записанный на ДНК рецепт формирования плеча, предплечья, запястья и пальцев по сути один и тот же у всех наземных позвоночных.

Как далеко в прошлое можем мы проследить историю гена *Sonic hedgehog* и других фрагментов ДНК, которые управляют развитием наших конечностей? Работают ли те же гены при формировании рыбьих плавников? Или наши руки и ноги принципиально отличаются генетически от плавников рыб? Мы нашли черты рыбы в строении наших рук и ног. Но как насчет ДНК, управляющей их развитием?

Здесь и вступил в дело Рэнди Дан со своими "русалочьими кошельками".

Дадим акуле руку

Рэнди Дан пришел в мою лабораторию с простой, но довольно изящной идеей: обработать эмбрионы скатов так же, как Кпифф Тейбин обрабатывал куриные яйца. Замысел Рэнди состоял в том, чтобы провести на скатах все эксперименты, проведенные на куриных яйцах учеными, изучавшими развитие кур, от хирургических операций на тканях Сондерса и Цвиллинга до генетических экспериментов Клиффа Тейбина. Развитие зародыша ската проходит внутри яйца, покрытого своеобразной скорлупой и содержащего запас желтка. К тому же эмбрионы у скатов довольно крупные, сравнимые по размеру с эмбрионами курицы. Все эти свойства были очень кстати — они позволяли нам изучать эмбрионы скатов, пользуясь генетическими, хирургическими и другими методами, разработанными для изучения куриных эмбрионов.

Что мы могли бы узнать, сравнивая развитие плавника ската или акулы с развитием крыла или ноги цыпленка? И, что еще важнее, что могли бы мы узнать о себе самих из такого сравнения?

Конечности цыплят как показали Сондерс, Цвиллинг и Тейбин, представляют собой на удивление хорошую модель для изучения развития наших собственных конечностей. Все, что открыли Сондерс и Цвиллинг, вырезая и вживляя кусочки ткани, и все, что установили Тейбин и его коллеги в своих опытах с ДНК, с тем же успехом относится и к нашим конечностям. У нас тоже есть ЗПА, тоже есть *Sonic hedgehog*, и для нашего нормального развития они играют ту же ключевую роль. Как мы уже убедились, неправильно работающая ЗПА или мутация в гене *Sonic hedgehog* могут привести к серьезным деформациям конечностей, причем и у человека тоже.

Рэнди хотел узнать, насколько механизм формирования наших конечностей отличается от такого механизма у акул и скатов. Насколько глубока наша связь с остальными живыми существами? Новый ли рецепт обеспечивает правильное формирование наших рук, или он имеет глубокие корни в других существах? И если имеет, то насколько глубокие?

Акулы и их родственники — самые древние существа, у которых плавники имеют скелетную основу. В идеале, чтобы ответить на вопрос Рэнди, надо было бы добыть ископаемую акулу возрастом 400

миллионов лет, привезти ее в лабораторию, разрезать на кусочки и посмотреть на ее гены. Затем надо было бы поэкспериментировать с эмбрионами ископаемого, чтобы узнать, работает ли в зачатках их плавников ген *Sonic hedgehog* и включается ли он там же, где он включается в зачатках наших конечностей. Это был бы чудесный эксперимент, но, к сожалению, провести его невозможно. Из таких древних ископаемых уже нельзя извлечь ДНК, а если бы и можно было, все равно нам не удалось бы заполучить эмбрионы этих ископаемых, чтобы проводить на них наши опыты.

Поэтому мы обращаемся к следующему по качеству объекту — современным акулам и их родственникам. Плавник акулы никто не перепутает с человеческой рукой — сложно представить себе две более непохожих конечности. Не только сами акулы состоят с человеком в довольно далеком родстве, но и скелетная основа их плавников совсем не похожа на скелет наших конечностей. В плавниках акулы нельзя найти ничего, даже отдаленно напоминающего оуэновское "кость — две кости — много косточек — пальцы". Вместо этого внутри акульего плавника находятся кости, похожие на прутья: длинные и короткие, широкие и узкие. Мы их называем костями, но на самом деле они состоят из хрящевой ткани (акул и скатов именуют хрящевыми рыбами, потому что их скелеты никогда не затвердевают до состояния настоящих костей). Если уж мы решили выяснить, уникальны ли функции гена *Sonic hedgehog* для наземных позвоночных, то почему бы не посмотреть на животное, во многих отношениях совсем другое? Кроме того, почему бы не выбрать представителя самых примитивных из современных позвоночных, у которых вообще имеются парные конечности? Акулы прекрасно подойдут и для того и для другого.

Наша первая задача была довольно проста. Нам нужен был надежный источник эмбрионов акул и скатов. Оказалось довольно сложно найти способ регулярно получать яйца акул, но со скатами, их близкими родственниками, дела обстояли лучше. В итоге мы начали наши эксперименты с акул и перешли на скатов, когда запасы акул иссякли. Мы нашли поставщика, который примерно раз в пару месяцев присылал нам контейнер с двадцатью-тридцатью яйцами с эмбрионами внутри. У нас, как у туземцев-островитян, выработался настоящий карго-культ, когда мы каждый месяц с нетерпением ожидали прибытия драгоценных эмбрионов.

Результаты, полученные Тейбином и другими генетиками, помогли Рэнди правильно спланировать эксперименты. Со времени работы

Тейбина 1993 года ген *Sonic hedgehog* был найден уже у очень многих видов позвоночных, от рыб до людей. Зная строение гена *Sonic hedgehog*, Рэнди мог "просмотреть" ДНК ската и акулы в поисках этого гена. Очень скоро он нашел его — акулий *Sonic hedgehog*.

Теперь нужно было ответить на следующие два главных вопроса. Где в эмбрионе акулы работает *Sonic hedgehog*? И, что еще важнее, что именно он делает?

Работая с яйцами скатов, Рэнди установил, где и когда включается *Sonic hedgehog* в ходе развития их эмбрионов. Вначале он выяснил, когда происходит включение этого гена — на том же этапе развития конечности, что у цыпленка, или нет. Оказалось, что на том же. Затем он выяснил, включается ли этот ген на участке ткани на заднем краю плавника, который соответствует нашей стороне мизинца. И снова оказалось, что именно там. Затем он провел эксперименты с витамином А. Это был самый захватывающий этап. Если обработать зачаток конечности цыпленка или млекопитающего этим соединением, то на стороне большого пальца появится еще один участок, на котором работает ген *Sonic hedgehog*, и это приведет к удвоению костей конечности. Рэнди ввел витамин А в эмбрионы, подождал около суток и затем проверил, вызывает ли витамин А у зародышей скатов, как и у зародышей курицы, включение гена *Sonic hedgehog* на противоположной стороне конечности. Оказалось, что вызывает. Теперь нам предстояло долго ждать. Мы уже узнали, что *Sonic hedgehog* в зачатках плавников акул и скатов вел себя так же, как в зачатках наших рук и куриных крыльев. Но какое действие окажет все это на формирование скелета? Ответа пришлось ждать два месяца.

Эмбрионы развивались внутри непрозрачной оболочки яиц. Все, что мы могли узнать, — жив ли эмбрион. То, что находится внутри его плавников, увидеть было нельзя.

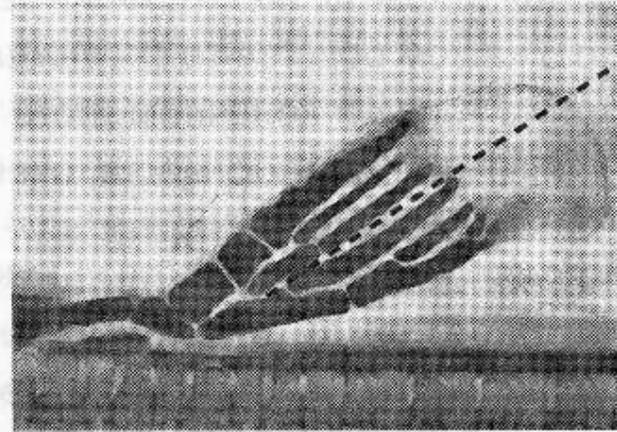
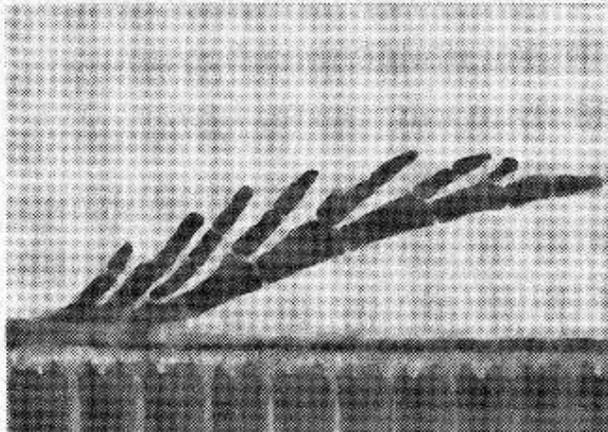
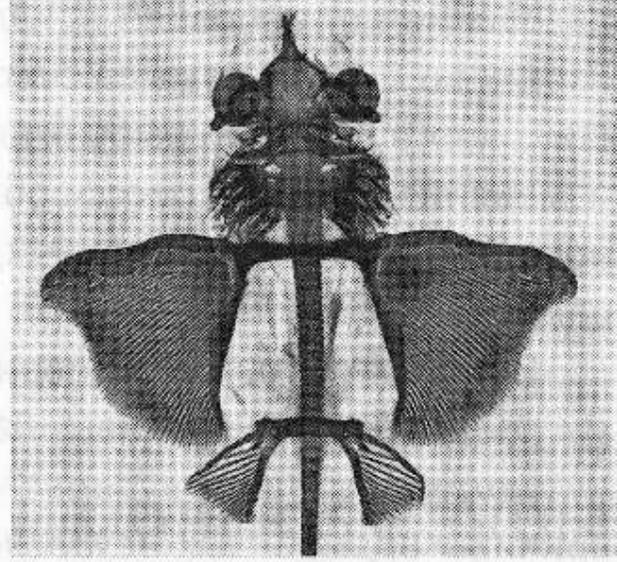
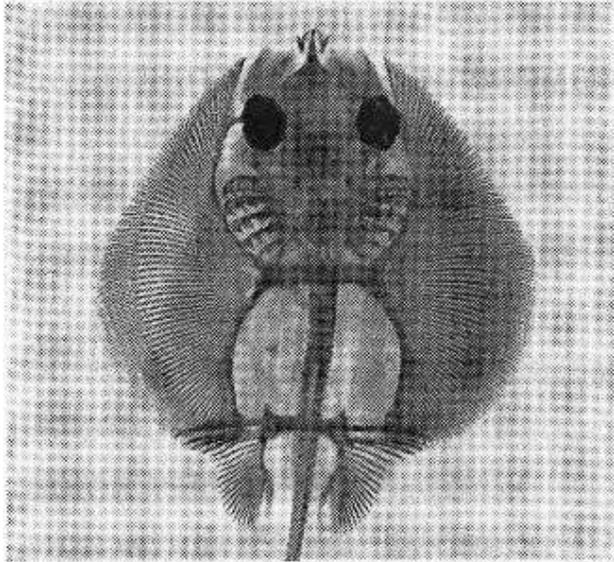
Полученный в итоге результат явил нам поразительный пример свойства, которое объединяет нас с акулами и скатами: зеркально отраженный плавник. Внутренние структуры грудных плавников удвоились в направлении голова-хвост точно так же, как удваиваются в таких экспериментах крылья цыпленка. Структуры крыла удваиваются, отражая друг друга. Структуры плавника акул, а также и скатов делают ровно то же самое. Ген *Sonic hedgehog* действует сходным образом при формировании скелетной основы самых разнообразных конечностей.

Как вы, возможно, помните, один из эффектов гена *Sonic hedgehog* состоит в том, что он делает пальцы одной конечности разными,

отличными друг от друга. Как мы видели на примере опытов с ЗПА, какой именно палец разовьется, зависит от его близости к месту, где работает *Sonic hedgehog*. Нормальный плавник взрослого ската содержит множество напоминающих прутья скелетных элементов, похожих друг на друга. Можем ли мы сделать так, чтобы эти прутья были разными, как наши пальцы? Рэнди взял небольшой шарик, пропитанный белком, производимым геном *Sonic hedgehog*, и внедрил его в зачаток плавника между двумя одинаковыми прутьями. Но при этом он использовал продукт не собственного *Sonic hedgehog* ската, а мышиногo *Sonic hedgehog*. Вот какой хитрый эксперимент: мы получили эмбрион ската, в плавник которого внедрен шарик, из которого постепенно выходит белок мышиногo гена *Sonic hedgehog*. Подействует ли этот мышиный белок на развитие ската?

В результате такого эксперимента можно получить два противоположных результата. Одна крайность — если ничего не произойдет. Это означало бы, что скаты так сильно отличаются от мышей, что мышиный белок гена *Sonic hedgehog* на них не действует. Другая крайность — это если скелетные элементы плавника в ходе развития станут отличаться друг от друга, демонстрируя тем самым, что ген *Sonic hedgehog* работает сходным образом и у мышей, и у скатов. И не будем забывать о том, что Рэнди использовал белок млекопитающего, то есть наш собственный белок, производимый этим геном, очень, очень похож на мышиный.

В итоге оказалось, что скелетные элементы в плавнике ската не только стали отличаться друг от друга, но и отреагировали на мышиный *Sonic hedgehog* в целом именно так, как реагируют пальцы наземных позвоночных, в зависимости от того, насколько близко они находились к источнику белка *Sonic hedgehog*. Форма "пальцев", ближайших к шарикy, отличалась от формы "пальцев", удаленных от шарика. И этот эффект, помимо всего прочего, производился у скатов мышиным белком!



Нормальные плавники (справа) и плавники эмбрионов, которые Рэнди обработал витамином А. Плавники обработанных эмбрионов оказываются зеркально удвоены, совсем как крылья у аналогичным образом обработанных цыплят. Фотографии любезно предоставил Рэндалл Дан (Чикагский университет).

Рыба, которую нашел в нас Рэнди, проявлялась не в какой-нибудь одной кости или в какой-нибудь части скелета. Эта рыба проявлялась в тех биологических механизмах, которые обеспечивают формирование конечностей у эмбрионов. Множество экспериментов, проведенных на таких разных организмах, как мыши, акулы и даже мухи, показывает, что гены *Sonic hedgehog* и просто *hedgehog* у всех организмов действуют сходным образом. Любые конечности, будь то плавники или конечности наземного позвоночного, формируются под управлением сходного набора генов. Но что это дает для решения той проблемы, о которой мы

говорили в первых двух главах, — проблемы превращения рыбьих плавников в конечности наземных животных? Вот что: это великое эволюционное преобразование не требовало появления новой ДНК а могло произойти во многом лишь за счет изменений древних генов участвующих в развитии рыбьих плавников. Претерпев некоторые изменения, эти гены смогли обеспечить формирование конечностей наземных позвоночных, наделенных настоящими пальцами.

Но кроме того, эти эксперименты с крыльями и плавниками по-настоящему красивы. Лаборатория Тейбина работала с мухами, чтобы найти *куриный* ген, который позволяет понять причины врожденных *человеческих* аномалий. Рэнди использовал открытие лаборатории Тейбина, чтобы поведать нам что-то о нашем родстве со *скатами*. Муха, найденная в курице, помогла Рэнди в конечном итоге найти в нас ската. Связи, объединяющие живых существ, очень глубоки.

Глава 4. Повсюду зубы.

Изучение зубов не занимает много времени на занятиях по анатомии — мы тратим на них всего минут пять. В пантеоне наших любимых органов — каждый из вас может составить для себя такой список — зубы редко попадают в первую пятерку. Но в наших небольших зубах осталось очень много того, что связывает нас с другими живыми существами, и разобраться в наших телах, не разобравшись в зубах, совершенно невозможно. Для меня зубы особенно важны еще и тем, что именно поиски ископаемых зубов были моим первым опытом охоты на ископаемых и руководства палеонтологической экспедицией.

Функция зубов состоит в том, чтобы превращать крупные организмы в маленькие кусочки. Закрепленные на подвижных челюстях зубы рубят, колют, режут и перемалывают. Размер рта ограничен, а зубы позволяют живым существам питаться другими, которые целиком им в рот не поместились бы. Это особенно относится к животным, не имеющим рук или когтей, которые позволили бы разрывать или разрезать пищу, прежде чем она попадет в рот. Конечно, обычно крупные рыбы едят мелких, а не наоборот. Но зубы могут уравнивать тех и других в правах: небольшая рыба может питаться более крупными, если у нее хорошо развиты зубы. Небольшие рыбки могут нападать на крупных и, пользуясь зубами, отрывать от них целые куски.

Мы можем многое узнать о животном, посмотрев на его зубы. Всевозможные бугорки, ямки и ребрышки, а также форма и размер зубов во многом отражают наш рацион питания. Плотоядные животные например кошки, обладают острыми коренными зубами, которые позволяют им резать мясо, в то время как у растительноядных полон рот уплощенных зубов, которые дают им возможность перемалывать стебли, листья или плоды растений. Анатомы с давних пор использовали зубы как ценный источник информации. Французский анатом Жорж Кювье, как известно, хвалился тем, что может восстановить весь скелет животного по единственному зубу. Это некоторое преувеличение, но суть передана верно: по зубам можно многое сказать об образе жизни животного.

Человеческий рот выдает в нас всеядных существ, потому что у нас много разных зубов. Наши передние зубы — резцы — и идущие за ними клыки похожи на лезвия предназначенные для разрезания пищи. Задние

зубы — коренные — имеют уплощенную поверхность с буграми и ямками, что позволяет нам измельчать с их помощью животную и растительную пищу. Предкоренные, расположенные перед ними, промежуточны по функциям между резцами и коренными.

Самое примечательное свойство нашего рта состоит в том, как прекрасно в нем все подогнано. Откройте и закройте рот, и ваши зубы разойдутся и вновь сойдутся в том же положении, так что бугорки и ямки зубов верхней и нижней челюсти полностью совпадут друг с другом. Благодаря тому, что они так хорошо совпадают, мы можем измельчать пищу с максимальной эффективностью. Ну а любые несовпадения наших верхних и нижних зубов могут приводить к их повреждениям — и к обогащению стоматологов.

Палеонтологи находят, что зубы необычайно информативны. Это самые твердые детали нашего тела в связи с тем, что в зубной эмали содержится большое количество минерала гидроксиапатита — даже больше, чем в костях. Благодаря своей твердости зубы часто сохраняются лучше всех остальных частей тела ископаемых животных, которых мы находим в отложениях многих древних эпох. И с этим нам очень повезло, потому что зубы дают нам ключ к рациону ископаемых. Ископаемые остатки позволяют многое узнать о том, как возникли различные способы питания. Это в особенности касается истории млекопитающих. Хотя и у многих рептилий были зубы, похожие на зубы млекопитающих, у млекопитающих они все же особенные. Раздел курса палеонтологии, посвященный млекопитающим, во многом напоминает пособие по стоматологии.

Современные рептилии — крокодилы, ящерицы, змеи — лишены многого из того, что делает зубы млекопитающих уникальными. Например, все зубы крокодила имеют похожую коническую форму, и единственная разница между ними состоит в том, что одни побольше, а другие поменьше. У рептилий также нет настоящего прикуса, то есть совпадения верхних зубов с нижними, которое свойственно людям и другим млекопитающим. Кроме того, в то время как у нас, млекопитающих, зубы сменяются только один раз, у рептилий зубы обычно выпадают и вновь отрастают в течение всей жизни, по мере того как старые зубы изнашиваются или ломаются.

Одно из наших фундаментальных свойств — характерный для нас, млекопитающих, прикус — встречается в ископаемых остатках по всему свету начиная с времени от 225 до 195 миллионов лет назад. В более древних породах можно найти немало рептилий, внешне похожих на

собак. Они ходили и бегали на четырех ногах, обладали крупным черепом, и у многих из них были острые зубы. Но этим их сходство с собаками и ограничивается. В отличие от собак у этих рептилий челюсти были составлены из множества костей, а зубы верхней и нижней челюсти не были хорошо подогнаны друг к другу. Кроме того, смена зубов у них происходила по обычному для рептилий типу: новые зубы вырастали тут и там на смену старым на протяжении всей жизни.

Посмотрим в менее глубокие слои и увидим совсем другую картину — там появляются млекопитающие. Кости, входящие в состав челюстей, уменьшаются и смещаются в сторону уха. Верхние и нижние зубы впервые оказываются хорошо подогнаны друг к другу. Форма челюстей тоже меняется: то, что у рептилий выглядело как простая палка, теперь становится больше похоже на бумеранг. Тогда же зубы впервые стали сменяться лишь один раз в жизни, как у нас. Мы можем проследить все эти изменения по ископаемым, особенно из некоторых местонахождений в Европе, Южной Африке и Китае.

В породах возрастом около 200 миллионов лет попадают ископаемые остатки животных, напоминающих грызунов, таких как морганукодон (*Morganucodon*) и эозостодон (*Eozostodon*). Внешне они уже очень похожи на современных млекопитающих. Размером эти животные были не больше мыши, но у них внутри заключалась немалая и важная часть нас, людей. Рисунок не позволяет передать, какие это были замечательные создания. Когда я впервые увидел этих ископаемых, я пришел в полный восторг.

Поступив в магистратуру, я собирался изучать древних млекопитающих. Я выбрал Гарвардский университет, потому что работавший там Фэриш Дженкинс-младший, уже знакомый нам по первой главе, руководил экспедициями на запад Соединенных Штатов, где, в частности, искал ископаемые свидетельства того, как млекопитающие выработали свои исключительные жевательные способности. Это было очень серьезное исследование. Фэриш и его группа занималась поиском новых местонахождений, а не дальнейшим обследованием уже известных. Фэришу удалось собрать группу очень способных охотников за ископаемыми, в которую входили штатные сотрудники Гарвардского музея сравнительной зоологии и несколько внештатных работников. Главными в этой группе были Билл Эмарал, Чак Шафф и покойный Уилл Дауне. Эти люди и привели меня в мир палеонтологии.

Фэриш и его группа изучали геологические карты и

аэрофотоснимки в поисках многообещающих мест для поиска ископаемых остатков древних млекопитающих. Затем, каждое лето, они садились на грузовики и отправлялись в пустыни штатов Вайоминг, Аризона и Юта. К 1983 году, когда к ним впервые присоединился я, они уже открыли немало ценных ископаемых млекопитающих и богатых ископаемыми местонахождений. Меня особенно поразили их предсказательные способности: основываясь лишь на чтении научных статей и книг, Фэриш и его коллеги успешно определяли, где стоит, а где не нужно искать древних млекопитающих.

Боевым крещением в палеонтологи для меня стали блуждания по аризонской пустыне вместе с Чаком и Биллом. Вначале мне казалось, что мы ищем наугад. Я-то ожидал чего-то вроде военного похода, в ходе которого мы бы организованно и скоординированно проводили рекогносцировку на местности. То, что я увидел, было совершенной противоположностью. Группа выгружалась на каком-нибудь участке с обнаженной горной породой, и все разбредалось в разные стороны в поисках лежащих на поверхности фрагментов ископаемых костей. В первые несколько недель экспедиции я занимался поисками сам по себе, последовательно осматривая поверхность каждого попадавшегося мне камня на предмет обломков ископаемых костей. Вечером каждого дня мы возвращались в лагерь и показывали друг другу, что интересного нам удалось насобирать. Чак приносил несколько сумок, полных ископаемых костей. В дополнение к ним Билл обычно доставал какой-нибудь маленький череп или другую ценную находку. А у меня не было ничего, и моя пустая сумка служила печальным напоминанием о том, сколь многому мне еще предстояло научиться.

После нескольких недель такой работы я решил, что мне стоит ходить вместе с Чаком. Именно он приносил каждый день самые полные сумки, и я подумал, что мне стоит поучиться у такого профессионала. Чак был только рад, что я к нему присоединился, и, пока мы ходили, долго рассказывал мне о своей многолетней работе палеонтолога. Чак — настоящий техасец, но с бруклинским оттенком: ковбойские сапоги и западные ценности Дикого Запада в сочетании с нью-йоркским акцентом. Пока он в избытке кормил меня рассказами о своих прошлых экспедициях, я продолжал убеждаться в том, как мало я знаю и умею. Чак не осматривал каждый камень, а когда он выбирал объект, я совершенно не мог понять, почему он выбрал именно этот. А еще бывало, и это было особенно обидно, что Чак и я смотрели на один и тот же участок земли. Я не видел ничего, кроме каменной пустыни. А

Чак видел ископаемые зубы, челюсти и даже обломки черепов.

При взгляде с высоты птичьего полета можно было разглядеть двух человек, идущих по равнине, которая казалась безграничной и по которой на многие мили простирались гряды холмов и плато из песчаника. Но мы с Чаком не смотрели на них — нас интересовали только обломки камней и осыпи у их подножья. Мы занимались поиском небольших ископаемых, размером с ладонь, не больше, поэтому обращали внимание лишь на тот маленький мир, где их можно найти. Этот мир, в который мы вглядывались, казался особенно миниатюрным по контрасту с безграничным простором пустыни, окружавшей нас. У меня было такое чувство, будто на всей планете, кроме нас двоих, нет ни одного человека и что вся моя жизнь состоит из рассматривания каменных обломков.

Чак проявлял чудеса терпения, пока я большую часть дня донимал его разными вопросами. Мне хотелось, чтобы он дал мне *подробные инструкции*, как нужно искать ископаемых. И он снова и снова говорил мне, что нужно искать "что-то, что не похоже", что отличается от камня по структуре, что блестит как зуб, что похоже не на кусок песчаника, а на косточку. На словах это было просто, но мне не удавалось уловить сути того, что он мне объяснял. Как я ни пытался, я по-прежнему возвращался в лагерь с пустыми руками. И еще обиднее было то, что Чак, который смотрел на те же самые камни, возвращался, как обычно, с набитыми сумками.

Наконец в один прекрасный день я впервые увидел зуб, блестящий в лучах пустынного солнца. Он едва выступал из обломка песчаника, но я видел его ясно как день. У его эмали был особый оттенок, какого не могло быть у камня, и он был не похож на все, что я видел до этого. На самом деле это, конечно, не совсем так, потому что я каждый день смотрел на такие вещи. Но разница была в том, что на этот раз я сам его заметил и сам почувствовал разницу между камнем и костью. Зуб блестел на солнце и этим привлек мое внимание, и тогда я увидел на нем бугорки. Весь этот зуб, извлеченный из камня, был размером чуть больше горошины без учета корней, выступавших из его основания. Но для меня он был величественнее самого большого динозавра, скелет которого можно увидеть в музее.

Пустыня для меня вдруг наполнилась костями. Там, где раньше я видел одни лишь камни, теперь я повсюду замечал обломки ископаемых, как будто я надел какие-то особые очки, а каждый обломок кости был специально для меня подсвечен. Вслед за зубом я нашел небольшие

кусочки других костей, а затем еще зубы. Передо мной была ископаемая челюсть, освобожденная эрозией из хранившего ее камня и распавшаяся на части. После этого случая я тоже стал возвращаться в лагерь не с пустой сумкой.

Теперь, когда я сам научился находить кости, то, что казалось мне произвольными блужданиями нашей группы, стало приобретать в моих глазах отчетливый порядок. На самом деле никто не разбредался по пустыне куда глаза глядят, все пользовались вполне определенными, хотя и не сформулированными правилами. Правило первое: иди в направлении самых многообещающих обнажений породы, используя для их поиска любые внешние признаки и поисковые образы, усвоенные в ходе предшествующего опыта. Правило второе: не иди вслед за кем-то, двигайся по своему маршруту (Чак благосклонно разрешал мне нарушать это правило). Правило третье: если ты напал на золотую жилу, а на ней уже кто-то работает, найди другую или исследуй не такую золотую. Кто первый нашел, тому и карты в руки.

Со временем я узнал признаки, по которым можно искать ископаемые кости другого типа: челюстные, длинные трубчатые, обломки черепов. Однажды обнаружив их самостоятельно, вы уже никогда не разучитесь их искать. Точно так же как настоящие рыбаки видят рыбу глубоко под водой, охотники за ископаемыми пользуются целым набором поисковых образов, благодаря которым ископаемые как будто выпрыгивают из камней им навстречу. Я постепенно приобретал свой собственный набор зрительных впечатлений, как выглядят при разном освещении ископаемые кости, заключенные в разных породах. Поиск ископаемых утром сильно отличается от поиска их днем, потому что свет и тени по-разному играют на поверхности земли.

Сегодня, двадцать лет спустя, я уже знаю, что всякий раз когда приезжаешь на новое место, будь то за триасовыми отложениями в Марокко или за девонскими на остров Элсмир, там приходится заново учиться поиску ископаемых. Первые несколько дней проходят в трудах почти столь же бесплодных, как двадцать лет назад, когда я ходил вместе с Чаком по Аризоне. Разница только в том, что теперь я ничуть не сомневаюсь, что рано или поздно нужный поисковый образ придет и все встанет на свои места.

Главная цель наших поисков в то время, когда мы вместе с Чаком блуждали по пустыне, состояла в том, чтобы обнаружить место, где костей было бы так много, что это означало бы — здесь есть богатый ископаемыми слой, который мы можем раскопать. К тому времени, как я

присоединился к группе Фэриша, ей уже удалось обнаружить такое место — полосу породы длиной около тридцати метров, просто набитую скелетами маленьких животных.

На этом месте Фэриш и другие выкопали в мелкозернистом песчанике карьер. Вся хитрость работы в нем заключалась в том, что ископаемые залегали там вдоль одного тонкого слоя толщиной не больше миллиметра. Если обнажить где-то поверхность этого слоя, очень часто можно было видеть ископаемые кости. Это были крошечные косточки, не больше нескольких сантиметров в длину, и при этом черные, казавшиеся кляксами на буровой поверхности породы. Мы нашли здесь остатки многих животных. Там были лягушки (одни из самых древних), безногие амфибии, ящерицы и другие рептилии, а также, что было для нас особенно важно, одни из самых древних млекопитающих.

Главная особенность древнейших млекопитающих состоит в том, что они были маленькими, просто крошечными. Зубы у них были не больше двух миллиметров в длину. Чтобы их найти, требовалось немало внимания и еще больше везения. Если зуб был прикрыт кусочком породы или даже несколькими песчинками, часто он мог просто остаться незамеченным.

Эти древние млекопитающие меня и покорили. Я занимался тем, что обнажал участок содержащего ископаемых слоя, а затем внимательно рассматривал всю его поверхность через лупу с десятикратным увеличением. Стоя на четвереньках, я вглядывался в песчаник, так что мои глаза и лупа были на расстоянии всего сантиметров пяти над землей. Поглощенный этим занятием, я нередко забывался и заползал на чужой участок, где на мою голову падала брошенная соседом тяжелая грязная сумка, красноречиво напоминавшая, что надо держаться своей территории. Но однажды эти поиски принесли мне большую удачу и незабываемое впечатление. Зубы, которые я нашел, были небольшие и острые, с бугорками и корнями. Но в бугорках этих зубов было нечто особенное. Поверхность каждого зуба имела особый характер износа там, где зубы верхней и нижней челюсти сходились друг с другом. Передо мной был один из древнейших образцов нашего собственного устройства зубов, с настоящим прикусом, только эти зубы принадлежали крошечному млекопитающему, жившему 190 миллионов лет назад.

Я никогда не забуду то впечатление, которое произвела на меня эта находка. Я ломал камни и ползал в пыли — и нашел что-то, что могло

изменить представления людей о собственной истории. Этот контраст между детским, незначительным занятием и одним из величайших достижений человеческого разума навсегда поразил меня. Я стараюсь напоминать себе об этом впечатлении, когда в очередной раз нахожу что-нибудь новое.

Той осенью я вернулся в университет, одержимый экспедициями. Мне хотелось организовать свою собственную экспедицию, но на что-то серьезное у меня не было средств, поэтому я отправился один — исследовать породы возрастом около 200 миллионов лет в штате Коннектикут. Эти породы были уже хорошо изучены в XIX веке, и в них было обнаружено немало ценных ископаемых. Я полагал, что если возьмусь за эти породы со своей лупой и со своим поисковым образом, сложившимся в ходе успешных поисков древнейших млекопитающих, то смогу найти немало интересного. Я взял напрокат микроавтобус, прихватил несколько сумок для находок и отправился в путь.

Из этой поездки я извлек еще один ценный урок: мне не удалось найти ровным счетом ничего. Пришлось вернуться туда, откуда я начал, а точнее — в университетскую библиотеку, к книгам по геологии.

Мне нужно было найти место, где породы возрастом 200 миллионов лет были бы основательно обнажены — в Коннектикуте были одни лишь участки дорожных работ. Идеалом был бы скальный обрыв вдоль берега моря, пляж под которым покрыт обломками породы, недавно отколовшимися от обрыва под действием волн. Посмотрев на карты, я сразу нашел то, что искал. В Канаде, в провинции Новая Шотландия, вдоль морского берега залежали как раз породы возрастом около 200 миллионов лет, триасового и юрского периодов. Кроме того, туристические путеводители по этим местам воспевали самые высокие в мире приливы, временами превышающие 15 метров. Это была просто немыслимая удача.

Я позвонил Полу Олсену, специалисту по этим отложениям, который совсем недавно начал преподавать в Колумбийском университете в Нью-Йорке. Меня и до разговора с Полом очень увлекала идея экспедиции в этот район, но после разговора я просто места себе не находил. Из его рассказа о геологических особенностях этих мест я узнал, что они просто идеальны для поиска мелких млекопитающих и рептилий — отложения, образованные древними реками и дюнами, свойства которых как нельзя лучше подходили для захоронения мелких костей. Более того, Пол уже находил на участке побережья около города Паррборо в Новой Шотландии кости динозавров и окаменелые следы

их ног. У нас с Полом вскоре родился план поехать в Паррборо вместе и осмотреть побережье на предмет мелких ископаемых остатков. Со стороны Пола было очень великодушно согласиться на это, потому что он сам имел виды на изучение этих мест и был вовсе не обязан помогать мне и тем более работать там в сотрудничестве со мной.

Я проконсультировался о моих зреющих планах с Фэришем, и он не только предложил мне деньги на эту экспедицию, но и посоветовал взять с собой таких незаменимых специалистов по поиску ископаемых, как Билл и Чак. Деньги, Билл, Чак, Пол Олсен, превосходные отложения и обширные обнажения — чего еще можно пожелать? Следующим летом я впервые возглавил палеонтологическую экспедицию.

На взятой в аренду многоместной машине я отправился на побережье Новой Шотландии вместе с моим отрядом, состоявшим из Билла и Чака. Мое положение, конечно, было довольно смешным. Для Билла и Чака, которые на двоих провели в поле больше лет, чем я прожил на свете, я был начальником отряда лишь номинально. На деле это они руководили поиском ископаемых, а я лишь платил за обеды.

Обнажения на побережье Новой Шотландии были великолепны. По берегам залива Фанди возвышались крутые обрывы из оранжевого песчаника. Во время отливов берег моря отступал каждый день где-то на полкилометра, обнажая бескрайние равнины оранжевой подстилающей породы. Очень скоро мы уже в нескольких разных местах нашли ископаемые кости. Маленькие белые прожилки костей виднелись тут и там на склонах обрыва. Пол везде находил окаменевшие следы, даже на отмелях, обнажавшихся каждый день во время отлива.

Чак, Билл, Пол и я провели две недели в поисках ископаемых в Новой Шотландии и нашли немало обломков, осколков и кусочков костей, торчащих из песчаника. Билл, который был в нашей группе препаратором, все время предупреждал меня, что не стоит в полевых условиях освобождать от породы слишком много костей — их лучше упаковывать вместе с породой, чтобы потом разбираться с ними в лаборатории, под микроскопом, в более надежных условиях.



Пол Олсен обнаружил окаменелые следы на обнаженном в отлив морском дне у берегов Новой Шотландии. Во время прилива вода полностью покрывает этот берег и достигнет обрыва. Стрелкой показано место, где мы застряли на скалах на несколько часов, когда вышли из лагеря позже, чем следовало.

Мы так и делали, но я должен признаться, что был разочарован тем, что мы везли с собой домой: всего несколько обувных коробок с камнями, из которых тут и там торчали обломки и осколки костей. Помнится, пока мы ехали домой, я думал о том, что, хотя мы и не так много нашли, все же это была прекрасная экспедиция. После этого я взял недельный отпуск, а Чак и Билл вернулись в лабораторию.

Когда я снова вернулся после отпуска в Бостон, Чак и Билл как раз ушли обедать. В музей тем временем пришли несколько коллег, которые, увидев меня, подошли и стали жать мне руку, поздравлять и хлопать по спине. Они вели себя так, будто я был полководцем, вернувшимся из успешного похода, но у меня не было ни малейшего представления, в чем дело. Мне казалось, что это какая-то странная шутка, что они задумали как-то меня разыграть. Они посоветовали мне сходить к Биллу и посмотреть на мой трофей. Не зная, что и думать, я побежал к Биллу.

У Билла под микроскопом лежала крошечная челюсть, не больше полутора сантиметров в длину. На ней было несколько миниатюрных зубов. Эта челюсть определенно принадлежала рептилии, потому что у каждого зуба было лишь по одному корню, в то время как у млекопитающих всегда присутствуют зубы с несколькими корнями. Но на этих зубах были бугорки и ямки, которые я видел даже невооруженным глазом. Когда же я посмотрел на эту челюсть под микроскопом, меня ждал самый большой сюрприз: на выступах этих зубов были характерные стертые участки. Это была челюсть рептилии, обладавшей прикусом! Найденное нами ископаемое было полурептилией-полумлекопитающим.

Пока я был в отпуске, Билл распаковал один из собранных нами кусков породы, нашел на нем выступающий фрагмент кости и под микроскопом освободил его от породы препаровальной иглой. Мы не осознавали этого, пока были в поле, но наша экспедиция оказалась необычайно успешной. И все благодаря Биллу.

Чему я научился за это лето? Во-первых, я научился слушать, что говорят Чак и Билл. Во-вторых, я узнал, что многие важнейшие открытия делаются не в поле, а в лаборатории, в ходе работы препаратора. Впрочем, впоследствии оказалось, что главные уроки полевой работы палеонтолога мне еще предстояли.

Рептилия, которую обнаружил Билл, относилась к трителедонтам — существам, найденным как в Южной Африке, так и в Новой Шотландии. Это были очень редкие ископаемые, поэтому мы решили вернуться на следующее лето в Новую Шотландию, чтобы найти новые образцы. Всю зиму я с нетерпением ждал этой экспедиции. Если бы можно было добывать ископаемых зимой из-под льда, я бы непременно занялся этим.

Летом 1985 года мы вернулись на то место, где был обнаружен наш трителедонт. Содержащий ископаемых слой находился в самом низу обрыва, где несколько лет назад обвалился небольшой его фрагмент. Чтобы работать на этом месте, нужно было правильно рассчитать время: во время прилива туда было не добраться, потому что вода слишком близко подходила к нужной нам точке. Я никогда не забуду волнение, охватившее меня в первый день когда мы огибали скальный выступ, чтобы вновь увидеть тот небольшой участок ярко-оранжевого песчаника. Запомнилось не то, что мы увидели, а то, чего не увидели — большей части той породы, с которой мы работали в прошлом году. За зиму она был уничтожена эрозией. Наше замечательное

местонахождение, содержащее остатки прекрасных трителедонтов, было смыто волнами.

Хорошая новость, если это можно так назвать, состояла в том, что на берегу теперь лежало немного больше обломков песчаника, доступных для обследования. Большая часть грунта на берегу, особенно там, где мы каждое утро обходили скальный выступ, состояла из базальта — застывшей лавы, извергавшейся из древнего вулкана около 200 миллионов лет назад. Можно было не сомневаться, что ископаемых мы в этой породе не найдем. Это по сути одна из аксиом палеонтологии — в таких породах, некогда нагретых до огромной температуры, ископаемые остатки костей сохраняться не могут. Дней пять или больше мы обследовали побережье во время отливов, крошили песчаник — и абсолютно ничего не находили.

Настоящий прорыв в наших поисках произошел после того, как однажды вечером к нашему жилищу пришел президент местного отделения благотворительной организации "*Lions Club International*". Ему нужны были судьи для конкурса красоты, который проходил входе празднования традиционной Недели родительского дома ("*Old Home Week*") в Паррборо. Эту ответственную работу жители Паррборо всегда доверяли приезжим, потому что вокруг таких конкурсов кипели страсти, и местным жителям было бы непросто судить своих землячек непредвзято. Судьями обычно была одна пожилая пара из Квебека, которая в том году не приехала в Паррборо, и моему отряду предложили исполнить за них эту почетную обязанность.

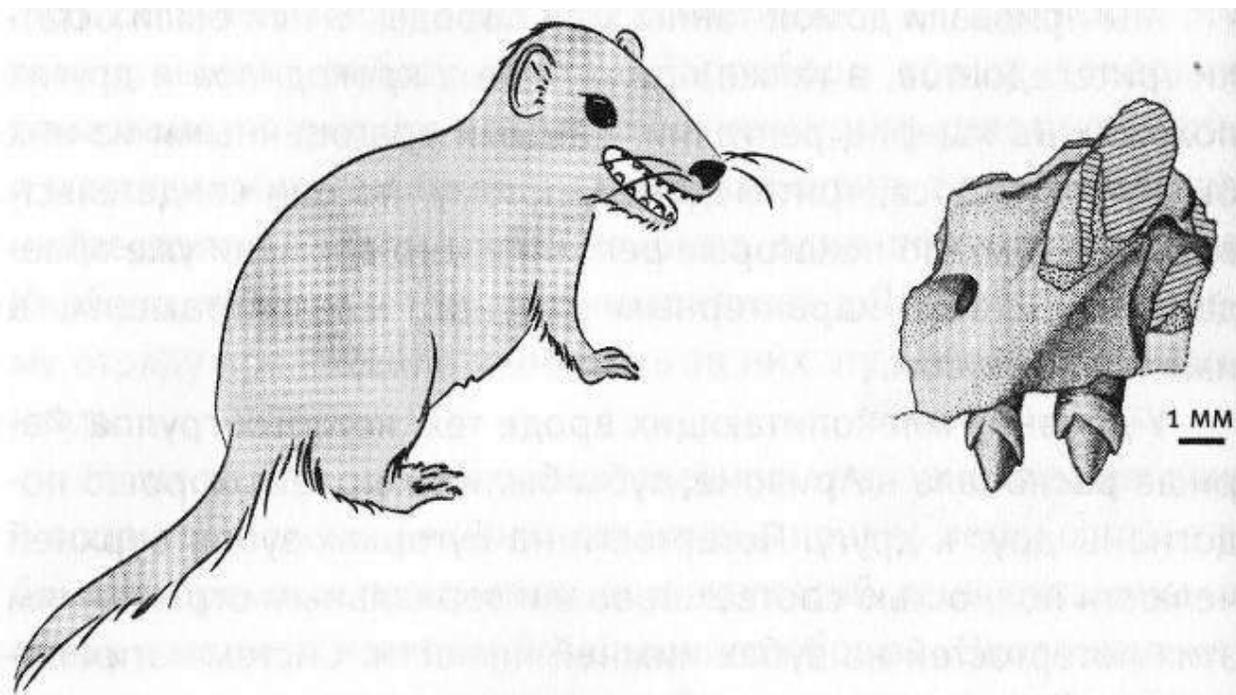
Но из-за того, что мы судили здешних красавиц, а затем еще и спорили о своем решении, мы очень поздно легли спать, забыли о времени прилива и на следующий день оказались в плену у моря за изгибом базальтового обрыва. Около двух часов нам пришлось провести на небольшом уступе шириной метров пятнадцать. Этот уступ был сложен вулканической породой, и нам никогда не пришло бы в голову искать на нем ископаемых. Мы пускали блинчики, пока нам это не наскучило, а затем решили осмотреть породу — вдруг удастся найти в ней какие-нибудь интересные кристаллы или минералы. Билл скрылся за скальным выступом, а я осматривал базальтовую стену за нашей спиной. Минут через пятнадцать я услышал свое имя. Никогда не забуду, как, стараясь не выдать волнения, Билл позвал меня: "Эй, Нил, посмотри, что я нашел, тебе, наверно, понравится". Только обойдя выступ, я увидел, как он взволнован. Затем я посмотрел на породу у его ног. Из нее выступали маленькие белые фрагменты — ископаемые кости. Тысячи

ископаемых костей!

Это было именно то, что мы искали, — местонахождение мелких костей. Оказалось, что вулканические породы в этом месте не были чисто вулканическими. Базальт местами прорезали тонкие слои песчаника. Скалы этого уступа были образованы древним грязевым селем, сопровождавшимся извержением вулкана. В грязи этого селя и оказались захоронены ископаемые.

Мы привезли домой тонны этой, породы. В ней были остатки трителедонтов, а также примитивных крокодилов и других похожих на ящериц рептилий. Самыми драгоценными из них были, разумеется, трителедонты, потому что они свидетельствовали о том, что некоторые рептилии того времени уже обладали свойством, характерным для нас, млекопитающих, а именно прикусом.

У древних млекопитающих вроде тех, которых группа Фэриша раскопала в Аризоне, зубы были уже очень хорошо подогнаны друг к другу. Потертости на бугорках зубов верхней челюсти полностью соответствовали зеркальным отражениям этих потертостей на зубах нижней челюсти. Система этих потертостей столь четко выражена, что по характеру прикуса и износа зубов у древних млекопитающих можно отличать друг от друга разные виды. Аризонские млекопитающие Фэриша обладали прикусом и потертостями, отличными от таковых у млекопитающих того же времени, остатки которых находят в Южной Америке, в Европе или в Китае. Если бы мы могли сравнивать этих ископаемых только с современными рептилиями, происхождение характерных для млекопитающих способов питания оставалось бы большой загадкой. Как я уже говорил, у крокодилов и ящериц зубы верхней и нижней челюсти не совпадают друг с другом. Чтобы найти решение этой проблемы, нужны такие существа, как трителедонты. Если вернуться назад во времени, к породам где-то на 10 миллионов лет более древним, чем те, что мы изучали в Новой Шотландии, мы найдем трителедонтов с ранними зачатками прикуса. У трителедонтов бугорки зубов не смыкаются друг с другом полностью, как у млекопитающих. Вместо этого вся внутренняя поверхность верхнего зуба трется о наружную поверхность нижнего зуба, почти как половинки ножниц. Конечно, характер прикуса изменялся не на пустом месте.



Трителедонт и фрагмент его верхней челюсти, добытый в Новой Шотландии. Автор рисунка фрагмента челюсти — Ласло Мешолей.

Нет ничего удивительного в том, что древнейшие существа, обладающие характерным для млекопитающих прикусом, напоминают млекопитающих также строением нижней челюсти, черепа и скелета.

Благодаря тому что зубы так хорошо сохраняются в палеонтологической летописи, в нашем распоряжении есть очень подробные сведения о том, как именно возникли основные способы питания млекопитающих — и как именно древние млекопитающие переходили к питанию другой пищей. История млекопитающих — это во многом история развития разных способов потребления пищи. В слоях чуть менее древних, чем те, где мы находим трителедонтов, можно найти уже множество разных видов млекопитающих с новыми особенностями строения зубов и прикуса, которые, очевидно, научились использовать свои зубы по-новому. В породах возрастом около 150 миллионов лет, залегающих по всему свету, можно уже найти остатки мелких млекопитающих, обладавших зубным рядом нового типа. Эти существа вымостили путь, который привел к возникновению нас с вами. Они обладали одной очень важной особенностью: зубы на их челюстях были разными. Их зубы выработали своего рода разделение труда. Расположенные спереди резцы специализируются на разрезании пищи, идущие за ними клыки — на прокалывании ее, а следующие за ними

предкоренные и коренные — на том, чтобы крошить или раздавливать пищу. Эти мелкие млекопитающие, внешне похожие на мышей, — важнейшей этап нашей собственной истории. Если вы в этом сомневаетесь, то представьте себе, каково было бы есть яблоко или тем более большую морковку, не имея резцов и коренных зубов. Наш разнообразный рацион, от фруктов и пирожных до овощей и мяса, возможен лишь потому, что наши предки, древние млекопитающие, выработали зубы с очень четким прикусом. И конечно, ранние стадии этого процесса мы можем наблюдать у трителедонтов и других, более древних наших родственников, у которых передние зубы обладают несколько иной формой и строением бугорков и ямочек, чем зубы, расположенные глубже во рту.

Зубы и кости — что крепче?

Практически само собой разумеется, что зубы выделяются из других органов своей исключительной твердостью. Зубы должны быть крепче, чем кусочки пищи, которые с их помощью перемалывают (представьте, каково было бы резать мясо с помощью губки). Во многих отношениях зубы тверды как камень, и это связано с тем, что в них содержится очень твердое вещество. Этим веществом, которое называют гидроксиапатитом, пропитаны изнутри как зубы, так и кости. Оно делает эти органы устойчивыми к сгибанию, сжатию и другим механическим воздействиям. Особая прочность зубов связана с тем, что их наружный слой, зубная эмаль, намного богаче гидроксиапатитом, чем любая другая структура организма, не исключая и кости. Эмаль придает зубам блеск и белизну. Конечно, эмаль — это лишь один из слоев, входящих в состав наших зубов. Более глубокий слой, дентин, тоже богат гидроксиапатитом.

В природе существует немало организмов, у которых есть очень твердые части тела, — это, например, раки или двустворчатые моллюски. Но они достигают этого не за счет гидроксиапатита. У раков и двустворчатых твердость некоторых органов достигается за счет других материалов — хитина и карбоната кальция соответственно. Кроме того, у этих животных, в отличие от нас, тело обладает твердыми покровами, играющими роль скелета. У нас же скелет внутренний.

Внутреннее расположение того, что покрепче, в наших организмах, у которых во рту есть зубы, а внутри всего тела — кости, представляет собой одну из важнейших особенностей нашей природы. Мы можем питаться, двигаться, дышать, а также включать в обмен веществ ряд минеральных веществ во многом благодаря гидроксиапатиту, содержащемуся в некоторых из наших тканей. За эти способности нам нужно благодарить наших общих со всеми рыбами предков. Все рыбы, амфибии, рептилии, птицы и млекопитающие на планете в этом отношении похожи на нас. Все они обладают структурами, содержащими гидроксиапатит. Но откуда все эти структуры появились?

Здесь мы сталкиваемся с непростой интеллектуальной задачей. Если мы узнаем, где, когда и как возникли кости и зубы, то мы сможем разобраться и в том, почему они возникли. Почему у наших предков

развился такой тип твердых тканей? Предназначались ли они для того, чтобы оберегать этих животных от воздействия каких-то факторов среды? Или же для того, чтобы дать им возможность эффективнее передвигаться? Ответы на все эти вопросы помогут найти ископаемые, заключенные в породах возрастом около 500 миллионов лет.

К самым распространенным ископаемым, обитавшим в древних океанах от 500 до 250 миллионов лет назад, относятся конодонты. Их открыл в тридцатых годах XIX века российский биолог Христиан Иванович Пандер, о котором пойдет речь в одной из последующих глав. Конодонты были небольшими морскими животными, наделенными рядами своеобразных острых шипов (сами эти шипы тоже называют конодонтами). Со времени открытия Пандера такие шипы нашли на всех континентах. На Земле есть места, где, разбив любой камень, непременно можно увидеть в большом количестве остатки конодонтов. Палеонтологи описали сотни разновидностей этих ископаемых.

Но долгое время природа конодонтов оставалась загадкой. Ученые спорили о том, что они собой представляли — ископаемых животных, растения или даже минералы. Едва ли не у каждого была своя излюбленная теория. Доказывали, что остатки конодонтов — это фрагменты двустворчатых моллюсков, губок, позвоночных или даже червей. Эти споры прекратились, лишь когда среди ископаемых удалось найти не только фрагменты, но и остатки целых конодонтов.

Первый образец, который позволил разобраться в этой проблеме, был обнаружен профессором палеонтологии, разбиравшим материалы, которые хранились в подвале здания Эдинбургского университета. Один из обнаруженных им предметов представлял собой плоский камень с отпечатком тела древнего организма, похожего на миногу. Возможно, вы помните что-то о миногах из уроков биологии: это примитивные, похожие на рыб существа, не имеющие челюстей. Они питаются кровью и тканями рыб, к телу которых они присасываются, как пиявки. На этом плоском камне в передней части отпечатка в породе сидели маленькие структуры, которые казались на удивление знакомыми. Это были остатки конодонта. Другие ископаемые остатки похожих на миног организмов были вскоре обнаружены в породах, добытых в Южной Африке, а через некоторое время — также в породах с запада Соединенных Штатов. У всех этих существ была одна исключительная черта — во рту у них были целые комплекты того, что давно уже было известно под названием "конодонты". Вывод напрашивался сам собой: конодонты были зубами. Это были зубы древних бесчелюстных

организмов, похожих на миног.

В распоряжении палеонтологов в течение полутора веков были древнейшие ископаемые зубы, но никто не знал наверняка, что это именно они. Чтобы объяснить, почему так случилось, нужно вкратце рассказать, как сохраняются остатки древних организмов. Твердые части тела, такие как зубы, могут сохраняться без особого труда. Мягкие части, такие как мышцы, кожа, внутренние органы, обычно разлагаются и не сохраняются в виде ископаемых остатков. Музейные хранилища наполнены множеством ископаемых скелетов, раковин и зубов, но среди них можно найти лишь немногие особо ценные образцы ископаемых остатков мягких тканей. В тех редких случаях, когда от мягких тканей остаются хотя бы какие-то ископаемые следы, это обычно отпечатки или слепки. Палеонтологическая летопись переполнена зубами конодонтов, но почти 150 лет потребовалось на то, чтобы найти отпечатки их тел. У этих тел была еще одна примечательная особенность. В них совершенно отсутствовали твердые кости. Это были мягкотелые организмы с твердыми зубами.

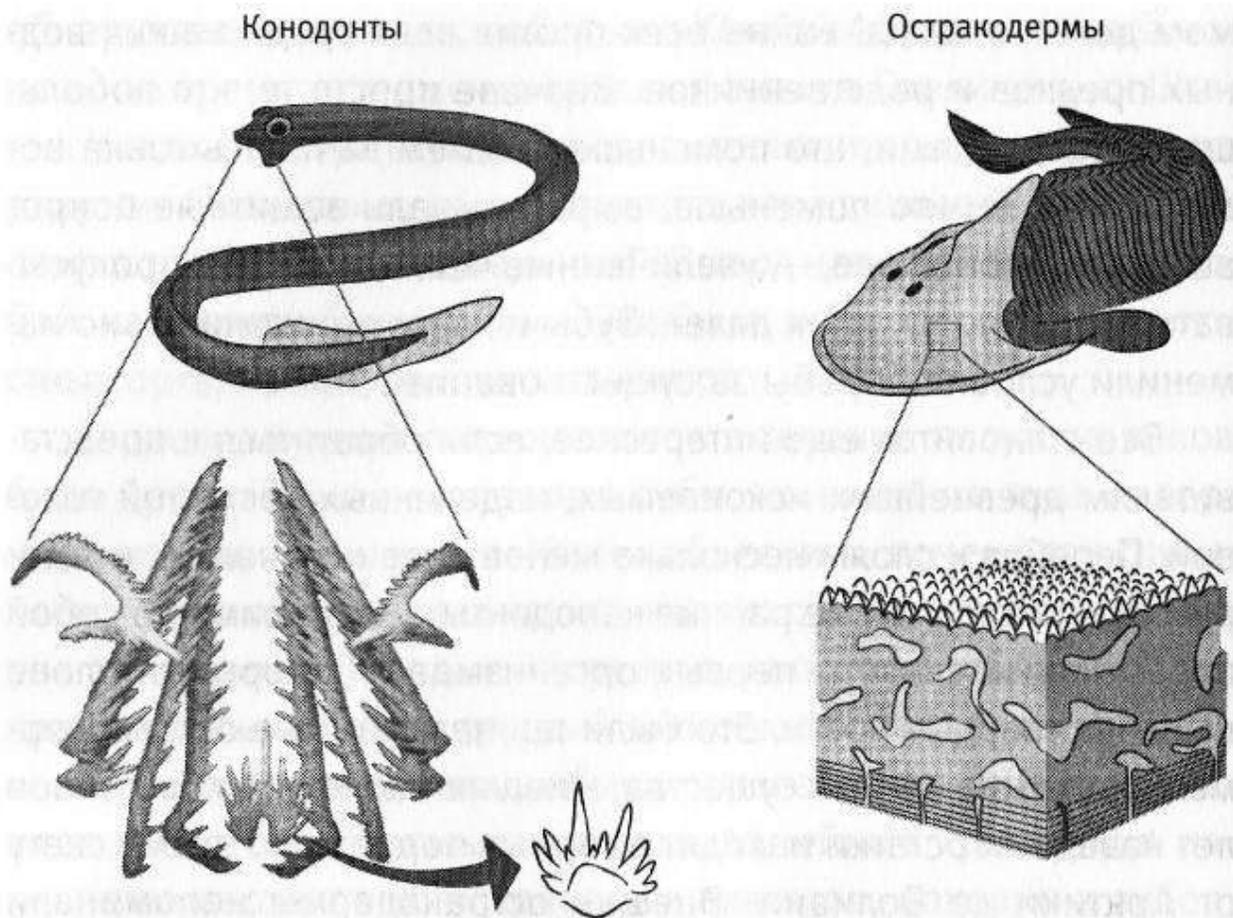
В течение многих лет палеонтологи спорили о том, почему вообще появились твердые внутренние скелеты, содержащие гидроксипатит. Для ученых, убежденных, что скелет начался с челюстей, позвоночника или защитных покровов, конодонты стали чем-то вроде лишнего зуба во рту. По-видимому, первыми твердыми структурами, содержащими гидроксипатит, были именно зубы. Твердые кости возникли не чтобы защищаться от других организмов, а чтобы питаться ими. С этого-то и в самом деле началась война всех против всех среди наших водных предков и родственников. Вначале просто те, кто побольше, питались теми, кто поменьше, а затем началась гонка вооружений. Те, кто поменьше, вырабатывали защитные покровы, те, кто побольше, — увеличенные челюсти, чтобы прокусывать эти покровы, и так далее. Зубы и кости принципиально изменили условия борьбы за существование.

Все становится еще интереснее, если обратиться к представителям древнейших ископаемых, наделенных костистой головой. Перейдя к слоям несколько менее древним, чем те, в которых содержатся самые ранние конодонты, мы увидим, что собой представляли скелеты первых организмов, у которых в голове имелись твердые кости. Это были так называемые остракодермы — похожие на рыб существа, жившие около 500 миллионов лет назад. Их остатки находят в горных породах по всему свету от Арктики до Боливии. Внешне остракодермы напоминали

гамбургеры с мясистыми хвостами.

Головная область остракодермы представляет собой что-то вроде большого диска, покрытого костистым щитом, напоминающим доспехи. Если бы я достал из ящика в музейном хранилище образец такого ископаемого и показал его вам, вы бы сразу заметили одну странную черту: голова остракодермы блестит примерно так же, как наши зубы или рыба чешуя.

Одна из главных радостей ученого связана с тем, что в мире природы есть неисчерпаемые запасы удивительного и поразительного. Прекрасным примером этого могут служить остракодермы, эти древние бесчелюстные животные. Они относятся к древнейшим существам, наделенным костистой головой. Если разрезать ископаемые остатки черепа остракодермы, залить в срез парафин, положить под микроскоп и рассмотреть, нашим глазам предстанет нечто не похожее ни на одну знакомую нам ткань. Покровы этого черепа выглядят по сути точно так же, как наши собственные зубы.



Конодонт (слева) и остракодерма (справа). От конодонтов ученым

были долгое время известны только отдельные зубы (которые в свою очередь тоже называют конодонтами). Затем, когда были обнаружены остатки целых организмов, удалось разобраться, что наборы этих зубов работали вместе, располагаясь рядами во рту древних мягкотелых бесчелюстных. У остракодерм голова была покрыта костистым щитом. При большом увеличении наружный слой этого щита оказывается состоящим из множества напоминающих зубы структур. Реконструкцию ряда зубов конодонта любезно предоставили доктор Марк Пернелл (Лестерский университет) и доктор Филип Донохью (Бристольский университет).

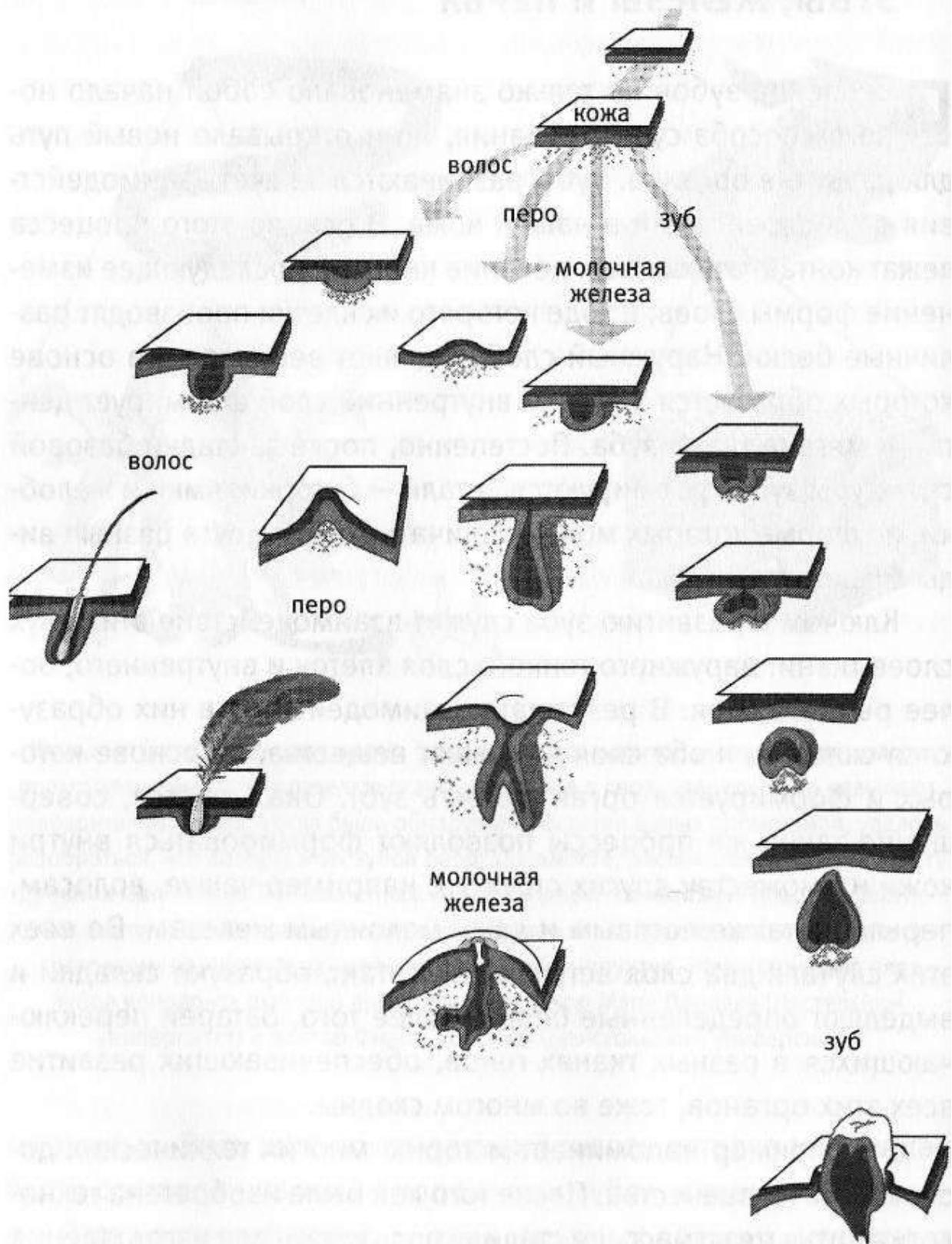
Снаружи они тоже покрыты эмалью. Весь щит, покрывающий голову остракодермы, как будто составлен из тысяч крошечных зубов, слившихся воедино. Этот костистый череп — один из самых древних, известных палеонтологам, — целиком состоит из зубов. Первоначально зубы возникли, чтобы кусать добычу, но затем животные стали использовать своеобразную разновидность зубов и для защиты от врагов.

Зубы, железы и перья

Появление зубов не только знаменовало собой начало нового способа существования, но и открывало новый путь для развития органов. Зубы развиваются за счет взаимодействия двух слоев ткани в нашей коже. В основе этого процесса лежат контакт этих слоев, деление клеток и последующее изменение формы слоев, в ходе которого их клетки производят различные белки. Наружный слой выделяет вещества, на основе которых образуется эмаль, а внутренний слой формирует дентин и мягкие ткани зуба. Постепенно, после закладки базовой структуры зуба, формируются детали — бугорки, ямки и желобки, по форме которых можно отличать друг от друга разные виды млекопитающих.

Ключом к развитию зуба служит взаимодействие этих двух слоев ткани: наружного тонкого слоя клеток и внутреннего, более рыхлого слоя. В результате взаимодействия в них образуются складки, и оба слоя выделяют вещества, на основе которых и формируется орган (то есть зуб). Оказывается, совершенно такие же процессы позволяют формироваться внутри кожи и множеству других структур, например чешуе, волосам, перьям, а также потовым и даже молочным железам. Во всех этих случаях два слоя вступают в контакт, образуют складки и выделяют определенные белки. Более того, батареи переключающихся в разных тканях генов, обеспечивающих развитие всех этих органов, тоже во многом сходны.

Этот пример напоминает историю многих технических достижений человечества. После того как была изобретена технология литья пластмасс, ее стали использовать для изготовления всего на свете, от автомобилей до детских игрушек. С зубами история была во многом похожая.



Зубы, молочные железы, перья и волосы — все это развивается в

результате взаимодействия двух слоев кожи.

После того как у животных впервые появился способ, позволяющий формировать зубы, модификации этого способа стали применяться для формирования множества разных органов, закладывающихся внутри кожи. На примере остракодерм мы видели, как далеко может заходить применение этого способа. Во многих отношениях еще дальше оно зашло у птиц, рептилий и людей. У всех этих существ никогда бы не возникли перья, чешуи или молочные железы, если бы когда-то у их предков не возникли зубы. Видоизмененный механизм формирования зубов позволил развивать многие другие важные структуры кожи. Между такими разными органами, как зубы, перья и молочные железы, есть вполне реальная глубокая историческая связь.

В четырех главах мы с вами говорили о способах изучать историю появления и развития органов у самых разных живых существ. В первой главе мы рассмотрели способ, позволяющий предсказывать, в каких именно древних горных породах мы можем найти в ископаемом виде древнейшие формы наших собственных органов. Во второй главе речь шла о том, как проследить историю развития определенных элементов скелета, начиная от рыб и заканчивая людьми. В третьей главе было показано, как работает у разных организмов та составляющая их тела, которая действительно передается по наследству, а именно ДНК, и как формируются органы в соответствии с записанным на ДНК рецептом. Здесь, в четвертой главе, мы рассмотрели общую основу таких разных органов, как зубы, молочные железы и перья, и убедились, что биологические механизмы, лежащие в основе их развития, представляют собой варианты одного и того же. Вглядываясь в черты глубокого сходства, объединяющего органы и тела разных живых организмов, мы начинаем убеждаться, что все разнообразие жизни на Земле представляет собою лишь вариации на одну и ту же тему.

Глава 5. Включи голову.

За два дня до экзамена по курсу анатомии около двух часов ночи я сидел в лаборатории и учил черепно-мозговые нервы. Этих нервов у человека двенадцать пар, и каждая из них ветвится, причудливо изгибаясь и извиваясь внутри черепа. Чтобы изучать эти нервы, мы разделяли череп на две половинки по линии, идущей от лба до подбородка, и выпиливали куски скуловых костей. И вот я сидел, держа в каждой руке по половинке головы, и вглядывался в извилистые пути нервов, идущих от мозга к различным мышцам и органам чувств.

Особенно меня поражали два черепно-мозговых нерва — тройничный и лицевой. Их замысловатые пути, как оказалось, сводились к чему-то такому простому, такому вопиюще ясному, что человеческая голова предстала передо мной в совершенно новом свете. Увидеть эту скрытую простоту мне удалось благодаря тому, что я разобрался в намного более простом устройстве черепно-мозговых нервов акулы. Изыщество того, что мне удалось понять (хотя в этом и не было ничего нового: сравнительные анатомы разобрались в этом сто с лишним лет назад), вместе с грузом предстоящего экзамена заставило меня забыть, где я нахожусь. В какой-то момент я посмотрел вокруг. Была глубокая ночь, и я сидел в лаборатории один. Вокруг меня лежали мертвые тела двадцати пяти человек, накрытые тканью. В первый и в последний раз меня стала бить дрожь. Мне стало так жутко, что волосы у меня на затылке встали дыбом, ноги сами понесли меня прочь, и через какие-то доли секунды я уже стоял, запыхавшись, на автобусной остановке. Разумеется, я чувствовал себя полным идиотом. Я помню, как сказал себе: Шубин, у тебя совсем крыша съехала. Впрочем, эта мысль занимала меня недолго: я вскоре обнаружил, что оставил в лаборатории ключи от дома.

Крыша у меня поехала потому, что анатомия человеческой головы глубоко завораживает. В ней есть особая красота. Одна из радостей занятия наукой состоит в том, что порой нам открываются связи, которые вносят глубокую стройность в то, что поначалу казалось бессмысленным и неупорядоченным. Бывшая мешанина оказывается частью простого плана, и вы чувствуете, что видите вещи насквозь, прозреваете самую их суть. В этой главе мы посмотрим на самую суть того, что скрыто у нас в головах. И в рыбьих головах, конечно, тоже.

Беспорядок в головах

Анатомия головы не только сложна, но и труднодоступна для изучения, потому что ее ткани, в отличие от других частей нашего тела, заключены в костяную коробку черепа. Чтобы увидеть находящиеся в голове сосуды и органы, нам нужно смотреть в прямом смысле сквозь скулы, лоб и другие части черепа. Если мы его вскроем, то увидим клубок, состоящий из чего-то похожего на леску. Сосуды и нервы хитрым образом петляют и изгибаются, путешествуя по внутренней полости черепа. Тысячи ответвлений нервов заключены в небольшой черепной коробке, состоящей из многих костей и оплетенной множеством мышц. На первый взгляд, все это вместе составляет невообразимую путаницу.

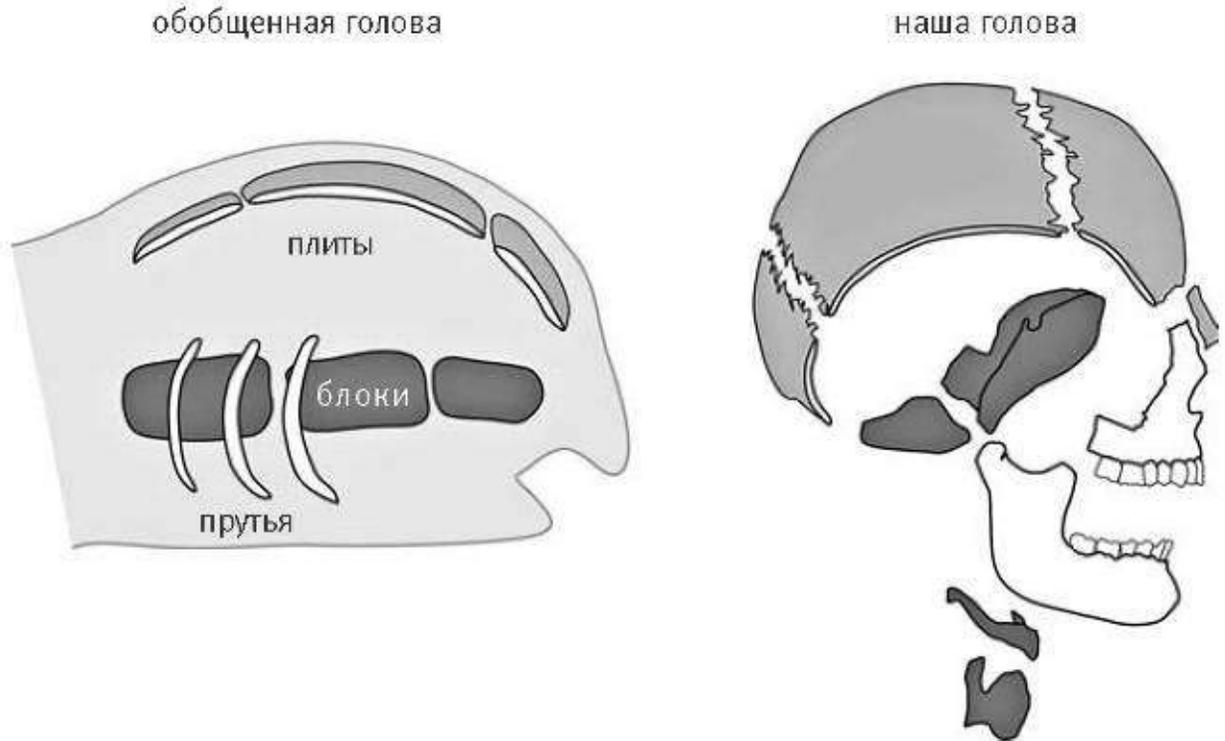
Наш череп состоит из трех основных частей: "плит", "блоков" и "прутьев". Плиты закрывают собой наш мозг. Их можно нащупать, если похлопать себя по голове. Эти довольно крупные плиты соединены друг с другом как детали пазла и составляют значительную часть черепа. У новорожденных они отделены друг от друга. Промежуток между ними — родничок — у младенцев вполне заметен (иногда можно видеть даже пульсацию сосудов мозга под ним). По мере роста ребенка его кости увеличиваются и к двухлетнему возрасту полностью срастаются.

Другая часть нашего черепа располагается под мозгом, образуя платформу, которая его поддерживает. В отличие от похожих на плиты костей, закрывающих мозг снаружи, кости этой платформы напоминают причудливые блоки. Через них проходит множество нервов и сосудов. Кости третьего типа — это наши челюсти. Кроме того, косточки этого типа есть у нас во внутреннем ухе и в горле. В начале развития они напоминают прутья, которые постепенно меняют форму и по-разному разрастаются, впоследствии помогая нам жевать, слышать и глотать.

Внутри черепа имеется ряд полостей, в которых заключены разные органы. Самая большая из них, разумеется, занята мозгом. В других полостях располагаются внутренние структуры уха и носа, а также глазные яблоки. Чтобы разобраться в анатомии головы, необходимо научиться представлять себе все эти полости и органы в объеме, в трех измерениях.

К костям и органам головы прикреплены мышцы, позволяющие нам жевать и говорить, а также двигать глазами и всей головой. К этим

мышцам ведут двенадцать пар нервов, каждый из которых проходит определенным путем от мозга к тому или иному участку головы. Это и есть пресловутые черепно-мозговые нервы, внушающие ужас студентам.



Плиты, блоки и прутья: тема черепа, и одна из вариаций на эту тему — череп человека. Для каждой косточки нашего черепа можно проследить историю ее происхождения из одной такой плиты, блока или прута.

Чтобы понять основы строения головы, нужно увидеть в черепно-мозговых нервах нечто большее, чем просто беспорядочный клубок. На самом деле многие из этих нервов довольно просты. Самые простые из черепно-мозговых нервов выполняют единственную функцию и ведут к единственной мышце или органу. Нерв, ведущий к внутренним структурам носа, так называемый обонятельный, выполняет только одну работу — переносит информацию в мозг от тканей, выстилающих носовую полость. Другие нервы, ведущие к нашим глазам и ушам, в этом смысле тоже не слишком сложны: зрительный нерв отвечает за зрение, слуховой (преддверно-улитковый) — за слух. Нервы еще четырех пар обслуживают исключительно мышцы, например, позволяя нам вращать глазами в орбитах или двигать головой.

Но есть четыре пары черепно-мозговых нервов, которые уже не один десяток лет приводят студентов-медиков в отчаяние. И неспроста: у этих четырех нервов функции очень сложные, и для выполнения своей работы они проходят сквозь наши головы весьма причудливым путем. Здесь нужно особо отметить тройничный и лицевой нервы. Оба они выходят из мозга и разделяются, образуя умопомрачительные системы ответвлений. Каждый из этих нервов во многом похож на кабель, по которому идет множество проводов: телевидение, Интернет, телефон. По этим нервам тоже идет разная информация, обеспечивая работу как органов чувств, так и мышц. Отдельные чувствительные и двигательные волокна могут быть связаны с разными участками мозга, но сплетаются в единый кабель (который мы и называем нервом), а затем вновь расплетаются, разветвляясь и достигая самых разных частей головы.

Ответвления тройничного нерва выполняют две основные функции: они управляют мышцами и переносят в мозг информацию о том, что чувствуют нервные окончания, расположенные в коже на большей части лица. Мышцы, контролируемые тройничным нервом, включают те, которые мы используем при жевании, а также миниатюрные мышцы в глубине нашего уха. Кроме того, тройничный нерв играет важнейшую роль в обеспечении чувствительности лица. От пощечины лицо у нас сильно болит. За вычетом ощущений, связанных с эмоциями, боль от пощечины связана именно с работой тройничного нерва, который переносит информацию к мозгу от нервных окончаний, расположенных на лице. Другие ответвления тройничного нерва хорошо знакомы стоматологам. Разные ветви этого нерва ведут к корням разных зубов. Небольшой укол обезболивающего в район, где проходит одно из этих ответвлений, позволяет отключать чувствительность того или иного участка зубного ряда.

Лицевой нерв тоже управляет мышцами и переносит информацию о чувствах. Свое название он получил за то, что является главным нервом, управляющим мимическими мышцами — теми, которые определяют мимику, то есть выражение лица. Мы задействуем эти мышцы, когда улыбаемся, хмуримся, поднимаем и опускаем брови, раздуваем ноздри и так далее. У этих мышц очаровательные названия, связанные с их функциями. Одна из важнейших мышц, работающих, когда мы хмуримся, — она опускает вниз уголки рта — называется *depressor anguli oris*. Другое эффектное название относится к мышце, с помощью которой мы заинтересованно поднимаем брови: *corrugator supercilii*.

Когда мы раздуваем ноздри, мы используем мышцу *nasalis*. Каждая из этих мышц, как и все остальные мимические мышцы, контролируется ветвями лицевого нерва. Невольная кривая улыбка или полуопущенное веко могут свидетельствовать о том, что с лицевым нервом в одной половине головы что-то не в порядке.

Вам, наверное, уже ясно, почему я так допоздна засиделся, пытаюсь выучить эти нервы. Все, что с ними связано, казалось совершенной бессмыслицей. Например, и от тройничного, и от лицевого нервов отходят маленькие ответвления, ведущие к мышцам, расположенным в глубине наших ушей. Почему два разных нерва, которые иннервируют совершенно разные участки лица и челюсти, посылают ответвления к мышцам уха, лежащим по соседству друг с другом? Еще больше сбивает с толку то, что тройничный и лицевой нервы едва не перекрещиваются, посылая ветви в разные участки нашего лица и челюстей. Почему? Зачем? Функции этих нервов кажутся избыточными, пути — бесцельно запутанными, в их строении не видно ни логики, ни смысла, и совсем уже непонятно, почему те или иные их участки соответствуют тем или иным плитам, блокам и прутьям, из которых состоит наш череп.

Размышления об этих нервах напоминают мне о первых днях, проведенных мною в Чикаго в 2001 году. Мне предоставили место под лабораторию в здании, построенном лет сто назад, и лабораторию нужно было оборудовать новой электрической проводкой, водопроводом, кондиционерами, вытяжными шкафами и прочим. Я помню день, когда рабочие впервые вскрыли стены, обнажив внутренности здания. Когда они увидели проведенные внутри стен системы электропроводки и водоснабжения, они отреагировали точно так же, как я, впервые вскрыв человеческую голову и увидев тройничный и лицевой нервы со всеми их ответвлениями. Провода, кабели и трубы внутри стен были переплетены, образуя непонятную мешанину. Ни один человек в здравом уме не спроектировал бы здание подобным образом, чтобы кабели и трубы так переплетались внутри стен, образуя причудливые петли и изгибы.

Вот в этом-то и вся соль. Здание моей лаборатории было построено в 1896 году, и состояние систем его водоснабжения и энергоснабжения отражало последствия неоднократных переделок, до неузнаваемости изменивших первоначальный проект. Разобраться в проводах и трубах этого здания можно было, лишь разобравшись в истории всех капитальных ремонтов, в ходе которых его переоборудовали для новых и новых поколений ученых. Строение нашей головы тоже имеет долгую

историю, и только разобравшись в этой истории, можно понять, почему именно так устроены сложные черепно-мозговые нервы, такие как тройничный и лицевой.

Для каждого из нас эта история начинается с оплодотворенной яйцеклетки.

Суть в эмбрионах

В самом начале головы ни у кого из нас нет. Новый организм возникает, когда сперматозоид и яйцеклетка сливаются, образуя новую клетку — оплодотворенную яйцеклетку (зиготу). В течение первых трех недель от момента зачатия мы проходим ряд стадий от одной клетки до сферы из клеток, затем до структуры, напоминающей по форме тарелку фрисби, а затем до некоего подобия трубки, в составе которой уже есть несколько разных типов тканей. В промежутке между двадцать третьим и двадцать восьмым днем после зачатия передний конец этой трубки утолщается и образует складку, загибаясь на брюшную сторону тела, тем самым придавая эмбриону характерную скрюченную позу. На этом этапе развития голова эмбриона напоминает по форме крупную каплю. В основании этой капли находится ключ к разгадке многих фундаментальных особенностей строения нашей головы.

Вокруг той области, которая станет нашим горлом, развиваются четыре небольших утолщения. Где-то после первых трех недель развития возникают первые два, а следующие два появляются дня на четыре позже. Снаружи каждое такое утолщение выглядит скромно — как простое вздутие, отделенное от следующего такого же вздутия небольшой бороздкой. Но, проследив то, что происходит внутри этих вздутий и бороздок, можно увидеть порядок и красоту в строении нашей головы — в том числе и в строении тройничного и лицевого нервов.

Эти утолщения называют дугами. Некоторые из клеток, расположенных внутри этих дуг, дадут начало костной ткани, некоторые — мышцам и кровеносным сосудам. В каждой дуге находится сложная смесь клеток. Одни из этих клеток возникли в результате деления прямо на месте, другие мигрировали издалека, чтобы войти в состав дуги. Если проследить, какие структуры взрослого организма возникнут из тех или иных клеток дуги, в устройстве нашей головы все встанет на свои места.

В конечном итоге из тканей первой дуги сформируются верхняя и нижняя челюсти, две крошечных слуховых косточки (молоточек и наковальня) и все сосуды и мышцы, которые их обслуживают. Из второй дуги сформируется третья слуховая косточка — стремечко, небольшая кость горла и большинство мышц, управляющих выражением лица. Из

третьей дуги разовьются кости, мышцы и нервы, расположенные глубже в горле, — мы используем их, когда глотаем. Наконец, из четвертой дуги возникнут самые глубокие структуры горла, в том числе части гортани, а также мышцы и сосуды, окружающие гортань и помогающие ее работе.

Если бы мы могли уменьшиться до размеров булавочной головки и забраться в рот развивающемуся эмбриону, мы бы увидели на внутренней поверхности пищеварительного тракта углубления, соответствующие каждому из наружных утолщений. Эти углубления тоже, подобно наружным дугам, формируют в процессе развития ряд важных структур. Первое углубление удлиняется и образует евстахиеву трубу, а также некоторые внутренние структуры уха. Второе образует полость, на стенках которой расположены миндалины. А из стенок третьего и четвертого развиваются важные железы, в том числе вилочковая, паращитовидная и щитовидная.

Все эти сведения, которые я сейчас сообщил, дают незаменимый ключ к пониманию устройства сложнейших черепно-мозговых нервов и значительной части структур головы. Когда мы думаем о тройничном нерве, нужно держать в голове то, что мы знаем о первой дуге, а когда думаем о лицевом нерве — то, что мы знаем о второй. Причина, по которой тройничный нерв идет и к челюстям, и к внутренним структурам уха, состоит в том, что все структуры, за которые этот нерв отвечает, развились из тканей, первоначально входивших в состав первой дуги. То же самое относится к лицевому нерву и ко второй дуге. Что общего между мимическими мышцами и мышцами в глубине уха, управляемыми лицевым нервом? То, что все они развились из второй дуги. Что же касается нервов третьей и четвертой дуг, то и их сложные пути, в свою очередь, тоже связаны с тем, что они иннервируют различные структуры, развившиеся из тканей соответствующих дуг. Нервы третьей и четвертой дуг, к которым относятся языкоглоточный и блуждающий, подчиняются тому же правилу, что нервы первых двух дуг: каждый из них ведет к структурам, развившимся из той дуги, с которой данный нерв связан.

Разобравшись в принципиальном плане строения нашей головы, мы можем понять, в чем суть одного апокрифа, который рассказывают анатомы. Согласно легенде, в 1820 году Иоганн Вольфганг Гете шел по еврейскому кладбищу в Вене и увидел разлагающийся остов барана. Позвонки были обнажены, и на них лежал раздробленный череп. И тут Гете посетило озарение: он увидел, что обломки, на которые был разбит

череп, напоминают грудку деформированных позвонков. Это прозрение открыло для Гете истинную природу костей черепа: он состоит из позвонков, слившихся и разросшихся так, что образовались полости, в которых заключены наши органы чувств и головной мозг.



Если проследить ход преобразования дуг в процессе развития от эмбриона до взрослого человека, мы увидим, как из тканей этих дуг возникают структуры челюстей, органов слуха, гортани, горла. Кости, мышцы, нервы и сосуды всех этих структур развиваются из клеток, первоначально входивших в состав дуг эмбриона.

Это была поистине революционная идея, открывшая, что в основе строения черепа и позвоночника лежат варианты одного и того же глобального плана. Идея эта в начале XIX века, должно быть, витала в воздухе, потому что примерно в то же время она посетила нескольких других людей, в том числе одного выдающегося немецкого естествоиспытателя — Лоренца Окена.

Гете и Окен приблизились к пониманию одной фундаментальной истины, хотя в то время они и не смогли еще в полной мере ее осмыслить. Наше тело разделено на сегменты. Система этих сегментов особенно отчетливо видна на примере позвонков. Каждый позвонок представляет собой отдельный строительный блок. Нервы, отходящие от спинного мозга, в свою очередь, соответствуют системе позвонков. Они выходят из позвоночника и иннервируют различные органы тела. Его разделение на сегменты становится очевидным, если мы

рассмотрим, от каких участков спинного мозга отходят нервы, идущие к тем или иным органам. К примеру, мышцы наших ног управляются нервами, выходящими из спинного мозга намного ниже, чем нервы, управляющие мышцами рук. На первый взгляд кажется, что голова устроена иначе, но на деле она тоже по сути сегментирована. Рассмотренные нами дуги соответствуют определенным сегментам, в состав которых входят кости, мышцы, сосуды и нервы. Если рассматривать взрослого человека, эти сегменты будут незаметны. Но мы явственно видим их у эмбриона.

По ходу развития эмбриона во взрослый организм череп постепенно утрачивает черты, свидетельствующие о его происхождении из сегментированных структур. Похожие на плиты кости нашего черепа развиваются над дугами эмбриона, и по мере формирования головы постепенно изменяется положение мышц, сосудов, костей и ведущих к ним нервов.

Представления о том, как идет развитие головы, позволяют нам предсказывать, где искать недостающие или недоразвитые структуры у детей, появившихся на свет с тем или иным врожденным дефектом. Например, дети, у которых на стадии эмбриона оказалась поражена первая дуга, имеют уменьшенные челюсти и дефекты слуха, связанные с тем, что у них отсутствуют или недоразвиты две слуховые косточки — молоточек и наковальня. В норме эти структуры формируются из тканей первой дуги.

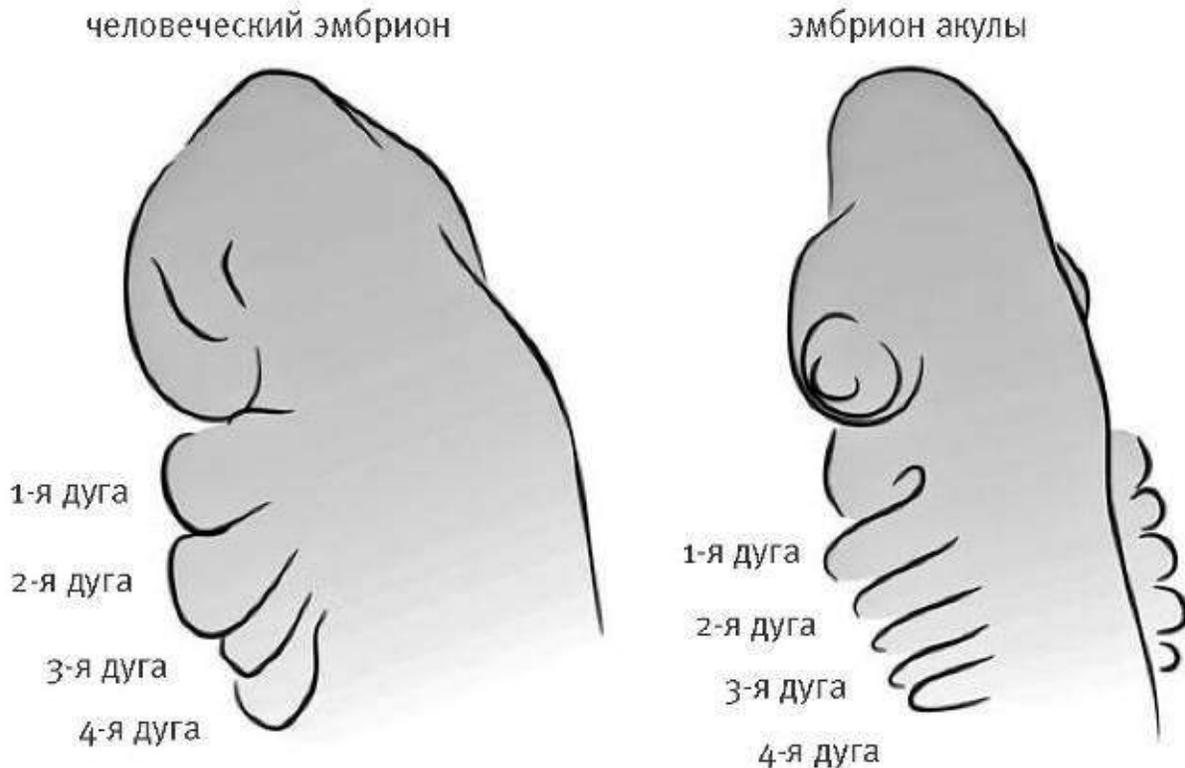
Эти представления дают нам что-то вроде карты дорог, ведущих от дуг зародыша к структурам черепа, сложнейшим черепно-мозговым нервам, а также к мышцам, сосудам, костям и железам, входящим в состав нашей головы и шеи. Но эта карта также указывает нам еще на одну очень важную и глубокую связь — нашу родственную связь с акулами.

Внутренняя акула

Есть немало анекдотов про адвокатов, суть которых в том, что адвокаты — это особо ненасытная разновидность акул. Когда я преподавал эмбриологию, был популярен один из таких анекдотов, и мне подумалось, что этот анекдот про всех нас, а не только про адвокатов. Все мы видоизмененные акулы, или, иначе говоря, в каждом из нас есть что-то от адвоката.

Как мы с вами уже убедились, тайна устройства нашей головы во многом скрыта в дугах — утолщениях на теле эмбриона, от которых дороги ведут к сложным черепно-мозговым нервам и другим важнейшим структурам головы. Эти неприметные утолщения и бороздки между ними более полутора веков привлекали внимание анатомов тем, что они поразительно похожи на жаберные дуги и жаберные щели, расположенные в районе горла у рыб и акул.

У рыбьих эмбрионов имеются такие же вздутия и углубления, но у них, в отличие от нас, эти углубления в конечном итоге становятся сквозными прорезями, по которым вода проходит через жабры. У нас же эти углубления в норме запечатываются и не прорезают стенку тела насквозь. В аномальных случаях жаберная щель зародыша может оставаться открытой, образуя карман или кисту. Например, так называемая жаберная киста представляет собой доброкачественный, заполненный жидкостью карман внутри шеи человека. Этот карман образуется от того, что у зародыша не закрывается третья или четвертая жаберная щель. В редких случаях младенцы появляются на свет с рудиментами хрящей древней жаберной дуги — небольшими похожими на прут хрящами, составлявшими у наших предков скелет третьей жаберной дуги. В этих случаях хирургам приходится удалять из человеческого организма древнюю рыбу, которая, к сожалению, вернулась и напала на своего потомка.



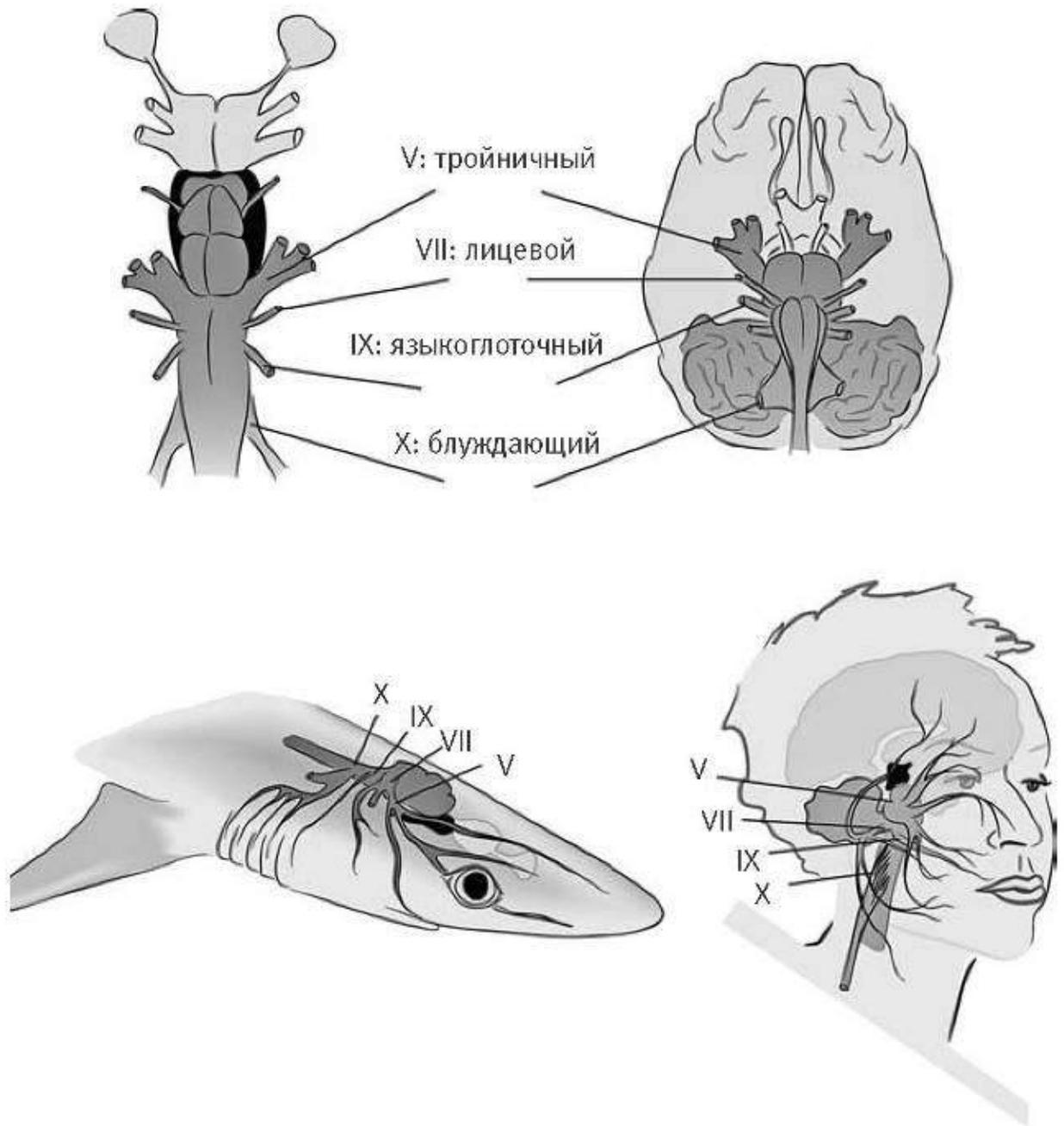
По ходу развития у всех позвоночных животных от акул до людей возникают эти четыре дуги. Но самое интересное происходит внутри этих дуг. Заглянув внутрь, мы можем по пунктам сравнить нашу голову с головой акулы и увидеть их глубинное сходство.

Рассмотрим развитие первой дуги человека и акулы, и мы увидим, что из ее тканей образуется одна и та же структура — челюсти. Разница состоит прежде всего в том, что у человека из тканей первой дуги образуются также некоторые слуховые косточки, которых нет у акулы. Неудивительно, что черепно-мозговой нерв, ведущий к челюстям, и у акул, и у людей один и тот же. Это нерв первой дуги, то есть тройничный нерв.

Клетки, расположенные внутри второй дуги, делятся, видоизменяются и дают начало решетке из хрящевой и мышечной тканей. У нас хрящи этой решетки разделяются и видоизменяются, образуя, во-первых, одну из косточек среднего уха (стремечко), а во-вторых, еще несколько небольших косточек в основании головы и горла. Одна из этих косточек, так называемый гиоид, помогает нам глотать. Возможностью глотать и слушать музыку мы обязаны структурам, развивающимся из второй дуги эмбриона.

У акул хрящи этой решетки тоже разделяются и образуют две кости,

которые поддерживают челюсти. Одна из них (нижняя) соответствует нашему гиоиду, а другая (верхняя) поддерживает верхнюю челюсть. Если вы когда-нибудь видели, как большая белая акула пытается схватить кого-то зубами (например, сидящего в клетке ныряльщика), вы, должно быть, замечали, что ее верхняя челюсть может выдвигаться вперед, когда акула кусает, а затем возвращаться обратно. Верхняя кость, образуемая второй дугой, составляет часть рычажной системы, работа которой делает возможным такое движение челюстей. У этой кости, поддерживающей верхнюю челюсть акулы, есть и еще одно примечательное свойство: она соответствует одной из костей нашего среднего уха — стремечку. Кости, которые у акул поддерживают верхнюю и нижнюю челюсти, помогают нам глотать и слышать.



На первый взгляд кажется, что наши черепно-мозговые нервы (внизу справа) не похожи на черепно-мозговые нервы акулы (внизу слева). Но если присмотреться внимательнее, мы увидим их глубинное сходство. Все основные нервы человека есть уже у акулы. При этом соответствующие друг другу нервы акулы и человека не только обслуживают сходные структуры, но даже выходят из мозга в том же порядке.

Что же касается третьей и четвертой дуг, то оказывается, что

многие из структур, которыми мы пользуемся, чтобы говорить и глотать, у акул соответствуют структурам, служащим опорой для жабр. Мышцы и черепно-мозговые нервы, которые позволяют нам глотать и говорить, акулам и рыбам позволяют двигать жабрами.

Строение нашей головы может показаться невообразимо сложным, но в его основе лежит простой и изящный план. Этот план — общий для всех живых существ, обладающих черепом, будь то акулы, костные рыбы, саламандры или люди. Открытие этого фундаментального плана было огромным достижением анатомии девятнадцатого века — времени, когда анатомы впервые стали исследовать под микроскопом зародыши разных животных. В 1872 году кембриджский анатом Фрэнсис Мейтленд Бальфур впервые обратил внимание на этот план, исследуя внутреннее строение жаберных дуг акулы. К сожалению, вскоре после этого он погиб в горах в результате несчастного случая, совершая восхождение на один из пиков Швейцарских Альп. Ему было немного за тридцать.

Гены жаберных дуг

В течение первых нескольких недель после зачатия в клетках жаберных дуг зародыша и во всех тканях, из которых впоследствии образуется наш мозг, последовательно включаются и выключаются целые батареи генов. В соответствии с инструкциями, записанными в этих генах, формируются разные части нашей головы. Представьте себе, что каждый участок головы получает свой генетический адрес, отличный от адресов других участков и обеспечивающий этому участку особый путь развития. Видоизменяя этот адрес, можно видоизменить и развивающиеся по этому адресу структуры.

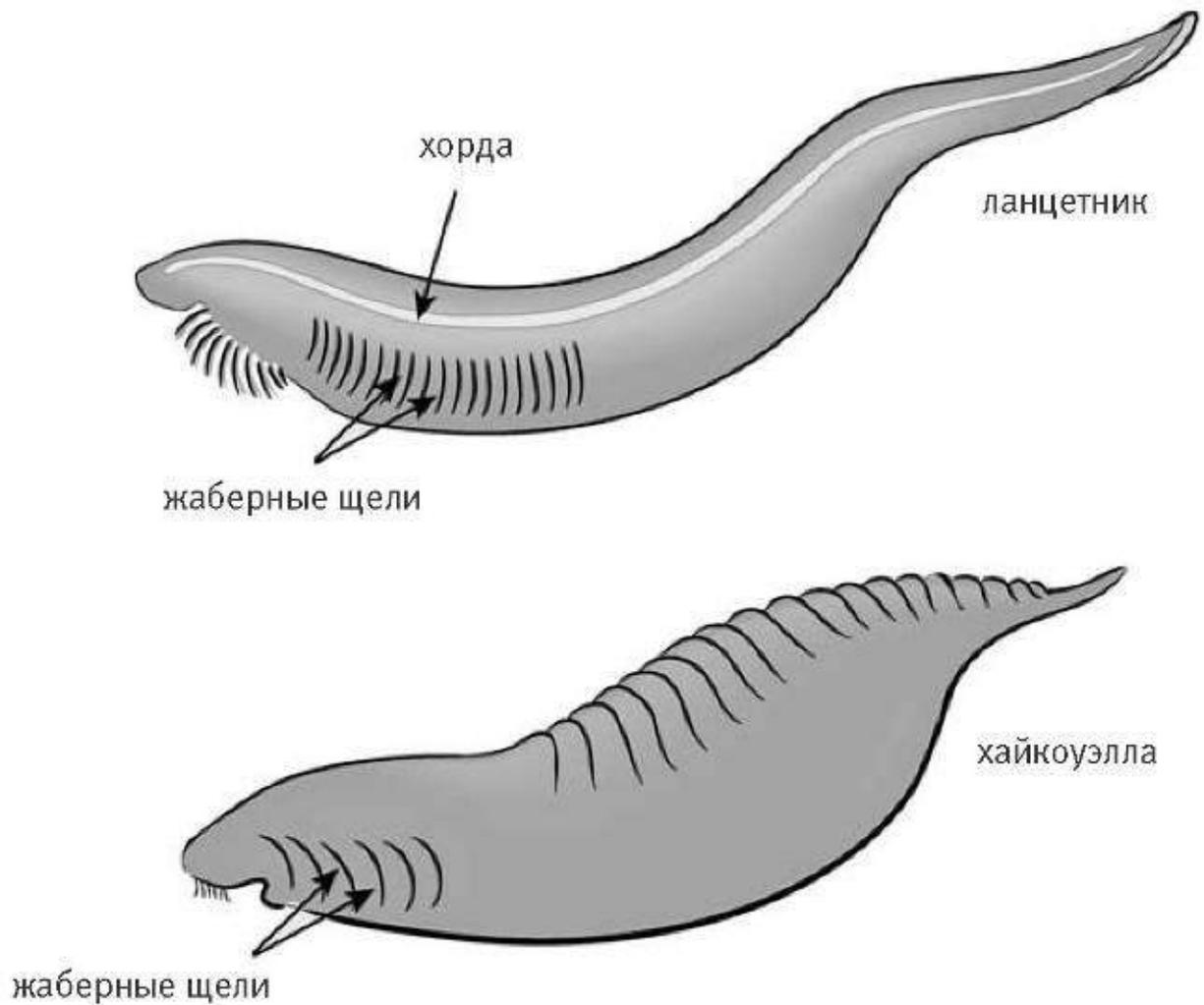
Например, ген *Otx* активен в переднем участке, где формируется первая жаберная дуга. Позади этого участка работает ряд так называемых *Нох*-генов. В каждой жаберной дуге задействован разный набор этих генов. Обладая соответствующей информацией, мы можем составить карту наших жаберных дуг и созвездий из генов, задействованных в развитии каждой из них.

После этого можно приступить к экспериментам. Заменяем генетический адрес одной дуги на генетический адрес другой. Возьмем эмбрион лягушки, выключим в нем некоторые гены, сделаем генетические сигналы клеток первой и второй дуг похожими друг на друга и в итоге получим лягушку с удвоенной челюстью: там, где должен был развиваться гиоид, вместо него формируется вторая нижняя челюсть. Этот опыт показывает, какую принципиальную роль играют в развитии головы генетические адреса жаберных дуг. Стоит изменить адрес, как изменяются и структуры, развивающиеся из тканей дуги. Этот подход особенно замечателен тем, что позволяет нам экспериментировать с планом строения головы: мы можем по сути произвольно манипулировать порядковыми номерами дуг посредством изменения активности генов в составляющих эти дуги клетках.

Идем по головам: от безголовых морских чудищ до наших головастых предков

Но почему мы так подробно останавливаемся на лягушках и акулах? Почему не сравниваем строение нашей головы со строением других животных, например насекомых или червей? Но стоит ли это делать, если у этих существ нет даже черепа, не говоря уже о черепно-мозговых нервах? У всех этих животных нет даже костей. Если мы отвлечемся от рыб и перейдем к червям, мы окажемся в мягком и безголовом мире. Хотя и в нем, если присмотреться внимательно, можно найти частички нас самих.

Те из нас, кто преподает сравнительную анатомию студентам младших курсов, обычно начинают первую лекцию со слайда, на котором запечатлен ланцетник. Каждый год в сентябре по всей стране, от штата Мэн до Калифорнии, на экранах в лекционных аудиториях появляются сотни изображений этого животного. Почему? Вы, наверное, помните простую схему разделения всех животных на позвоночных и беспозвоночных.



Ближайшие родственники животных, наделенных головами, — ланцетники. На рисунке показан ланцетник и реконструкция ископаемой хордовой хайкоуэллы (*Haikouella*), жившей около 530 миллионов лет назад. У обоих этих существ есть хорда, спинной нервный тяж и жаберные щели. Хайкоуэлла известна по трем с лишним сотням экземпляров, добытых палеонтологами на юге Китая.

Так вот, ланцетник, с одной стороны, беспозвоночное, что-то вроде червя, а с другой стороны, он обладает многими общими признаками с позвоночными животными, такими как рыбы, амфибии, млекопитающие. Позвоночника у ланцетника нет, но, подобно всем существам, у которых позвоночник имеется, ланцетник обладает нервным тяжем, проходящим по телу внутри спины. Кроме того, параллельно этому нервному тяжу по всему телу ланцетника проходит упругий прут. Этот прут называют хордой. Он заполнен желеобразным

веществом и служит опорой для всего тела. На стадии эмбриона у каждого из нас тоже была хорда, но, в отличие от ланцетника, у нас она постепенно атрофируется, уступая место формирующемуся вокруг нее позвоночнику. Остатки хорды при этом входят в состав хрящевых дисков, разделяющих наши позвонки. При повреждении такого диска из него выходит желеобразное вещество, когда-то заключенное внутри хорды, отчего в спине возникают ужасные боли, а движение позвонков друг относительно друга оказывается затруднено. Повреждая один из этих дисков, мы травмируем очень древнюю часть нашего тела. За которую надо сказать спасибо ланцетнику.

Ланцетник — не единственное такое беспозвоночное. Много ярких примеров подобных организмов можно найти не на мелководьях современных морей, где живут ланцетники, а в древних горных породах, залегающих в Китае и в Канаде. В отложениях, образовавшихся более 500 миллионов лет назад, захоронены остатки небольших существ, у которых не было головы, черепа, головного мозга и черепно-мозговых нервов. Они выглядят неброско, напоминают кляксы на поверхности камня, но качество сохранности у этих ископаемых необычайное. Если рассматривать их под микроскопом, можно увидеть великолепные отпечатки, отражающие мелкие детали строения мягких тканей, а иногда даже рельеф кожи. На этих отпечатках можно увидеть и еще одну удивительную особенность этих существ. Эти ископаемые — древнейшие известные организмы, обладавшие хордой и спинным нервным тяжом. Они позволяют нам узнать кое-что о происхождении частей нашего собственного тела.

Но кроме того, у этих миниатюрных беспозвоночных есть и еще одно общее с нами свойство — жаберные дуги. Например, у ланцетника их больше сотни, и внутри каждой из них находится небольшой хрящевой прутик. Подобно хрящам, на основе которых формируются наши челюсти, слуховые косточки и части гортани, эти хрящи служат опорой для жаберных щелей. Истоки строения нашей головы мы находим у беспозвоночных, вовсе головы не имеющих. Зачем ланцетнику его жаберные щели? Сквозь них прокачивается вода, из которой при этом отфильтровываются мелкие частички пищи. Из этого скромного источника берут начало основные структуры нашей головы. Точно так же на протяжении многих миллионов лет менялись и меняли свои функции зубы, гены, конечности и базовая структура нашей головы.

Глава 6. Лучший план тела.

Тело каждого из нас представляет собой совокупность примерно двух триллионов клеток, собранных вместе строго определенным образом. Наши тела трехмерны, и все клетки и органы занимают в каждом из трех измерений некоторое отведенное им место. Наверху расположена голова. Вниз от нее идет позвоночник. Кишечник располагается в передней части живота. Руки и ноги крепятся к позвоночнику по бокам. Все эти особенности строения отличают нас от примитивно устроенных организмов, представляющих собой комки или диски из клеток.

Такого рода особенности строения не менее важны и для тел других живых существ. Подобно нам, рыбы, ящерицы и коровы тоже обладают двусторонне симметричными телами, у которых есть перед и зад, верх и низ, правая и левая сторона. Спереди (он соответствует нашему верху) у всех этих животных находится голова, которая наделена органами чувств и внутри которой расположен мозг. Вдоль спины у них тоже проходит позвоночник. Кроме того, у них, как и у нас, на одном конце туловища тоже расположен рот, а на другом — анальное отверстие.

Голова находится спереди, она смотрит в том направлении, в котором организм обычно двигается — плывет, бежит или идет. Нетрудно понять, почему для большинства условий обитания (особенно для водной среды) не подошло бы строение организма, при котором спереди находился бы не рот, а анус. Это затрудняло бы не только питание, но и взаимодействие между особями.

Сложнее отыскать основы схемы нашего строения у более примитивных животных — например, у медуз. Тела у медуз имеют иное строение: их клетки образуют лишь два слоя, наружный и внутренний, а весь организм имеет форму диска. У них есть верх и низ, но нет переда и зада, головы и хвоста, правой и левой стороны, поэтому кажется, что они устроены совсем иначе, чем мы. Не стоит и пытаться сравнить план строения нашего тела с планом строения губки. Вы, конечно, можете попробовать, но результат будет принадлежать скорее области психологии, чем анатомии.

Чтобы должным образом сравнить самих себя с этими примитивными организмами, нам нужны определенные инструменты.

История возникновения нашего плана строения, как и история появления наших рук и ног, во многом записана в нашем пути развития от оплодотворенной яйцеклетки до взрослого организма. В эмбрионах спрятаны ключи к решению величайших загадок жизни. Кроме того, эмбрионы всерьез расстроили мои собственные жизненные планы.

Общий план: сравним эмбрионы

Я поступил в магистратуру, собираясь изучать ископаемых млекопитающих, а через три года уже работал над диссертацией, посвященной рыбам и амфибиям. Я сбился с пути истинного, если можно так выразиться, занявшись изучением эмбрионов. В нашей лаборатории их было множество. Например, у нас развивались икринки саламандр и рыб, а также оплодотворенные куриные яйца. Я регулярно изучал их под микроскопом, отслеживая происходящие с ними изменения. Эмбрионы всех этих животных вначале напоминали небольшие беловатые группы клеток не больше трех миллиметров в длину. Наблюдать за ходом их развития было очень увлекательно. По мере роста эмбриона объем желтка, который служил для него источником пищи, в свою очередь, постепенно уменьшался. К тому времени, как желток заканчивался, организм обычно уже был достаточно велик, чтобы выйти из икринки или вылупиться из яйца.

Наблюдения за процессом развития эмбрионов сильно изменили мой образ мышления. Из такого скромного источника, как эмбрион на ранних стадиях развития, возникали удивительно сложные организмы птиц, лягушек, форелей, состоящие из триллионов клеток, организованных определенным образом. Но главное было даже не в этом. Эмбрионы рыб, амфибий и птиц были не похожи ни на что виденное мною ранее в ходе занятий биологией. Все они были устроены в общем одинаково. У всех была голова с жаберными дугами. Внутри головы из трех небольших вздутий у всех развивался головной мозг. У всех были маленькие зачатки конечностей. Собственно, именно конечностям и была посвящена моя диссертация, над которой я работал в течение последующих трех лет. Сравнивая развитие скелета у птиц, саламандр, лягушек и черепах, я убедился, что даже такие разные конечности, как птичьи крылья и лягушачьи лапки, на ранних стадиях развития устроены очень похоже. Глядя на все эмбрионы всех этих животных, я видел глубокое сходство их строения. Взрослые организмы выглядели по-разному, но истоки у них у всех были принципиально сходны. Если рассматривать эмбрионы, то кажется, что все различия млекопитающих, птиц, амфибий и рыб едва ли не бледнеют в сравнении с фундаментальным сходством всех этих существ. В то время я познакомился с открытиями Карла Эрнста фон Бэра.

В XIX веке было несколько естествоиспытателей, изучавших эмбрионы в поисках общего плана всего живого. Самым выдающимся из них был Карл фон Бэр. Он родился в знатной дворянской семье и поначалу учился на врача. Его преподаватели предложили ему изучить ход развития цыпленка, чтобы попытаться разобраться в том, как формируются внутри яйца его органы.

К сожалению, Бэр не мог себе позволить завести инкубатор. Не было у него и возможности исследовать множество яиц. Начало поэтому не сулило особых успехов. К счастью, у него был влиятельный друг, Христиан Пандер, располагавший средствами на проведение подобных экспериментов. Изучая куриные эмбрионы, Пандер и Бэр открыли одно фундаментальное правило: *каждый орган цыпленка развивается из одного из трех слоев тканей эмбриона одной из ранних стадий*. Эти три слоя получили название зародышевых листков. Это было поистине легендарное открытие, сохраняющее свое значение и по сей день.

Открытие этих трех слоев позволило Бэру задаться другими важными вопросами. У всех ли животных развитие идет по той же схеме? Развиваются ли из таких слоев сердца, легкие и мышцы и у других животных? И, что особенно важно, одинаковые ли слои дают начало одним и тем же органам разных видов?

Бэр сравнил три зародышевых листка эмбрионов пандеровских цыплят со строением ранних стадий развития всевозможных других животных, эмбрионы которых ему удалось раздобыть: рыб, рептилий, млекопитающих. Оказалось, что у всех этих животных каждый орган тоже развивался из тканей одного из трех зародышевых листков. Кроме того, из каждого зародышевого листка у разных видов формировались одни и те же органы. Например, сердца всех животных развивались из среднего зародышевого листка. Из другого, наружного листка у всех животных развивался мозг. Какими бы разными ни были взрослые представители тех или иных видов, будучи эмбрионами, они все проходили одни и те же стадии развития.

Чтобы вполне оценить важность этого открытия, нужно вновь обратиться к первым трем неделям развития наших собственных эмбрионов. В момент оплодотворения в яйцеклетке происходят существенные изменения: генетический материал сперматозоида сливается с генетическим материалом яйцеклетки, и яйцеклетка начинает делиться. Вскоре те клетки, на которые она разделилась, образуют полую сферу. У человека за первые пять дней после зачатия

клетки делятся четыре раза и образуют сферу из шестнадцати клеток. Эта сфера, которую называют бластоцистой, напоминает шарик, заполненный водой. Тонкая оболочка из клеток окружает жидкость, заключенную внутри. На стадии бластоцисты у эмбриона по-прежнему не видно никакого плана строения: у него еще нет ни переда, ни зада и определенно нет разных органов и тканей. Примерно на шестой день после зачатия эта сфера из клеток прикрепляется к стенке материнской матки и начинает срастаться с ней, чтобы в конечном итоге совместить кровотоки эмбриона с кровотоком матери. На шестой день развития эмбриона план строения его тела по-прежнему незаметен. Этой сфере из клеток еще очень далеко до организма, в котором можно было бы узнать млекопитающее, рептилию или рыбу — или тем более человека.

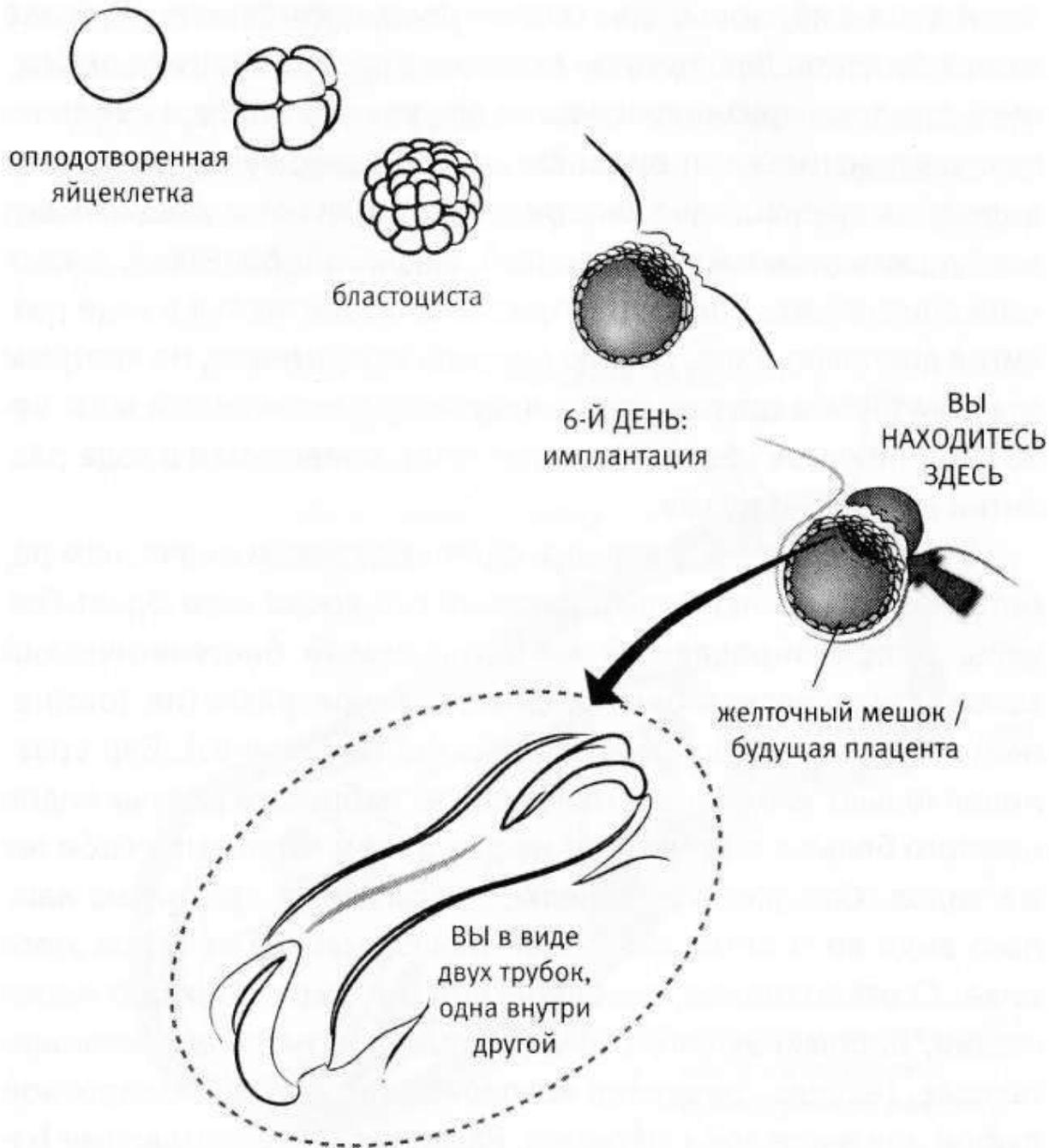
Если повезет, бластоциста прирастает к стенке материнской матки. Если она прирастает не внутри полости матки, а в каком-нибудь неправильном месте (такое явление называют внематочной беременностью), последствия могут оказаться плачевными. Около 96% случаев внематочной беременности приходится на прирастание эмбриона к стенкам маточных труб (они же фаллопиевы трубы) недалеко от того места, где произошло оплодотворение. Это может происходить от того, что слизистые выделения перекрывают выход из фаллопиевой трубы в матку, из-за чего бластоциста и прирастает к стенке трубы. Если внематочную беременность не диагностировать вовремя, она может привести к разрывам тканей и внутренним кровотечениям. В очень редких случаях бластоциста может даже выходить из маточной трубы в брюшную полость, то есть в пространство между кишечником и стенкой живота. В еще более редких случаях такие бластоцисты прирастают к выстилающим брюшную полость покровам матки или даже к покровам прямой кишки матери. Более того, такой зародыш может даже полностью развиться! В некоторых случаях возможно рождение таких младенцев с помощью разреза брюшной стенки, но в целом внематочная беременность очень опасна, потому что в 90 раз по сравнению с нормальной, внутриматочной, беременностью увеличивает для матери риск смерти от кровотечения.

В любом случае выглядим мы на этом этапе развития более чем невзрачно. Где-то в начале второй недели после оплодотворения бластоциста уже имплантирована, то есть приросла к стенке матки. Одна ее сторона при этом остается свободной, а другая прикрепляется к стенке матки. Представьте себе воздушный шарик, прижатый к стене. В

месте соприкосновения шарика со стеной его оболочка образует плоский диск. Именно из такого диска и будет развиваться человеческий эмбрион. Наше тело *полностью* формируется на основе одной лишь верхней части бластоцисты — той, что прижата к стенке матки. Остальная часть бластоцисты, расположенная под диском, покрывает собой запас желтка. На этом этапе развития мы похожи на тарелку фрисби — простой двухслойный диск.

Каким образом из этой округлой тарелки возникают зародышевые листки Карла Бэра? И как из них развивается что-то похожее на человеческий организм? Вначале клетки делятся и перемещаются, в результате чего ткань эмбриона образует складки. Перемещение тканей и образование этих складок в конечном итоге приводит к тому, что мы становимся похожи на трубку со складчатым утолщением на головном конце и еще одним таким утолщением на хвостовом конце. Если бы мы разрезали эмбрион на этом этапе, мы бы увидели не одну трубку, а две: вторая расположена внутри первой. Из наружной трубки впоследствии сформируется стенка нашего тела, а из внутренней — пищеварительный тракт. Эти две трубки разделены небольшим промежутком — на его месте впоследствии разовьется полость тела. Эта принципиальная схема строения — одна трубка внутри другой — останется с нами на всю жизнь. Внутренняя трубка будет постепенно усложняться: на ней возникнет большое утолщение (желудок), а идущий за ним кишечник удлинится и причудливо изогнется. Внешняя трубка тоже изменится: из нее образуется кожа, на которой вырастут волосы, а форма поверхности в ходе развития конечностей и других частей тела станет намного более сложной. Но в своей основе этот план строения сохранится. Наши тела, может быть, и устроены сложнее, чем были в первые три недели после зачатия, но по сути по-прежнему представляют собой две трубки, одна внутри другой, и все без исключения наши органы развились из трех слоев ткани, обособившихся в течение второй недели после оплодотворения.

Названия этих трех важнейших слоев (зародышевых листков) соответствуют их положению: наружный слой называют эктодермой, внутренний — энтодермой, а средний, расположенный между ними, — мезодермой. Из эктодермы образуются наши покровы (то есть кожа) и нервная система. Из энтодермы (внутреннего слоя) развиваются органы пищеварительного тракта и связанные с ним железы.



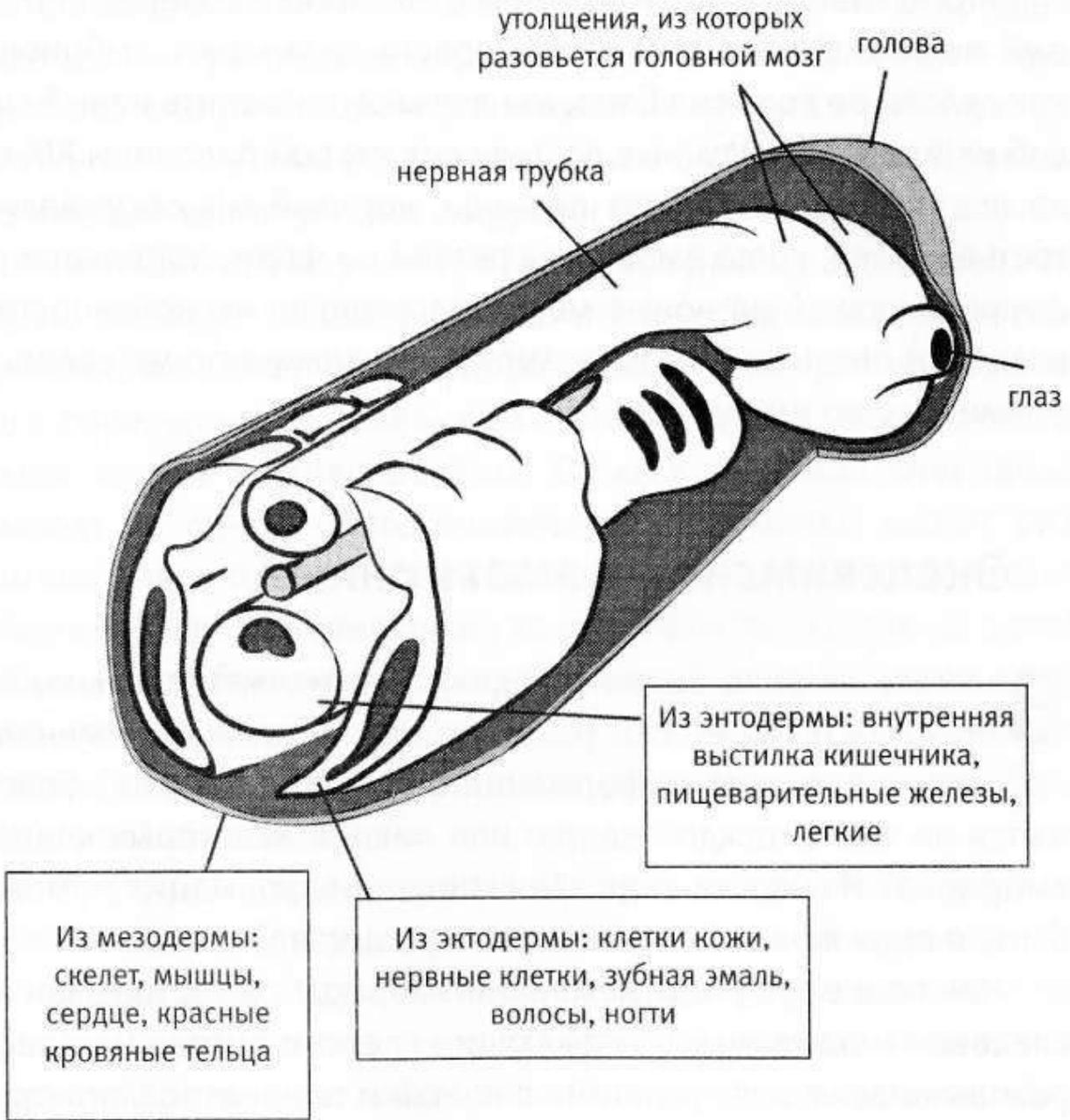
Начальные стадии нашего развития — первые три недели после зачатия. Из одной клетки наш организм превращается в сферу из клеток а затем в две трубки, одна внутри другой.

Средний слой (мезодерма) формирует многочисленные ткани, расположенные между пищеварительным трактом и кожей, в том числе скелет и мускулатуру. Не только у человека, но и у лосося, курицы, лягушки, мышцы все органы развиваются из эктодермы, энтодермы и

мезодермы.

Изучая эмбрионы, Бэр открыл фундаментальное свойство живых существ. Для этого он выделил у развивающихся эмбрионов два типа признаков: общие для разных видов и изменчивые в зависимости от вида. Такие признаки, как устройство в виде двух трубок, одна внутри другой, являются общими для всех позвоночных животных: рыб, амфибий, рептилий, птиц и млекопитающих. Эти общие признаки проявляются в ходе развития довольно рано. В свою очередь те признаки, по которым мы отличаемся друг от друга, например увеличенный мозг человека, панцирь черепахи, перья птиц, появляются в ходе развития несколько позже.

Бэр подходил к изучению эмбрионов совсем иначе, чем работавший через несколько десятилетий после него Эрнст Геккель, сформулировавший так называемый биогенетический закон, согласно которому индивидуальное развитие (онтогенез) повторяет историческое развитие (филогенез). Бэр сравнивал только эмбрионы и отметил, что эмбрионы разных видов намного больше похожи друг на друга, чем взрослые особи тех же видов. Согласно же Геккелю, ход развития организма каждого вида во многом повторяет эволюционную историю этого вида. Соответственно, человеческий эмбрион проходит через стадии, напоминающие рыбу, рептилию и, наконец, млекопитающее. Геккель сравнивал человеческий эмбрион с взрослой рыбой или взрослой ящерицей. Различия между взглядами Бэра и Геккеля могут показаться незначительными, но это не так. Новые данные, полученные за последние сто лет, подтверждают правоту скорее Бэра, чем Геккеля. Когда Геккель сравнивал эмбрионы одного вида с взрослыми особями другого, он во многом сравнивал круглое с красным. Развитие большинства животных отчасти действительно повторяет ход их эволюции, но для того, чтобы выявить механизмы эволюционных преобразований, плодотворнее сравнивать эмбрионы одного вида с эмбрионами другого, а не эмбрионы одного с взрослыми особями другого. Эмбрионы разных видов отнюдь не во всем одинаковы, но между ними есть черты глубокого сходства. У эмбрионов всех позвоночных имеются жаберные дуги и хорда, и все они на определенном этапе развития оказываются устроены как две трубки, одна внутри другой.



Через четыре недели после оплодотворения мы представляем собой две трубки, одна внутри другой, и состоим из трех зародышевых листков, из которых разовьются все наши органы.

И, что особенно важно, даже эмбрионы таких разных организмов, как рыбы и люди, обладают одними и теми же тремя зародышевыми листками, открытыми Пандером и Бэрром.

Результаты подобных сравнений подталкивают нас к новым фундаментальным вопросам. Как получается, что эмбрион "знает", где

нужно сформировать голову, а где анус? Какие механизмы управляют развитием и позволяют клеткам и тканям эмбриона развиваться в сложное многоклеточное тело?

Чтобы ответить на эти вопросы, нам нужен совершенно новый подход. Вместо того чтобы просто сравнивать эмбрионы, как делали во времена Бэра, мы должны применить новый способ их изучения. Научные достижения второй половины XIX века подготовили почву для периода, который мы обсуждали в третьей главе, когда эмбрионы резали на части, прививали кусочки их тканей на новые места, расчленяли их конечности и воздействовали на них всевозможными химическими соединениями. Все во имя науки.

Эксперименты с эмбрионами

Вначале XX века биологи задались фундаментальными вопросами о строении и развитии организмов. Где именно в эмбрионах хранится информация о пути их развития? Содержится ли она в каждой клетке или лишь в некоторых клетках эмбриона? И в каком виде записана эта информация — может быть, в виде какого-то химического вещества?

Начиная с 1903 года немецкий эмбриолог Ханс Шпеман исследовал механизмы, позволяющие клеткам эмбриона преобразовываться в ходе развития в клетки и ткани взрослого организма. Главная поставленная им задача состояла в том, чтобы узнать, содержится ли в каждой клетке эмбриона достаточно информации, чтобы сформировать целый организм, или же часть этой информации записана в одних клетках, а часть — в других.

Работая с икринками тритона, которые легко раздобыть и которыми довольно просто манипулировать в лабораторных условиях, Шпеман придумал остроумный эксперимент. Он отрезал прядь волос у своей маленькой дочери и сделал из них миниатюрные затяжные петли. Волосы младенцев — замечательный материал: мягкие, тонкие и гибкие, они прекрасно подходят для изготовления инструмента, позволяющего поймать в затяжную петлю и разделить на две половинки крошечный шарик тритоновой икринки. Именно это Шпеман и проделывал с икринками, перетягивая их пополам вместе с заключенными в них развивающимися эмбрионами. Проведя некоторые манипуляции с ядрами клеток, он давал полученным половинкам икринок развиваться дальше и смотрел, что из этого выйдет. А выходило вот что: из обеих половинок разделенного надвое эмбриона развивалось по тритону-близнецу с совершенно нормальным строением тела. Оба близнеца были вполне жизнеспособны. Отсюда следовал очевидный вывод: из одной оплодотворенной яйцеклетки может развиваться более одной особи. Примерно так и возникают однояйцевые (или монозиготные, то есть произошедшие из одной яйцеклетки) близнецы. Этими экспериментами Шпеман доказал, что у эмбриона на ранних стадиях развития некоторые клетки способны сами по себе развиться в полноценный взрослый организм.

Но это было только начало. За этим экспериментом последовали новые, которые принесли с собой новые открытия.

В двадцатых годах XX века Хильда Мангольд, аспирантка Шпемана, работавшая в его лаборатории, начала свои исследования крошечных эмбрионов. Она отличалась удивительной ловкостью рук, и эта способность позволила ей поставить ряд исключительно сложных экспериментов. На той стадии развития, с которой работала Хильда, эмбрион тритона представляет собой сферу диаметром около полутора миллиметров.



Всего лишь пересадив на один эмбрион кусочек ткани другого, Хильда Мангольд получила тритонов-близнецов

Хильда отделяла от одного эмбриона кусочек ткани размером меньше булавочной головки и пересаживала его на развивающийся эмбрион другого вида. При этом она брала кусочки для пересадки не откуда попало, а только из области, где перемещались и образовывали складки клетки, из которых должны были образоваться зародышевые листки. У исследовательницы это выходило так ловко, что эмбрион с привитым на него кусочком другого эмбриона благополучно продолжал развиваться. Результат этого эксперимента принес приятный сюрприз. Пересаженный участок ткани привел к образованию целого нового тела, наделенного спиной, позвоночником, брюхом и даже головой.

Почему все это так важно? Хильда Мангольд открыла небольшой участок ткани, который заставлял другие клетки сформировать целое тело, обладающее нормальным планом строения. Крошечный, но необычайно важный участок ткани, ответственный за такой характер развития, назвали *организатором*.

За открытия, сделанные Хильдой Мангольд в ходе работы над диссертацией, была в итоге присуждена Нобелевская премия — но не ей

самой. Она трагически погибла (от взрыва керосинки на кухне), когда полученные ею результаты еще даже не были опубликованы. Нобелевскую премию по медицине — "за открытие эффекта организатора в эмбриональном развитии" — получил в 1935 году ее руководитель Ханс Шпеман.

В наши дни многие ученые считают работу Хильды Мангольд самым важным экспериментом в истории эмбриологии.

Примерно в то же время, когда Хильда Мангольд проводила этот эксперимент в лаборатории Шпемана, другой немецкий эмбриолог, Вальтер Фогт, разработал остроумные методы мечения клеток или групп клеток. Эти методы позволили ему непосредственно наблюдать, что происходит с теми или иными клетками по мере развития эмбриона. Пользуясь ими, Фогт составил карты, показывающие, из какого участка эмбриона на ранних стадиях развития впоследствии формируется каждый орган. Эти карты показывали, какая судьба постигает те или иные клетки молодого эмбриона в ходе его дальнейшего развития по мере того, как проявляется заложенный в нем план строения.

Благодаря первым эмбриологам, таким как Пандер, Бэр, Шпеман и Мангольд, мы узнали, что можно проследить путь развития всех частей нашего взрослого организма из отдельных участков клеток зародыша на стадии простого трехслойного диска, а кроме того, что формирование общей схемы строения тела происходит за счет действия клеточного участка-организатора, открытого Мангольд и Шпеманом.

Разбирая и собирая эмбрионы по кусочкам, можно убедиться, что у всех млекопитающих, птиц, амфибий, рептилий и рыб есть свои участки-организаторы. Иногда можно даже заменить организатор в эмбрионе на другой, взятый из эмбриона совсем другого вида. Например, если пересадить участок-организатор, взятый из эмбриона курицы, на эмбрион тритона, из этого эмбриона разовьются тритоны-близнецы.

Но что такое этот организатор? И что такое в нем заключено, что говорит клеткам, по какому плану им строить развивающееся тело? Разумеется, это ДНК. И в этой-то ДНК мы и найдем внутренний рецепт, общий для нас и для всех остальных животных.

О мухах и людях

Карл Бэр следил за развитием эмбрионов, сравнивал один вид с другим и выявлял фундаментальные черты строения живых организмов. Мангольд и Шпеман, чтобы узнать, как из тканей эмбриона формируются ткани и органы взрослого организма, разрезали эмбрионы и пересаживали участки клеток от одного к другому. Теперь, в век ДНК, мы можем задаваться новыми вопросами — о генетической основе нашего строения. Как гены управляют развитием наших тканей и тел? Если раньше вы были склонны недооценивать мух, задумайтесь о том, что именно исследования мутаций, происходящих у этих насекомых, открыли людям путь к открытию генов, ответственных за план построения тела в человеческих эмбрионах. Мы уже обсуждали подобный подход, когда говорили об открытии генов, управляющих развитием пальцев рук и ног. Теперь посмотрим, что он может дать в исследовании генов, которые определяют весь проект нашего будущего тела.

У тела мухи тоже есть свой план строения. Оно имеет передний и задний концы, верх и низ, правый и левый бок. Усики, крылья и другие придатки растут у мухи оттуда, откуда должны расти. За исключением случаев, когда они растут совсем не оттуда! Бывают, например, такие мухи-мутанты, у которых из головы растут ноги. А бывают такие, у которых две пары крыльев и больше сегментов тела, чем должно быть. Такого рода мутанты и позволили разобраться, например, в том, почему у человека форма позвонков меняется от головы к противоположному концу тела.

Ученые исследуют аномалии у плодовых мух-дрозофил уже больше ста лет. Вскоре после начала этих исследований внимание ученых привлекли мутанты особого типа. У этих мутантов органы располагались в неправильных местах: нога росла там, где должен быть усик, или кроме нормальной пары крыльев была еще одна, лишняя, или не хватало некоторых сегментов тела. Очевидно, что-то здесь не давало телу развиваться в соответствии с нормальным планом строения. Как и любые мутанты, эти мухи были обязаны своим происхождением какой-то ошибке в записанной на ДНК информации. Напомню, что гены представляют собой отрезки ДНК, длинная молекула которой называется хромосомой. Используя ряд методов, позволяющих изучать

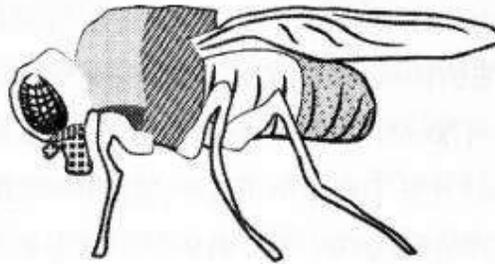
гены и их расположение на хромосомах, мы можем найти участок хромосомы, ответственный за ту или иную мутацию. Делается это в общих чертах так. Вначале мы разводим мутантов — получаем целую популяцию мух, все особи в которой обладают одной и той же генетической ошибкой. Затем, пользуясь определенными молекулярными маркерами, мы сравниваем гены особей, обладающих этой мутацией, с генами особей, у которых такой мутации нет. Этот метод позволяет определить положение участка, где произошла мутация, на той хромосоме, в состав которой входит мутантный ген. Эти эксперименты позволили выяснить, что у дрозофил есть восемь генов, повреждения которых вызывают подобные мутации. Эти гены идут друг за другом в одной из больших хромосом дрозофилы. Причем гены, мутации в которых вызывают нарушения строения головы, идут перед теми, мутации в которых вызывают нарушения в средних отделах тела, например в сегментах, несущих крылья. В самом конце этого ряда расположены гены, отвечающие за развитие заднего конца тела. Удивительное дело: оказалось, что эти гены расположены на хромосоме в том же самом порядке, в каком расположены связанные с ними структуры тела в направлении от головы к хвосту.

Теперь перед исследователями стояла задача узнать, какая конкретно последовательность элементов ДНК (нуклеотидов) отвечала за каждую мутацию. Майк Левин и Билл Макгиннис, работавшие в лаборатории Вальтера Геринга в Швейцарии, и Мэтт Скотт из лаборатории Тома Кауфмана в штате Индиана обнаружили, что в середине каждого из таких генов имеется короткая последовательность, которая оказалась почти идентичной у всех изученных видов. Эта небольшая последовательность получила название *гомеобокс*, а восемь генов дрозофилы, содержащих гомеобокс, назвали *Нох*-генами. Эту последовательность стали искать у разных других видов животных, и эти поиски принесли общий вывод, который стал настоящим сюрпризом. Оказалось, что *варианты Нох-генов есть у всех многоклеточных животных*.

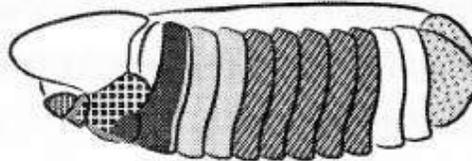
У таких разных организмов, как мухи и мыши, организация тела вдоль оси, идущей от головы к хвосту, регулируется вариантами одних и тех же генов. Если так или иначе вмешаться в работу *Нох*-генов, мы определенным предсказуемым образом вмешаемся и в план строения тела. Если получить муху, у которой не работает или отсутствует один из генов средних сегментов, то средние сегменты ее тела не разовьются или окажутся деформированы. Если получить мышь, у которой

отсутствует один из средних *Нох*-генов, то у такой мыши будет видоизменено строение среднего участка позвоночника.

Нох-гены также определяют пропорции наших тел, то есть размеры различных участков головы, грудной клетки и спины. Эти гены участвуют в развитии отдельных органов, конечностей, гениталий и пищеварительного тракта. Изменения этих генов меняют строение наших тел.



личинка
мухи-дрозофилы



Нох-гены дрозофилы

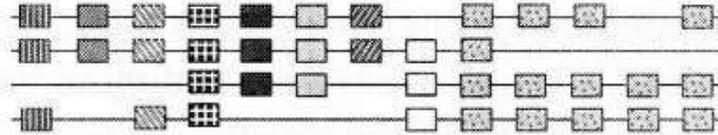


Нох-гены человека: набор *a*

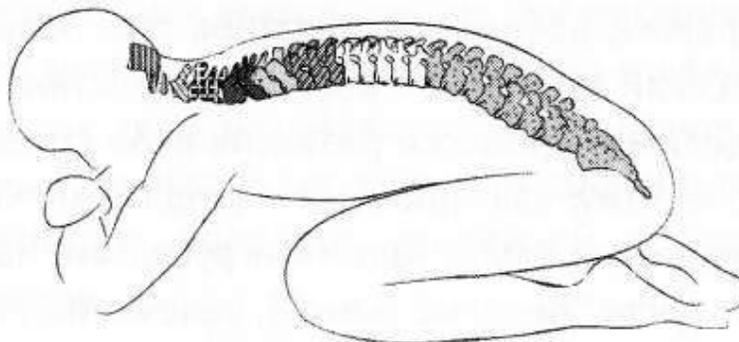
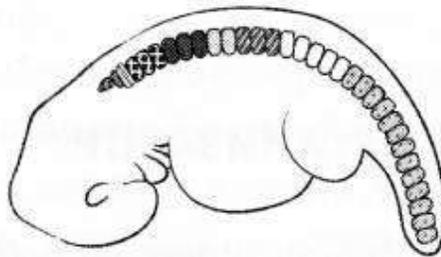
Нох-гены человека: набор *b*

Нох-гены человека: набор *c*

Нох-гены человека: набор *d*



Эмбрион человека



Нох-гены у мухи-дрозофилы и у человека. Организацией тела в направлении "от головы к хвосту" управляют разные Нох-гены. У мух имеется один набор из восьми таких генов, каждый из которых представлен на схеме в виде маленького прямоугольника. У людей есть четыре набора таких генов. И у мух, и у людей порядок, в котором

включаются эти гены, соответствует порядку их расположения в ДНК: гены, работающие в голове, находятся на одном конце молекулы ДНК, работающие в хвосте — на другом, а те, что управляют развитием органов, расположенных посередине, и на ДНК расположены посередине.

У разных видов имеется разное число *Нох*-генов. У мух и других насекомых их восемь, у мышей и других млекопитающих — тридцать девять. При этом все тридцать девять *Нох*-генов мыши представляют собой варианты *Нох*-генов мухи. Объясняется это тем, что многие из *Нох*-генов млекопитающих, по-видимому, возникли в результате удвоения *Нох*-генов из меньшего набора — вроде того, что имеется у насекомых. Несмотря на различия в числе этих генов, в процессе развития мыши они активируются во вполне определенном порядке, точно так же, как и в процессе развития мухи.

Можем ли мы зайти еще дальше, изучая наше генеалогическое древо, и найти аналогичные отрезки ДНК, задействованные в формировании еще более фундаментальных особенностей строения нашего тела? Как это ни удивительно, можем. И это позволит нам увидеть нашу связь с организмами намного более простыми, чем мухи.

ДНК и организатор

В то время, когда Шпеману была присуждена Нобелевская премия, вокруг организатора был большой ажиотаж. Ученые искали загадочное вещество, действие которого могло бы определять в процессе развития план строения всего тела. Но подобно тому, как приходят и уходят увлечения в популярной культуре (например, такими игрушками, как йо-йо или смеющаяся кукла "Веселый Элмо"), увлечения ученых тоже нередко оказываются преходящими. К семидесятым годам к организатору стали относиться во многом как к диковинке, любопытному эпизоду из истории эмбриологии. Причина такого охлаждения была в том, что никому не удавалось разобраться в механизме работы организатора.

Все изменилось после того, как в восьмидесятых годах были открыты Нох-гены. В начале девяностых, когда концепция организатора была еще по-прежнему совершенно не в моде, в лаборатории Эдди Де Робертиса в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе искали Нох-гены у лягушек по методике, сходной с той, что успешно использовали Левин и Макгиннис. Поиски были довольно масштабны и позволили выловить немало разных генов. Один из этих генов отличался весьма необычным характером работы. Он активировался в том самом участке организма эмбриона, где расположен организатор, и действовал именно на том этапе развития, на котором проявляется эффект организатора. Могу себе представить, что чувствовал Де Робертис, когда нашел этот ген. Перед ним был легендарный участок-организатор, и внутри этого участка работал ген, который, похоже, им управлял или по крайней мере был связан с его действием в процессе развития эмбриона. Интерес к организатору вспыхнул с новой силой.

После этого во многих разных лабораториях стали находить гены, связанные с организатором. Ричард Харланд, работавший в университете Беркли, проводя совсем другие эксперименты, нашел еще один ген, который он назвал *Noggin*. Этот ген делал в точности то, что должен делать ген организатора. Когда Харланд взял немного продукта этого гена и ввел его в определенный участок тела развивающегося эмбриона, эффект был точно таким же, как от пересадки организатора. Тело развившегося эмбриона обладало удвоенной продольной осью и двумя головами.

Действительно ли ген, открытый Де Робертисом, и ген *Noggin* и являются теми участками ДНК, которые обеспечивают работу организатора? Ответ здесь — и да и нет. Организацию плана строения тела обеспечивают многие гены, в том числе и эти два. Системы таких генов довольно сложны: один и тот же ген может играть на разных этапах развития несколько разных ролей. К примеру, ген *Noggin* играет важную роль в формировании оси тела, но также задействован и в процессе развития многих других органов. Более того, сложное поведение клеток, обеспечивающее, например, развитие головы, связано с работой не одного, а многих генов. На всех стадиях развития эмбриона одни гены взаимодействуют с другими. Работа одного гена может подавлять, а может и стимулировать работу другого. Иногда включение или выключение определенного гена обеспечивается взаимодействием сразу многих других генов. К счастью, новейшие методы позволяют нам наблюдать, как в клетке одновременно работают тысячи разных генов. Эти методы вместе с новыми компьютерными технологиями, дающими нам возможность разбираться в функциях конкретных генов, обладают огромным потенциалом для выяснения того, как гены обеспечивают формирование клеток, тканей и тел.

Выяснение этих сложных взаимодействий между батареями генов проливает свет на механизмы, благодаря которым формируются наши тела. Работа гена *Noggin* — прекрасный тому пример. Продукт этого гена сам по себе не указывает ни одной клетке, где она должна располагаться на оси, идущей от спины к брюху. Этот ген действует лишь в унисон с множеством других генов. Их совместная работа и определяет положение клеток. Еще один ген, *VMP-4*, представляет собой "брюшной" ген. Он включается в клетках, из которых развиваются структуры, расположенные на брюшной стороне тела. Для развития зародыша очень важно взаимодействие между генами *VMP-4* и *Noggin*. В тех клетках, где активен *Noggin*, *VMP-4* не может выполнять свою работу. В итоге получается, что ген *Noggin* не столько говорит клеткам, что им нужно стать "клетками спинной стороны тела", сколько выключает сигнал, который сделал бы их клетками *брюшной стороны*. Такого рода отношения, включение и выключение, и лежат в основе всех процессов развития живых организмов.

Внутренняя актиния

Одно дело — сравнивать наши тела с телами лягушек и рыб. Между нами есть немало черт вполне заметного сходства: у нас у всех есть позвоночник, конечности, голова и так далее. Но что если сравнить нас с кем-нибудь совершенно на нас не похожим, например с медузами и их родственниками?

У большинства животных тело имеет оси, положение которых определяется направлением передвижения или взаимным расположением рта и анального отверстия. Подумайте вот о чем: рот у нас находится на конце тела, противоположном анусу, и, как и у рыб и насекомых, обычно смотрит вперед.

Как бы нам найти себя в животных, у которых нет даже нервного тяжа? У которых нет рта или ануса? У таких существ, как медузы, кораллы и актинии, рот имеется, а вот ануса действительно нет. То же самое отверстие, которое служит им ртом, используется и для выброса непереваренных остатков пищи. Для медуз и их родственников такая конструкция вполне удобна. Но у биологов, сравнивающих строение этих организмов с устройством каких-либо других существ, оно вызывает изрядное головокружение.

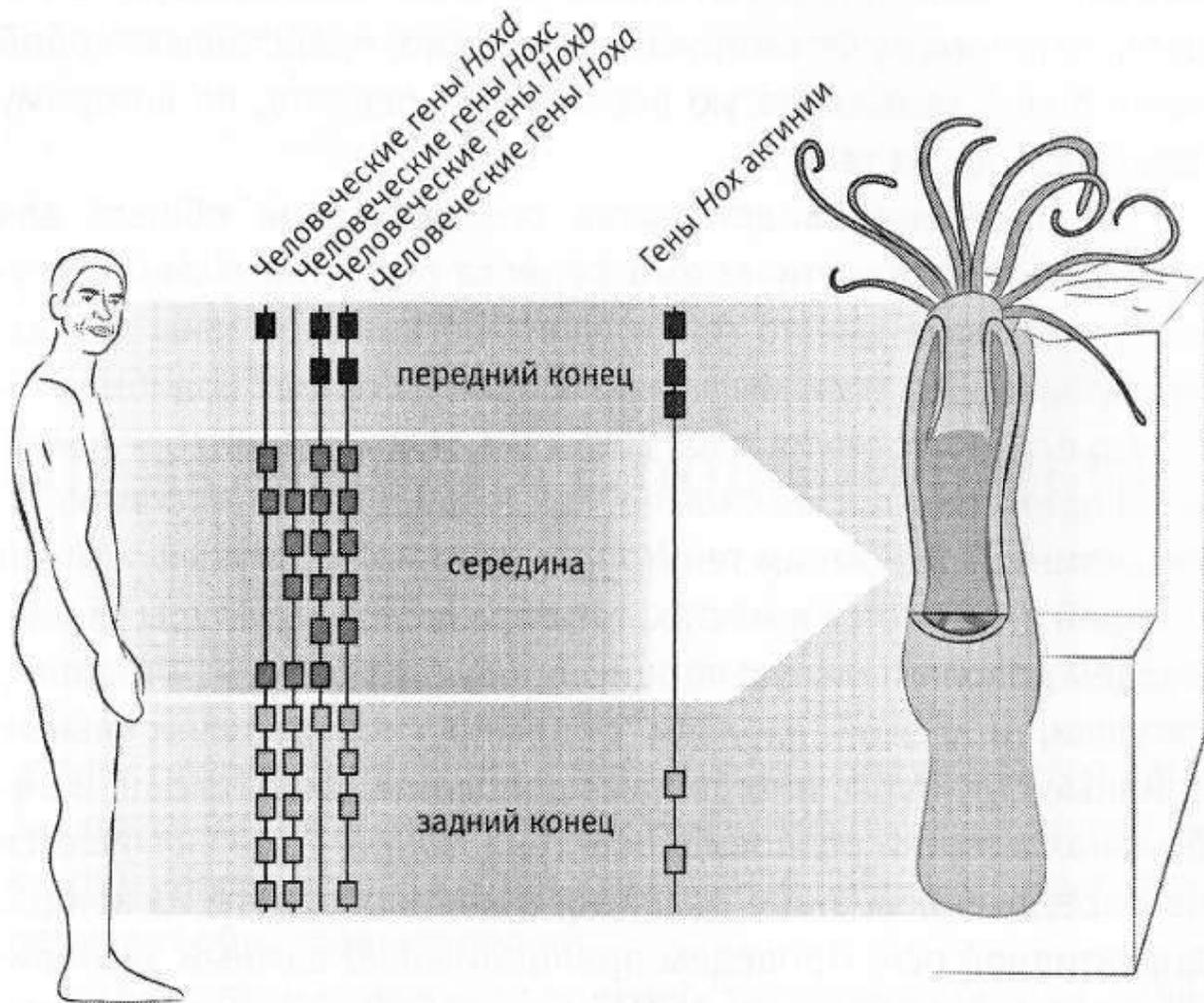
Многие мои коллеги, в том числе Марк Мартиндейл и Джон Финнерти, работали над этой проблемой, изучая развитие представителей данной группы животных. Очень много полезных сведений им позволили получить актинии — близкие родственники медуз, живущие на морском дне и обладающие очень простым строением тела. Форма тела актинии весьма необычна, и на первый взгляд может показаться, что сравнивать их строение с нашим совершенно бесполезно. Внешне тело актинии напоминает ствол дерева, стоящий на утолщенном пеньке и увенчанный сверху кольцом из щупальцев. Эта странная форма тела делает актиний особенно интересным объектом для исследований: можно считать, что у них есть верх и низ или перед и зад, но в любом случае имеется лишь единственная ось симметрии. Проведем линию от ротового отверстия этого животного к основанию его тела. Биологи дали такой оси специальное название — орально-аборальная ось. Но название можно дать и чему-нибудь воображаемому. Если же эта ось биологически реальна, ее развитие должно чем-то напоминать развитие одной из трех

осей нашего тела.

Мартиндейл и его коллеги выяснили, что у актиний действительно имеются примитивные варианты наших генов, определяющих план строения, а именно тех, что управляют формированием оси, соединяющей рот и анус. И, что еще важнее, эти гены работают у актиний вдоль орально-аборальной оси, что в свою очередь означает, что орально-аборальная ось этих примитивных существ генетически эквивалентна оси нашего тела, соединяющей рот и анус.

С одной осью удалось разобраться, но как насчет еще одной? Есть ли у актиний что-то соответствующее нашей спинно-брюшной оси? В строении их тела, похоже, нет ничего похожего на спину и брюхо. Несмотря на это, Мартиндейл и его коллеги смело взялись за поиски у актиний генов, определяющих расположение структур тела вдоль спинно-брюшной оси. Исследователям было известно, как выглядят эти гены у нас, и этот образ был использован для выявления таких генов у актиний. И в итоге им удалось найти у актиний даже не один, а много разных генов спинно-брюшной оси. Но хотя эти гены и работали в развивающемся организме вдоль подобной оси, сама эта ось, похоже, никак не проявлялась в чертах строения тела взрослой актинии.

Если судить по одному лишь внешнему облику актинии, эта скрытая ось не выражена совсем никак. Но если разрезать тело актинии поперек, мы увидим еще одну скрытую черту — еще одну ось симметрии. Эту ось называют директивной, или направляющей. Она, как ни странно, разделяет тело как бы на две половинки — почти что правый и левый бок.



У медуз и их родственников (например, актиний), как и у нас, имеются передний и задний концы тела. Такой план строения определяется у них вариантами тех же генов, что играют аналогичную роль и в человеческом теле.

Эта невидимая ось была известна анатомам с двадцатых годов, но оставалась своего рода научной диковинкой. Мартиндейл, Финнерти и их коллеги смогли разобраться в этом загадочном явлении.

Все животные и похожи друг на друга, и отличаются друг от друга. Подобно тому как рецепт пирога передается из поколения в поколение, на каждом этапе изменяясь и совершенствуясь, так же и рецепт построения наших тел передавался из поколения в поколение — и изменялся в течение многих миллионов лет. Может быть, мы и не похожи на актиний и медуз, но рецепт, по которому формируется наше тело, представляет собой лишь более замысловатую версию того

рецепта, по которому формируются их тела.

Убедительные свидетельства существования общего для всех животных генетического рецепта развития можно получить, используя вместо генов одних организмов гены других. Что произойдет, если мы заменим один из генов "бодибилдинга" (то есть построения тела) существа, тело которого организовано примерно так же сложно, как наше, на соответствующий ген актинии? Вспомним ген *Noggin*, который у лягушек, мышей и людей включается в местах, где образуются структуры спины. Введем дополнительную порцию продукта этого гена в икринку лягушки, и у этой лягушки сформируются дополнительные спинные структуры, иногда даже дополнительная голова. В эмбрионах актиний разновидность гена *Noggin* тоже включается на определенном этапе развития в клетках одного из концов директивной оси. Проведем принципиально важный эксперимент: возьмем продукт гена *Noggin* актинии и введем его в эмбрион лягушки. Результат? Лягушка с дополнительными спинными структурами, примерно такая же, как в опыте с введением в эмбрион лягушки продукта собственного гена *Noggin*.

Однако теперь, углубляясь в прошлое, мы подошли к еще одной, на первый взгляд трудноразрешимой, загадке. Все организмы, о которых шла речь в этой главе, обладают многоклеточным телом. Как нам сравнить самих себя с существами, вовсе лишенными тела, — одноклеточными микробами?

Глава 7. Приключения с бодибилдингом.

С тех пор как я поступил в магистратуру, значительную часть времени, не занятого поисками ископаемых, я провел за микроскопом, изучая клетки, совместная работа которых обеспечивает образование костей.

Я брал развивающуюся конечность саламандры или лягушки и окрашивал ее клетки пигментами, которые делают формирующиеся хрящи синими, а кости — красными. Затем с помощью глицерина я мог сделать остальные ткани прозрачными и бесцветными. Это были очень красивые препараты: прозрачная конечность эмбриона и кости внутри нее, сияющие цветами пигментов. Казалось, что я изучаю животных, сделанных из стекла.

В эти долгие часы, проведенные за микроскопом, я в буквальном смысле наблюдал построение тела животного. На самых ранних стадиях у эмбрионов были крошечные зачатки конечностей, внутри которых клетки разделялись равномерными промежутками. Затем, на следующих стадиях, клетки внутри зачатка конечности начинали собираться в комки. На более поздних стадиях клетки уже принимали различную форму, и внутри зачатка конечности начинали формироваться кости. В них превращались все клеточные комки, которые я наблюдал у эмбрионов на более ранних стадиях.

Когда видишь, как по кусочкам собирается тело животного, сложно не почувствовать благоговейный трепет. Подобно строящемуся дому, конечность постепенно составляется из маленьких элементов, соединяющихся друг с другом, формируя структуру большего размера. Но между строящимся домом и развивающимся организмом есть и существенная разница. Строительством дома руководят люди, которые четко представляют себе, куда и как должны лечь кирпичи, а развитием конечностей и тел животных никто не руководит. Информация, позволяющая формировать конечности, представляет собой не какой-то отдельный архитектурный план — напротив, она содержится в каждой клетке. Представьте себе дом, который сам собой собирается на основе информации, содержащейся в кирпичах. А ведь именно так и собираются тела животных.

Значительная часть того, из чего делаются тела, находится внутри клеток. Там же находится и значительная часть того, что делает нас

уникальными. Наше тело не похоже на тело медузы потому, что наши клетки по-другому соединяются друг с другом, по-другому взаимодействуют и производят разные материалы.

Прежде чем у наших тел вообще возник план строения, не говоря уже о голове, мозге или руках, должны были каким-то образом возникнуть сами тела. Что это значит? Вот что: чтобы клетки могли образовать все ткани и органы тела, вначале они должны были научиться объединяться и сотрудничать — собираться вместе и образовывать организмы совершенно нового типа.

Чтобы понять, какой в этом смысл, давайте для начала обсудим, что собой представляет тело многоклеточного организма, а затем обратимся к трем главным вопросам: когда, как и почему. Когда возникли многоклеточные тела, как они возникли и, самое главное, почему они вообще существуют?

Поиск доказательств: где тело?

Далеко не каждый комок клеток заслуживает почетного звания тела. Бактериальный мат или группа клеток кожи — нечто совсем иное, чем объединение клеток, которое мы называем телом многоклеточного организма. Разница между ними принципиальна. Чтобы понять, в чем она состоит, проведем следующий мысленный эксперимент.

Что случится, если мы удалим часть бактерий из бактериального мата? Мы получим бактериальный мат меньшего размера. А что случится, если мы удалим порцию клеток человека или рыбы, скажем, из сердца или из мозга? В зависимости от того, какие именно это будут клетки, мы можем получить в итоге труп человека или рыбы.

Этот мысленный эксперимент демонстрирует нам одно из важнейших свойств многоклеточных организмов: наши клетки работают вместе, образуя тем самым нечто большее, чем их простая сумма. При этом не все части тела равны. Некоторые из них жизненно необходимы. Кроме того, между частями многоклеточного тела существует разделение труда: мозг, сердце и желудок выполняют совершенно разные функции. Это разделение труда наблюдается и в самом мелком масштабе: оно свойственно не только частям тела и органам, но также и клеткам, генам и белкам, из которых состоит тело.

Многоклеточный организм, будь то тело червя или человека, обладает индивидуальностью, которой лишены составляющие его части. Например, клетки нашей кожи непрерывно делятся, умирают, отшелушиваются и опадают. Но каждый из нас при этом остается тем же самым индивидуумом, что и много лет назад, — несмотря на то что с тех пор едва ли не все клетки нашей кожи уже заменились на новые. Те, что были у нас много лет назад, мертвы и сброшены, а их место заняли другие. То же самое можно отнести едва ли не к каждой клетке нашего тела. Подобно реке, которая остается той же, несмотря на то что у нее меняется русло, а также скорость и объем переносимой воды, каждый из нас остается тем же индивидуумом, каким был, несмотря на текучесть составляющих нас частей.

Кроме того, несмотря на все эти непрерывные перемены, каждый из наших органов "знает" свое место, свой размер и функции. Наше тело вырастает пропорциональным от того, что рост всех костей в нем — будь то кости рук, пальцев или черепа — строго скоординирован. Наша

кожа остается гладкой благодаря тому, что ее клетки определенным образом взаимодействуют друг с другом, поддерживая целостность кожи и равномерность ее рельефа, — по крайней мере пока не произойдет что-нибудь из ряда вон выходящее, например, не вырастет бородавка. Клетки внутри бородавки не следуют предписанным для них правилам: они как бы забывают, когда им нужно остановить свой рост.

Когда хорошо настроенное равновесие разных частей тела нарушается, живое существо может умереть. Например, если одна группа клеток перестает должным образом сотрудничать с остальными, из нее может развиваться раковая опухоль. Продолжая неограниченно делиться или не умирая когда следует, эти клетки могут нарушить равновесие, обеспечивающее существование живого человека. Рак нарушает правила, предписанные клеткам для взаимодействия друг с другом. Подобно злодеям, из-за которых распадаются общества, построенные на всеобщем сотрудничестве, раковые клетки ведут себя по-своему, доводя до распада то объединение, к которому они относятся, — человеческое тело.

Что сделало такую сложную организацию возможной? Чтобы наши древние предки из одноклеточных организмов превратились в многоклеточные (чего им удалось добиться более миллиарда лет назад), их клетки должны были выработать новые механизмы, позволяющие жить и работать вместе. Им нужно было научиться взаимодействовать друг с другом, обмениваясь сигналами. Нужно было научиться по-новому объединяться и держаться друг за друга. И, кроме того, нужно было освоить новые функции, например синтез веществ, благодаря которым органы многоклеточного тела определенным образом отличаются друг от друга. Все эти свойства — межклеточный "клей", способы "клеточного общения" и производимые клетками вещества — и составляют тот набор инструментов, с помощью которого построены все разнообразные многоклеточные организмы, населяющие нашу планету.

Изобретение этих инструментов произвело настоящую революцию. Переход от одноклеточных организмов к многоклеточным означал появление совершенно иного мира. Его населили новые существа с совершенно новыми способностями: они научились вырастать большими и передвигаться на немалые расстояния, а также выработали новые органы, позволяющие ощущать, поедать и переваривать окружающий мир.

В поисках тела

Мысль, которая не позволяет всем нам — червям, рыбам и людям — слишком возгордиться: большая часть истории жизни была историей одноклеточных организмов. Почти все, о чем мы говорили до сих пор: животные с конечностями, головами, органами чувств или хотя бы с каким-то планом строения тела, — существовало на Земле лишь на последнем, меньшем промежутке истории ее существования. Мы, палеонтологи-преподаватели, чтобы показать, как невелик этот промежуток, нередко используем аналогию между всей историей Земли и одним календарным годом. Представим себе, что все 4,5 миллиарда лет существования Земли — это единственный год, где 1 января возникла наша планета, а полночь 31 декабря — настоящее время. Жизнь появилась на Земле где-то зимой или в самом начале весны, но вплоть до осени единственными живыми организмами были одноклеточные микробы, такие как бактерии, водоросли и амебы. Животные возникли, по-видимому, только в ноябре, а люди — вечером 31 декабря. Как и все остальные животные и растения, населяющие Землю, мы довольно поздно явились на этот праздник жизни.

Если посмотреть на залегающие по всему свету горные породы, то гигантский масштаб временной шкалы, с которой мы имеем дело, станет вполне очевиден. В породах возрастом немногим более 600 миллионов лет и старше мы не находим остатков ни животных, ни растений. Ископаемые, которые в них встречаются, представляют собой одноклеточные организмы и колонии водорослей и бактерий. Такие колонии похожи на бусы или маты, а иногда на круглые дверные ручки. Их не стоит путать с телами многоклеточных организмов.

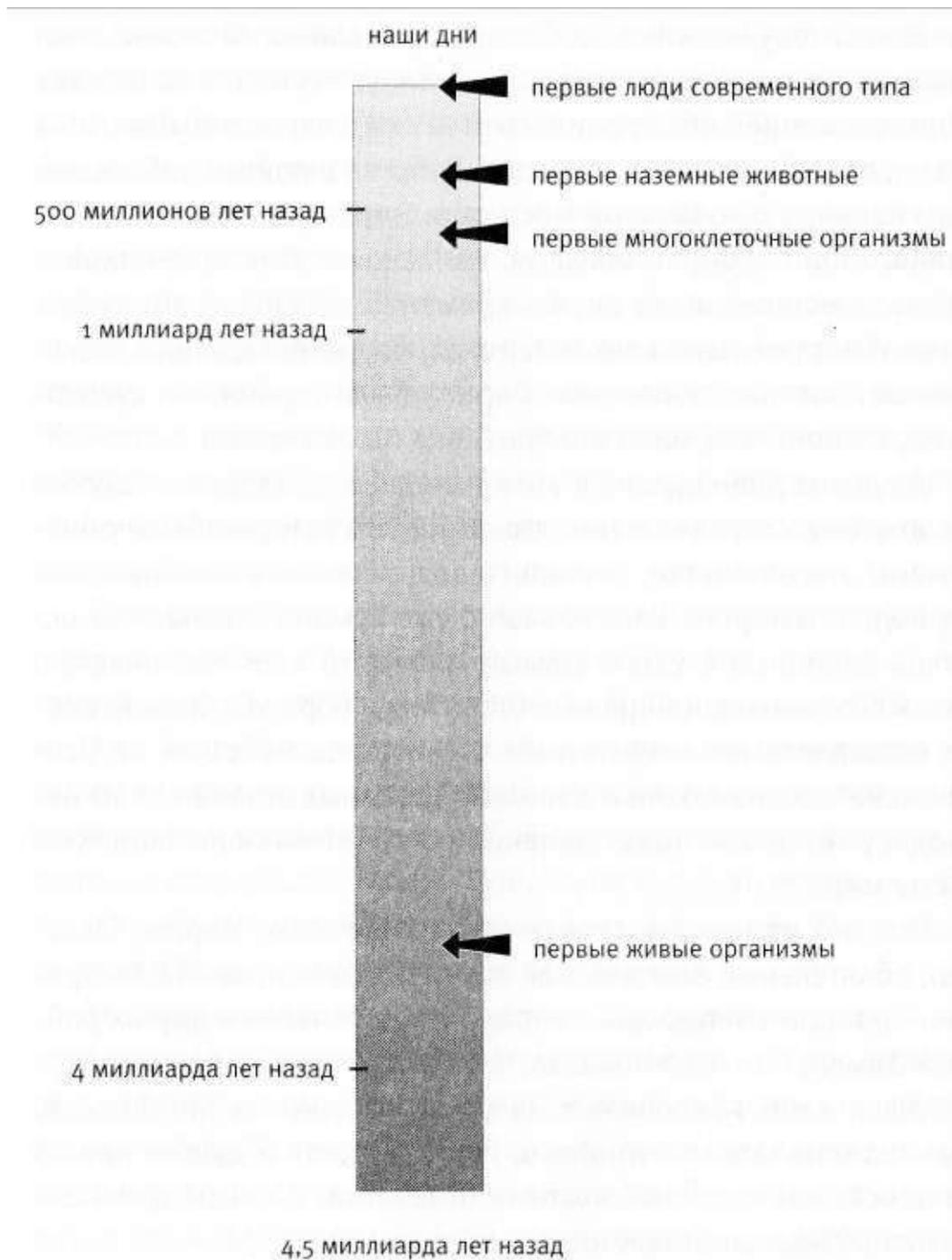
Исследователи, которые впервые обнаружили древнейшие ископаемые остатки многоклеточных, не имели представления, что именно им удалось обнаружить. С двадцатых по шестидесятые годы XX века в разных концах света стали находить остатки в высшей степени странных существ. В двадцатые и тридцатые годы Мартин Гюрих, немецкий палеонтолог, работавший в Намибии, нашел довольно много разных отпечатков, которые напоминали отпечатки тел животных. Они имели форму дисков и блюдец, и было неясно, насколько они примечательны. Это могли быть отпечатки древних водорослей или же древнейших медуз, когда-то населявших моря.

В 1947 году Реджинальд Спригг, австралийский геолог, в поисках полезных ископаемых наткнулся на место, где на нижних сторонах камней обнаружили отпечатки чего-то похожего на диски, ленты и пальмовые листья. Работая в районе заброшенного карьера в холмистой местности Эдиакара в Южной Австралии, Спригг собрал большую коллекцию этих отпечатков и добросовестно описал их. Со временем подобные отпечатки были обнаружены на всех материках, кроме Антарктиды. Ископаемые, которых обнаружил Спригг, были странными существами, но поначалу мало кто придавал им значение.

Дружное равнодушие к этим находкам со стороны палеонтологов было связано с тем, что породы, в которых были обнаружены эти отпечатки, считались возникшими в кембрийский период, из которого было известно уже немало ископаемых остатков животных в узком смысле слова, то есть многоклеточных. Ископаемые, найденные Сприггом и Порихом, долгое время оставались незамеченными и считались набором не особенно интересных, хотя и довольно странных отпечатков из периода, уже хорошо представленного в музейных коллекциях по всему миру.

Все это изменил в середине шестидесятых Мартин Глесснер, обаятельный австрийский эмигрант, работавший в Австралии. Сравнив эти породы с породами, добытыми в других районах Земли, Глесснер показал, что возраст этих пород и содержащихся в них ископаемых на 15-20 миллионов лет больше, чем первоначально считалось. Гюрех, Спригг и другие нашли не просто какие-то любопытные отпечатки, а следы древнейших известных многоклеточных организмов.

Эти ископаемые относились к так называемому докембрию — времени, которое долгое время считали лишенным жизни. Открытие Глесснера говорило о том, что жизнь в конце докембрия не только уже существовала (это установили до Глесснера), но и была представлена в том числе и многоклеточными формами. Палеонтологические диковинки оказались ценнейшими научными материалами.



Важнейшие события в истории жизни на Земле, отмеченные на временной шкале, Обратите внимание, на протяжении какого большого промежутка времени ни у кого из обитателей Земли не было многоклеточных тел. Все это время нашу планету населяли лишь одноклеточные организмы, жившие поодиночке или в колониях.

Докембрийские диски, ленты и пальмовые листья представляли

собой остатки древнейших организмов, обладавших многоклеточными телами. Как и можно было ожидать от древнейших ископаемых животных, они включали представителей самых примитивных групп, живущих в наши дни, — родственников современных губок и медуз. Другие докембрийские ископаемые не были похожи ни на каких известных животных. Об их отпечатках мы можем сказать только, что у этих организмов были многоклеточные тела, но их причудливую форму и необычный рельеф их покровов сложно сопоставить с чертами строения каких-либо современных организмов.

Из этого следовал один предельно ясный вывод: 600 миллионов лет назад многоклеточные организмы уже начали заселять моря нашей планеты. У этих организмов были вполне оформленные тела, то есть это были не колонии клеток, а настоящие многоклеточные. Некоторые из них уже обладают формой тела и характером симметрии, как у современных форм. Что же касается тех, которых не удастся сопоставить с современными формами, то и у них можно найти специализированные структуры тела. Это означает, что эти докембрийские организмы обладали новым уровнем биологической организации, более высоким, чем у предшествующих живых существ.

Об этом свидетельствуют не только ископаемые остатки, заключенные в горных породах, но и сами породы. С появлением первых многоклеточных тел появились и первые следы. На окаменевших участках морского дна того времени есть отпечатки, свидетельствующие о том, что обладатели этих тел уже умели ползать и извиваться. Древнейшие известные следы — небольшие лентовидные бороздки на поверхности окаменевшего ила — говорят о том, что эти многоклеточные были способны совершать довольно сложные движения. Они не только обладали телами с определенными узнаваемыми частями, но и пользовались ими, чтобы активно передвигаться неизвестными ранее способами.

Все обстоит именно так, как и следовало бы ожидать. Мы находим первые ископаемые остатки тел в породах более древних, чем первые остатки тел, обладающих сложным планом строения, которые в свою очередь встречаются в породах более древних, чем первые остатки тел, наделенных головой и конечностями, и так далее. Подобно животным из того зоопарка, по которому мы гуляли в первой главе, ископаемые, заключенные в горных породах, соответствуют вполне определенному порядку.

Как уже было сказано в начале этого раздела, наша задача — узнать,

когда, как и почему возникли многоклеточные тела. Докембрийские ископаемые отвечают на вопрос "когда?". Чтобы узнать, как и, наконец, почему, мы должны пойти немного другим путем.

Тело как улика

По фотографиям докембрийских дисков, пальмовых листьев и лент никак нельзя понять, как много в этих организмах уже было от наших собственных тел. Казалось бы, что может быть общего у нас, так сложно устроенных людей, с какими-то отпечатками на камнях, которые больше всего похожи на помятых медуз и раздавленные катушки киноплёнки?

Однако на этот вопрос есть вполне определенный и, если вдуматься, закономерный ответ: то, что соединяет вместе все наши клетки — и тем самым делает возможным существование наших тел, — мало чем отличается от того, что соединяло вместе клетки древних организмов, отпечатки которых нашли Гюрих и Спригг. Более того, строительные леса, которые позволили сформировать наши тела, возникли еще раньше, чем первые многоклеточные, — у одноклеточных организмов (простейших, которых прежде называли одноклеточными животными).

Что соединяет вместе клетки — те, из которых состоит медуза, или клетки человеческого глаза? У таких существ, как мы, этот биологический клей поразительно сложен: он не только скрепляет наши клетки, но и позволяет им взаимодействовать друг с другом, обеспечивая работу разных структур нашего тела. Этот клей не представляет собой одно какое-то вещество — он состоит из многих веществ, соединяющих клетки и заполняющих промежутки между ними. На микроскопическом уровне он придает всем нашим тканям и органам характерные для них облик, строение и функции. Наши глаза очевидно не похожи на кости наших ног, но значительная часть разницы между глазами и костями ног состоит в том, как именно в них располагаются и соединяются друг с другом клетки и межклеточные вещества.

На протяжении последних нескольких лет каждую осень я сводил с ума студентов-медиков, излагая им эти идеи. Задача, которую я ставил перед издерганными первокурсниками, состояла в том, чтобы, рассматривая препараты под микроскопом, научиться определять органы по идущим в произвольном порядке срезам их тканей. Как же это сделать?

Эта задача во многом похожа на другую: понять, в какой стране вы находитесь, глядя на карту маленькой деревни. Обе эти задачи

выполнимы, но для их решения нужно принимать во внимание некоторые детали. В случае с органами это прежде всего форма клеток и характер их соединения друг с другом, а также тип вещества, лежащего между ними. Любая ткань характеризуется определенным набором клеток, определенным образом соединенных друг с другом. В одних участках организма мы видим ленты или столбики из клеток, в других клетки беспорядочно разбросаны и соединены не жестко. Участки последнего типа, где клетки не жестко соединены, нередко заполнены тем или иным материалом, который придает ткани характерные для нее физические свойства. Например, минеральные вещества, лежащие между клетками кости, делают костную ткань твердой, в то время как нетвердая белковая основа ткани, заключенной внутри наших глаз, делает глаз намного более мягким, чем кость.

Студентам, чтобы научиться определять органы по препаратам, которые они рассматривают под микроскопом, необходимо знать, как выглядят и как расположены клетки в разных тканях и что находится между ними. Для нас эти знания имеют более глубокий смысл. Те вещества, которые делают возможными те или иные объединения клеток, делают возможными и само существование наших тел. Если бы в природе не было способа соединять клетки друг с другом или между клетками не было бы никакого материала, на Земле не возникло бы многоклеточных тел, а были бы только отдельные клетки и группы клеток. Значит, чтобы разобраться в том, как и почему возникли наши тела, нам нужно для начала изучить вещества, заполняющие пространство между клетками, позволяющие соединять клетки друг с другом, а самим клеткам — взаимодействовать между собой.

Чтобы понять, какое отношение имеет характер этих веществ к устройству наших тел, давайте рассмотрим подробно одну из частей нашего тела — скелет. Наш скелет — прекрасный пример того, как крошечные молекулы межклеточных веществ могут играть определяющую роль в построении организма, а также прекрасный пример того, как работают общие принципы, лежащие в основе функционирования всех частей нашего тела. Без скелета наше тело представляло бы собой какую-то бесформенную массу. Жизнь на суше была бы для нас нелегка и даже невозможна. Скелет настолько необходим для наших жизнедеятельности и поведения, что мы нередко забываем о его значении и воспринимаем его как нечто само собой разумеющееся. Между тем возможностью ходить, играть на фортепиано, дышать и питаться мы обязаны своему скелету.

Прекрасной аналогией, позволяющей понять, как работает скелет, может служить мост. Прочность моста зависит от размеров, формы и пропорций балок и тросов, на которых держатся его пролеты. Но, кроме того, и это особенно важно, прочность моста зависит от микроскопических особенностей материалов, из которых этот мост построен. Химический состав и атомарное строение стали определяют, насколько эта сталь прочна и как сильно она способна согнуться, прежде чем сломается. Точно также и прочность нашего скелета зависит, с одной стороны, от размеров, формы и пропорций костей, а с другой стороны — от химического состава и мельчайших особенностей строения веществ, из которых состоят наши кости.

Давайте теперь попробуем разобраться, как именно это происходит. Когда мы совершаем пробежку, наши мышцы сокращаются, позвоночник, руки и ноги движутся, а ступни отталкиваются от земли, перемещая наше тело вперед. Наши кости и суставы функционируют при этом как гигантский комплекс рычагов и блоков, которые и делают возможными все эти движения. Движения нашего тела подчиняются простым физическим законам. Наша способность бегать во многом определяется размером, формой и пропорциями нашего скелета, а также устройством наших суставов. На этом уровне наш организм представляет собой что-то вроде гигантской машины. Как и положено машине, его устройство соответствует его функциям. У чемпиона по прыжкам в высоту скелет имеет иные пропорции, чем у борца сумо. Еще сильнее отличаются друг от друга пропорции скелета конечностей лягушки, приспособленные для прыжков, и лошади, приспособленные для бега.

Теперь давайте посмотрим на микроскопическое строение. Если взять срез бедренной кости и рассмотреть его под микроскопом, мы сразу увидим, что придает костям их особые механические свойства. Клетки костной ткани расположены очень упорядоченно, особенно вблизи наружной поверхности кости. Некоторые из этих клеток соединены друг с другом, другие изолированы. Между изолированными клетками и группами клеток располагаются материалы, которые и определяют прочность кости. Один из этих материалов — минерал вроде камня, называемый гидроксипатитом (мы уже говорили о нем в четвертой главе). Гидроксипатит — вещество твердое в том же смысле, в каком тверд бетон: он устойчив к сжатию, но менее устойчив к сгибанию. Поэтому, точно так же, как сложенные из кирпичей или бетонных блоков дома, кости имеют строение, при котором их материал

больше подвергается сжатию и меньше — сгибанию. Галилей понял это уже в XVII веке.

Еще одно вещество в промежутках между клетками кости есть самый обычный белок во всем человеческом организме. Если мы рассмотрим препарат кости под электронным микроскопом при увеличении в 10 тысяч раз, мы увидим что-то вроде канатов, сплетенных из пучков белковых волокон. Это вещество называется коллагеном, и не только строение, но и механические свойства делают его похожим на канат. Канат относительно прочен на растяжение, но легко поддается сжатию и сгибанию (представьте себе, что случится, если две команды, перетягивающие канат, побегут друг навстречу другу). Подобно канату, коллаген оказывается прочным, если его растягивать, но податливым, если сгибать.

Кости состоят из клеток, окруженных морем гидроксиапатита, коллагена и некоторых других веществ, присутствующих в меньшем количестве. Некоторые из клеток соединены друг с другом, другие целиком окружены этими материалами. Прочность кости на растяжение определяется коллагеном, а прочность на сжатие — гидроксиапатитом.

Хрящи — еще одна составляющая наших скелетов — ведут себя несколько иначе. Именно хрящи образуют те гладкие поверхности, которые позволяют соединенным костям во время пробежки скользить друг относительно друга. Безупречная работа коленного сустава, как и большинства других суставов, которыми мы пользуемся, совершая пробежку, зависит от относительной мягкости и упругости хрящевой ткани в этих суставах. Если сжать здоровый хрящ, а затем отпустить, он вновь вернется к своей первоначальной форме, подобно губке для мытья посуды. Каждый раз, когда мы во время пробежки касаемся ступней земли, вся масса нашего тела на некоторой скорости врезается в землю. Если бы кости у нас в суставах не были защищены хрящевыми колпачками, они с силой терлись бы друг о друга. Именно это происходит при некоторых формах артрита: хрящи в суставах атрофируются, и движения оказываются затруднены.

Мягкость и упругость хрящевой ткани определяются ее микроскопическим строением. В хрящах, которые расположены в наших суставах, клеток довольно мало, и эти клетки разделены большим количеством заполняющего межклеточное пространство вещества. Как и в случае с костной тканью, прежде всего именно свойства этого межклеточного наполнителя и определяют механические характеристики всей ткани.

В хрящевой ткани (как и во многих других тканях нашего тела) межклеточное пространство во многом заполнено коллагеном. Упругость же хрящу придает другое вещество — одно из самых необычных во всем нашем организме. Это вещество, которое называется протеогликан, делает хрящ упругим и устойчивым к сжатию. Комплекс молекул протеогликана напоминает большую трехмерную щетку с длинной ручкой и множеством маленьких ответвлений. Такие комплексы можно даже увидеть под микроскопом. Это вещество обладает удивительным свойством, которое и дает нам возможность ходить и бегать. Дело в том, что тонкие ответвления протеогликанового комплекса охотно соединяются с водой. Благодаря этому протеогликан легко пропитывается немалым количеством воды, образуя что-то вроде студня. Если сделать студень, внутри и вокруг которого будут густой сетью переплетены нитки (они соответствуют коллагену), такой студень будет одновременно довольно мягким, упругим и относительно устойчивым к растяжению. Примерно так и устроена хрящевая ткань. Она служит прекрасной прокладкой между костями там, где они соединяются, то есть в суставах. Роль клеток хрящевой ткани состоит в том, чтобы выделять эти вещества по ходу роста организма и поддерживать их запасы после того, как рост закончится.

Соотношение различных межклеточных материалов во многом и определяет различие механических свойств костей, хрящей и зубов. Зубы — структуры очень твердые, поэтому вполне предсказуемо, что в составе их эмали много гидроксиапатита и мало коллагена. В костной ткани содержится несколько больше коллагена и меньше гидроксиапатита. Поэтому кости не так прочны, как зубы. В составе хрящевой ткани много коллагена, а гидроксиапатита нет, но зато есть много протеогликана. В результате хрящевая ткань — самая мягкая из тканей нашего скелета. Правильное строение и работа скелета во многом определяются содержанием этих веществ во всех его структурах в определенных правильных соотношениях.

Но какое все это имеет отношение к происхождению наших тел? У всех животных есть одно общее свойство, независимо от того, есть у них скелет или нет: все они, даже самые примитивные, наделены определенными веществами, которые заполняют пространство между клетками, а именно определенными разновидностями коллагена и протеогликана. Особую роль среди этих веществ играет коллаген. Это самый распространенный белок в организмах животных: на него приходится более 90% массы всех белков в организме. Построение

многоклеточных тел, которое началось в далеком прошлом, было бы невозможно, если бы не возникло такое вещество.

Еще одна очень важная для нашего тела особенность состоит в том, что его клетки должны уметь соединяться и общаться друг с другом. Как соединяются друг с другом клетки кости и откуда клетки в разных ее частях знают, что им нужно вести себя по-разному? Ответ на этот вопрос позволяет во многом понять, как устроен наш "арсенал для бодибилдинга" — то есть инструментарий, позволяющий строить наши тела.

Клетки кости, как и все другие клетки нашего тела, соединяются друг с другом при помощи тонких молекулярных заклепок. В нашем организме есть множество разных заклепок такого рода. Некоторые из них соединяют клетки так, как клей соединяет ботинок и его подошву: одна молекула закреплена на наружной мембране одной клетки, а другая — на наружной мембране другой клетки. Этот клей, прикрепляясь к мембранам обеих клеток, обеспечивает им устойчивое соединение.

Другие молекулярные заклепки столь разборчивы, что присоединяются избирательно, лишь к заклепкам того же типа. Это очень важное свойство наших организмов, которое во многом обеспечивает фундаментальные особенности его строения. Такие избирательные заклепки помогают клеткам определенного типа безошибочно находить друг друга. Благодаря им клетки костной ткани соединяются с другими клетками костной ткани, клетки кожи — с другими клетками кожи и так далее. Эти заклепки позволяют формировать наши тела без какой-либо дополнительной информации. Если мы возьмем некоторое количество клеток нескольких разновидностей, каждая из которых обладает определенным типом таких заклепок, и оставим их расти на питательной среде, эти клетки сами сформируют скопления, состоящие из клеток одной разновидности. Одни могут собраться в шарики, другие — в пластинки, и все они будут отсортированы по типу заклепок.

Но, пожалуй, самый важный тип связей между клетками — это связи, позволяющие им обмениваться друг с другом информацией. Правильное строение нашего скелета, да и всего нашего тела, возможно только благодаря тому, что формирующие его клетки умеют правильно себя вести. Для этого они должны уметь правильно делиться, производить определенные вещества и вовремя умирать. Если бы, к примеру, клетки костной ткани или клетки кожи вели себя как попало — например, делились слишком часто или умирали слишком редко, — мы

вырастали бы уродами или не выростали вовсе, а погибали на ранних стадиях развития.

Клетки общаются друг с другом, пользуясь "словами", записанными на молекулах, которые передаются от клетки к клетке. Передавая друг другу такие молекулы, соседние клетки могут как бы разговаривать. Вот один из простейших примеров такого межклеточного общения. Одна клетка подает сигнал — выделяет молекулы определенного вещества. Эти молекулы прикрепляются к наружной оболочке, то есть мембране, соседней клетки, для которой и предназначен этот сигнал. Прикрепление таких молекул к мембране запускает цепную реакцию молекулярных взаимодействий, которые передают сигнал от мембраны внутрь, часто даже в ядро получившей сигнал клетки. Напомню, что внутри клеточного ядра хранится генетическая информация. Переданный в ядро сигнал может включить или выключить определенные гены. В итоге клетка, получившая сигнал, изменит свое поведение. Этот сигнал может заставить ее умереть, разделиться или начать производить какие-то новые вещества.

Вот что, в первом приближении, и делает возможным существование наших тел. У всех животных в узком смысле, то есть многоклеточных, имеются структурные молекулы, такие как коллаген и протеогликан, имеется набор молекулярных заклепок, позволяющих клеткам соединяться друг с другом, и имеется молекулярный инструментарий, позволяющий клеткам общаться друг с другом.

Теперь у нас есть поисковый образ, необходимый, чтобы разобраться в происхождении наших тел. Чтобы понять, как наши тела возникли, нам нужно найти все три перечисленных выше типа молекул у самых примитивных животных на планете, а затем постараться отыскать что-то похожее у одноклеточных организмов.

Бодибилдинг для капель

Что общего между телом профессора и капель? Чтобы ответить на этот вопрос, давайте рассмотрим самых примитивных животных, обитающих сегодня на нашей планете.

Одно из них не только очень просто устроено, но и по-прежнему во многом загадочно: его очень редко наблюдали в природе, и даже все стадии его жизненного цикла так до сих пор и не удалось проследить. В конце восьмидесятых годов XIX века на стеклянной стенке аквариума один ученый обнаружил удивительно простой организм. Он не был похож ни на одно известное животное и напоминал бесформенный комок или кляксу. Единственное, с чем его можно сравнить, — это бесформенный инопланетный монстр из фильма "Капля" ("The Blob" со Стивом Маккуином). Этот монстр представляет собой загадочную бесформенную массу, занесенную на Землю из космоса. Он обволакивает и переваривает своих жертв — собак, людей, а затем даже целые ресторанчики в небольших пенсильванских городках. Пищеварительные органы у этого монстра где-то на брюшной стороне (правда, в фильме их не показывают, но попадающие туда люди издают душераздирающие крики). Если уменьшить этого монстра до двух миллиметров в диаметре — так, чтобы его тело состояло лишь из нескольких сотен клеток, — мы получим нечто очень похожее на этот вполне реальный земной организм, получивший название трихоплакс. У трихоплакса есть только четыре типа клеток, а тело по форме напоминает не то комок, не то кляксу. И все же это настоящее тело. Некоторые из клеток брюшной стороны специализируются на пищеварении, другие наделены жгутиками, биение которых помогает трихоплаксу двигаться. Питаются трихоплаксы в основном водорослями и бактериями. Точно не известно, насколько широко он распространен, но его находили в нескольких морях в разных концах Земли. Хотя мы по-прежнему многого не знаем об этих животных, известно, что у них есть одно исключительно важное свойство. Как бы просто ни был устроен организм, между его частями уже существует отчетливое разделение труда.

Многие интересные особенности наших тел можно наблюдать и у трихоплакса. Тело трихоплакса — настоящий многоклеточный организм, хоть и примитивно устроенный. Изучая ДНК трихоплакса и молекулы, находящиеся на поверхности его клеток, мы убеждаемся, что у него уже

имеется значительная часть нашего набора для бодибилдинга. У трихоплакса есть определенные молекулярные заклепки, соединяющие клетки, а также средства для общения клеток, похожие на те, что присутствуют и в наших собственных телах.

Наш набор для построения тела можно найти в бесформенных комках, устроенных еще проще, чем некоторые из древних ископаемых, открытых Реджинальдом Сприггсом. Можем ли мы пойти еще дальше, перейти к организмам с еще более примитивными телами? По-видимому, да. Обратимся к существам, тела которых с давних пор использовали для мытья, — к губкам. На первый взгляд, в губке мало примечательного. Значительную часть тела губки составляют опорные структуры, состоящие из силикатов (веществ, близких к стеклу) или карбоната кальция (твердого материала, из которого состоят раковины моллюсков), переплетенных с некоторым количеством коллагена. Вот это-то и делает губок интересными. Вспомним, что коллаген — важнейший материал наших межклеточных пространств, скрепляющий многие клетки и ткани нашего организма. По виду губок этого не скажешь, но у них уже есть один из отличительных признаков настоящих многоклеточных организмов.

В начале XX века Генри ван Питере Уилсон, исследовавший губок, показал, насколько они на самом деле удивительны. В 1894 году Уилсон поступил на работу в Университет Северной Каролины, став первым профессором биологии этого университета. Он вырастил здесь целую плеяду выдающихся американских биологов, работы которых во многом определили ход развития генетики и клеточной биологии в Северной Америке на протяжении XX века. Еще в молодости Уилсон решил посвятить свою научную деятельность именно изучению губок. Один из его экспериментов показывает по-настоящему удивительное свойство этих на первый взгляд простых организмов. Уилсон пропускал тело губки через сито, превращая его в набор отделенных друг от друга клеток. Затем он помещал эти похожие на амёб, совершенно отдельные клетки в стеклянную чашку и наблюдал за ними. Поначалу они просто ползали по дну чашки. Затем произошло нечто удивительное: они стали группироваться. Сперва из них образовались бесформенные красноватые шарики. Затем эти шарики стали более упорядоченными: упакованные в них клетки стали образовывать регулярные структуры. Уилсон увидел, как почти с нуля собирается живой организм. Если бы мы могли делать то, на что способны губки, то с попавшим в дробилку и размолотым на кусочки героем Стива Бушеми из фильма братьев Коэнов "Фарго" все

было бы в порядке. Этот опыт даже мог бы пойти ему на пользу, ведь клетки, собравшись вместе, могли бы образовать несколько его копий.

Именно клетки губок делают этих животных полезным орудием для изучения происхождения наших тел. Внутри тела губки обычно находится полость, которая может быть по-разному разделена на отсеки, в зависимости от вида губки. Через эти отсеки протекает вода, приводимая в движение клетками совершенно особого типа. Выглядят эти клетки как бокалы на толстых ножках, направленных внутрь тела губки. Из бокала торчит длинный жгутик, биение которого и приводит в движение воду. На стенках бокала, образованных микроворсинками, оседают различные частицы, которые клетка может поглощать и переваривать. С помощью этих клеток губка пропускает сквозь свое тело воду, которая вначале поступает в центральную полость, а затем растекается по отсекам и выходит через поры наружу. По ходу движения воды сквозь организм губки из воды отфильтровываются пищевые частицы. Другие клетки, расположенные в теле губки глубже, участвуют в переваривании поглощенной пищи. Клетки еще одного типа образуют наружные покровы губки и могут сокращаться, меняя форму ее тела. Эта способность помогает губкам успешно фильтровать воду, когда направление ее потоков меняется.

Губка мало похожа на большинство знакомых нам животных, но она уже обладает многими важнейшими признаками многоклеточного организма: между ее клетками есть разделение труда, эти клетки способны общаться друг с другом и совокупность большого числа клеток ведет себя как единый организм. Строение губки упорядочено: разные клетки находятся на разных местах и выполняют разную работу. Конечно, телу губки далеко до тела человека, в состав которого входят триллионы определенным образом расположенных клеток, но тела губки и человека обладают некоторыми общими свойствами. Особенно важно, что у губок уже имеется значительная часть нашего инструментария, обеспечивающего сцепление клеток, их общение и построение из них тканей многоклеточного организма. Губки — настоящие многоклеточные, хотя и очень примитивные и обладающие довольно слабо упорядоченным строением.

Мы тоже, подобно трихоплаксам и губкам, состоим из многих клеток. У нас, как и у них, между разными клетками и структурами тела есть разделение труда. И у нас и у них есть все элементы молекулярного аппарата, который скрепляет клетки в единый организм: соединяющие заклепки, различные инструменты для передачи сигналов от клетки к

клетке и ряд веществ, молекулы которых заполняют пространство между клетками. У трихоплаксов и губок даже есть коллаген, как и у нас — и у всех остальных животных. Но, в отличие от нас, трихоплаксы и губки обладают довольно примитивными вариантами всех этих признаков. Например, вместо наших двадцати двух типов коллагена у губок есть только два, а молекулярных заклепок у них не сотни типов, как у нас, а во много раз меньше. Губки устроены проще, чем мы, и имеют намного меньше типов клеток, но основные инструменты из набора для построения тела у них уже есть.

Трихоплаксы и губки относятся к самым простым из многоклеточных организмов, живущих в наши дни. Чтобы пойти еще дальше, теперь нам нужно искать то, что позволяет строить наши тела, у существ, вообще не обладающих многоклеточным телом, — у одноклеточных микробов.

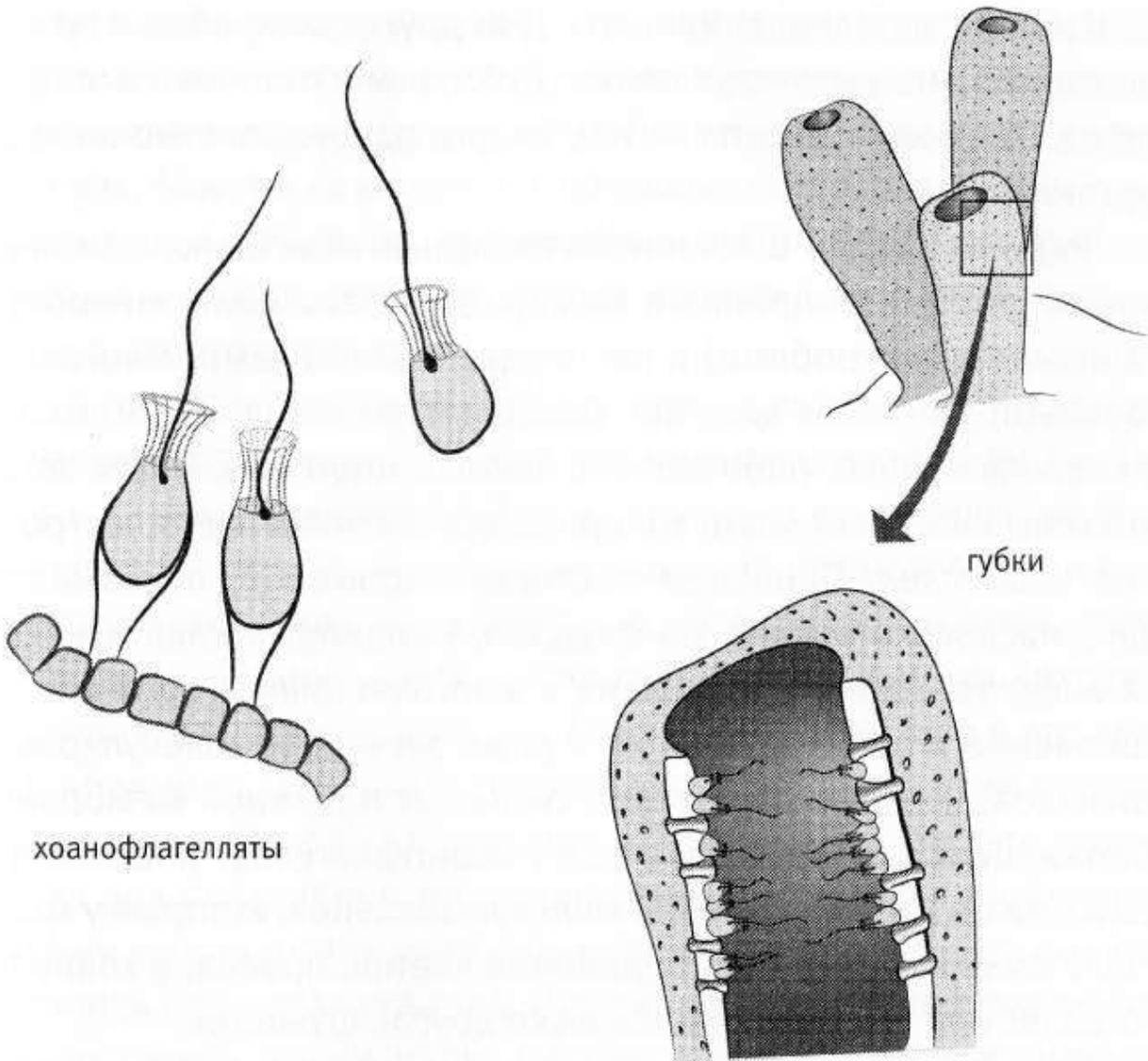
Как сравнить одноклеточный организм микроба с многоклеточным организмом животного? Имеются ли у одноклеточных инструменты, позволяющие строить многоклеточные тела? Если имеются, но не служат для построения тел, то для чего они нужны?

Самый прямолинейный способ искать ответ на эти вопросы состоит в том, чтобы изучить гены микробов и попытаться найти в них общие черты с генами животных. Самые первые сравнения геномов (то есть совокупностей всех генов организма) животных и микробов показали, что у многих одноклеточных отсутствует значительная часть генов, которые у многоклеточных обеспечивают соединение, взаимодействие клеток и прочее. Результаты некоторых исследований, казалось, свидетельствовали о том, что более восьмисот веществ, синтезируемых за счет работы таких генов, имеются только у настоящих животных, то есть многоклеточных, и отсутствуют у одноклеточных. Эти результаты как будто подтверждали предположение, что гены, позволяющие объединять клетки в многоклеточный организм, возникли одновременно с многоклеточностью. На первый взгляд казалось довольно логичным, что инструменты для построения многоклеточных тел появились именно тогда, когда появились и сами такие тела.

Но все эти представления полностью перевернулись, когда Николь Кинг из Калифорнийского университета в Беркли занялась организмами, которые называют хоанофлагеллятами (или воротничковыми жгутиконосцами). Она выбрала именно этот объект для своих исследований не случайно. Ей было известно, что, судя по результатам некоторых работ с ДНК, хоанофлагелляты вполне могут быть

ближайшими одноклеточными родственниками настоящих (многоклеточных) животных, в том числе трихоплаксов и губок. Поэтому она подозревала, что в ДНК хоанофлагеллят можно найти варианты генов, обеспечивающих формирование наших тел.

Поискам, которые вела Николь, помог проект "Геном человека" — увенчавшееся успехом предприятие, целью которого было прочтение последовательности всей ДНК человека и картирование всех имеющихся у нас генов. Наряду с этим проектом были организованы аналогичные проекты, посвященные другим организмам — мухе-дрозофиле, серой крысе, медоносной пчеле, а также трихоплаксу, некоторым губкам и многим видам микробов. Полученные генетические карты — настоящий клад информации для наших исследований. Они позволяют сравнивать "гены бодибилдинга" многих разных видов. Такие карты очень помогли Николь Кинг в изучении хоанофлагеллят.



Хоанофлагелляты (слева) и губки (справа).

Хоанофлагелляты на удивление похожи на те клетки губок, которые напоминают бокалы на толстых ножках. Их сходство так велико, что долгое время многие считали, что хоанофлагелляты произошли от выродившихся губок, которые утратили все другие типы клеток и потеряли способность соединять их вместе. Если бы это было так, то ДНК хоанофлагеллят напоминало бы ДНК очень необычной губки. Но это не так. Когда участки ДНК хоанофлагеллят сравнили с ДНК других микробов и губок, оказалось, что у хоанофлагеллят ДНК сильно отличается от ДНК губок. Хоанофлагелляты — настоящие одноклеточные микроорганизмы.

Работы Николь с хоанофлагеллятами показали, что никакой генетической пропасти между одноклеточными микроорганизмами (микробами) и настоящими животными (многоклеточными) на самом деле нет. Большинство генов, работающих у хоанофлагеллят, работают и в клетках животных. Более того, эти гены включают часть аппарата, обеспечивающего построение наших тел. Приведем несколько примеров, показывающих, насколько велико это сходство. У хоанофлагеллят имеются вещества, обеспечивающие в многоклеточных организмах сцепление и общение клеток — даже элементы молекулярных каскадов, которые доставляют сигнал от наружной мембраны клетки внутрь ее ядра. Имеется у хоанофлагеллят и коллаген. Есть у них и несколько типов молекул-заклепок, которые у многоклеточных служат для соединения клеток, правда, у хоанофлагеллят они выполняют несколько другие функции.

Изучение хоанофлагеллят позволило Николь открыть пути для сравнения нашего аппарата построения тела с теми его деталями, которые можно найти и у других микробов. Гены, которые позволяют синтезировать коллаген и протеогликан, теперь известны и у ряда других микроорганизмов. Например, стрептококки — бактерии, которые живут у нас во рту (а иногда и не только), — несут на поверхности своих клеток вещество, очень близкое к коллагену. Молекулярное строение этого вещества необычайно похоже на строение нашего коллагена, но его молекулы не сплетаются в канаты или пласты, как делает коллаген животных. У многих разных бактерий в клеточных стенках имеются некоторые из сахаров, входящих в состав протеогликанового комплекса, который составляет основу наших хрящей. Эти сахара играют у ряда болезнетворных бактерий и вирусов довольно неприглядную роль. Они помогают болезнетворным агентам проникать в клетки других организмов и во многих случаях делают возбудителей заболеваний более опасными для нас. Многие из молекул, с помощью которых микробы причиняют нам страдания, представляют собой более простые варианты молекул, которые делают возможным существование наших собственных тел.

Из этого вытекает один закономерный вопрос. В древних породах возрастом от трех с лишним миллиардов до шестисот с лишним миллионов лет мы находим одни лишь остатки микроорганизмов. А затем внезапно, на промежутке где-то в 40 миллионов лет, появляются всевозможные многоклеточные тела растений, грибов, животных — повсюду мы находим ископаемые остатки этих тел. Многоклеточные

тела в это время почему-то становятся пискom моды. Но ведь сухой остаток полученных Николь результатов говорит нам о том, что потенциал для построения многоклеточных тел имелся в распоряжении микроорганизмов, возникших задолго до того, как появились первые такие тела. Почему же после такой долгой одноклеточной жизни вдруг началась вся эта многоклеточная суeta?

Происхождение тел как "идеальный шторм"

Своевременность — залог успеха. Лучшие идеи, изобретения и теории далеко не всегда оказываются востребованы. Сколько музыкантов, изобретателей и художников так далеко опередили свое время, что при жизни не были никем оценены и оказались вскоре забыты, лишь через многие годы получив заслуженное признание? Назовем лишь один пример — Герона Александрийского, который в первом веке нашей эры изобрел паровую турбину. К сожалению, современники считали ее не более чем забавной игрушкой. Мир был не готов к ней.

История жизни на Земле работает по тем же законам. Всему свое время. Вероятно, для возникновения многоклеточности тоже было свое определенное время. Чтобы разобраться в этом, нам нужно понять, почему вообще возникли многоклеточные тела.

Одна из теорий их происхождения чрезвычайно проста. Она предполагает, что многоклеточные тела возникли в результате того, что микробы вырабатывали новые способы поедать друг друга и избегать опасности быть съеденным. Многоклеточное тело позволяет стать большим. Стать большим — один из проверенных способов, помогающих не быть съеденным. Поэтому многоклеточность могла возникнуть как своего рода защитный механизм.

Когда хищники вырабатывают новые способы поедания жертв, жертвы в ответ на это вырабатывают новые способы избежать своей участи. Такого рода взаимодействия могли привести к появлению многих наших "молекул бодибилдинга". Многие микробы питаются другими микробами, прикрепляясь к ним и вслед за тем их заглатывая. Молекулы, позволяющие таким микробам ловить и удерживать добычу, — вполне вероятные претенденты на роль предшественников тех заклепок, которые позволяют клеткам наших тел соединяться друг с другом. Некоторые микробы способны и к общению: многие из них выделяют соединения, которые воздействуют на поведение других микробов. Взаимодействия микробов-хищников и микробов-жертв нередко осуществляются с помощью сигнальных молекул, которые позволяют, например, отпугивать потенциальных хищников или, напротив, приманивать потенциальных жертв. Возможно, именно такие сигнальные молекулы и стали предшественниками тех молекул, с помощью которых наши клетки обмениваются информацией,

обеспечивая развитие и поддерживая нормальную работу наших тел.

Мы могли бы рассуждать о таких вещах до бесконечности, но гораздо интереснее, чем все эти умозрительные построения, были бы какие-нибудь реальные экспериментальные данные, которые пролили бы свет на то, как хищничество могло привести к возникновению многоклеточных тел. Именно такие данные получили Мартин Бораас и его коллеги. Они взяли водоросль, которая в норме остается одноклеточной, и выращивали ее у себя в лаборатории, сменив около тысячи поколений. Затем они добавили хищника — одноклеточного жгутиконосца, который заглатывает и переваривает других, более мелких микробов. Менее чем через двести поколений водоросль отреагировала на присутствие хищника тем, что стала образовывать комки из сотен клеток. Со временем число клеток в этих комках стало уменьшаться, пока их не осталось всего по восемь в каждом комке. Число восемь оказалось оптимальным потому, что позволяло, с одной стороны, делать комки достаточно большими, чтобы их не мог заглотить хищник, а с другой стороны — достаточно маленькими, чтобы каждая клетка в комке могла улавливать достаточное для своего выживания количество света. Самое удивительное произошло, когда хищника удалили. Водоросли продолжали размножаться, и последующие поколения по-прежнему образовывали комки по восемь клеток. Иными словами, из одноклеточных существ возникло нечто приближенное к многоклеточному телу.

Если в экспериментальных условиях можно за несколько лет получить простое подобие многоклеточного организма, представьте, что могло бы получиться за миллиарды лет. Выходит, что вопрос состоит не столько в том, как могла возникнуть многоклеточность, сколько в том, почему она не возникла раньше.

Вероятно, разгадка этой тайны в тех условиях среды, в которых возникли первые многоклеточные тела. По-видимому, до их возникновения мир был еще не готов к их появлению.

Иметь многоклеточное тело — дорогое удовольствие. У большого тела есть очевидные преимущества: оно не только позволяет избегать хищников, но и помогает питаться другими, более мелкими организмами, а также активно передвигаться на большие расстояния. Все эти способности помогают животному лучше справляться с условиями окружающей среды. Но все они требуют немалых затрат энергии. Причем чем больше становится тело, тем больше энергии оно требует, особенно если для поддержания его структуры используется коллаген.

Для синтеза коллагена требуется довольно большое количество кислорода, поэтому необходимость синтезировать коллаген сильно увеличивала потребность наших далеких предков в этом жизненно важном веществе.

Но здесь была вот такая загвоздка: концентрация кислорода в воздухе и воде в далекой древности была очень низкой. За многие миллиарды лет она и близко не подходила к тем значениям, которые мы наблюдаем сегодня. Затем, где-то около миллиарда лет назад, концентрация кислорода стала резко повышаться и через некоторое время достигла значений, сравнимых с современными. После этого она уже никогда сильно не снижалась. Откуда нам это известно? Из химических особенностей горных пород. Породы возрастом около миллиарда лет несут в себе явные следы того, что они формировались в условиях повышающейся концентрации кислорода. Может быть, появление многоклеточности было связано как раз с повышением уровня кислорода в атмосфере?

Возможно, для появления тел потребовалось что-то вроде "идеального шторма" — случайного стечения погодных условий, которые по отдельности ничего бы не сделали, а вместе вызывают сильный шторм. В течение миллиардов лет микробы вырабатывали новые способы взаимодействия с окружающей средой и друг с другом. В процессе этого им удалось найти ряд молекулярных составляющих и других инструментов, которые впоследствии помогли в строительстве тел, но тогда использовались для других целей. Кроме того, около миллиарда лет назад появилась и причина для возникновения многоклеточности: микробы научились пожирать друг друга. Итак, для появления многоклеточных тел теперь была причина, а инструменты для этого уже имелись в наличии.

Но еще одного условия не хватало. Этим условием было достаточное для поддержания жизни многоклеточного организма количество кислорода. Когда концентрация кислорода в атмосфере стала достаточно высокой, многоклеточные тела появились повсюду. Облик жизни на Земле изменился раз и навсегда.

Глава 8. Курс на запах.

Вначале восьмидесятых отношения между молекулярными биологами и теми, кто занимался целыми организмами — экологами, анатомами, палеонтологами, — были довольно напряженными. Анатомов, например, молекулярщики считали старомодными приверженцами безнадежно устаревшей научной дисциплины. Молекулярная биология производила в подходах к анатомии и биологии развития такую революцию, что классические области, такие как палеонтология, казались тупиковыми ветвями исторического развития биологии. Я очень остро ощущал все это: казалось, что меня с моей любовью к ископаемым скоро заменят каким-нибудь новейшим аппаратом, читающим последовательности нуклеотидов в ДНК.

Прошло двадцать лет, и я по-прежнему копаюсь в грязи и раскалываю камни. Кроме того, я собираю образцы ДНК и изучаю ее роль в развитии организмов. Так обычно и бывает в научных спорах — поначалу люди всегда склонны перегибать палку. Со временем подход "все или ничего" уступает место более взвешенным и реалистичным подходам. Ископаемые и геологическая летопись остаются богатым источником данных о нашем прошлом. Без них никак нельзя узнать, какими были условия среды и какие именно переходные формы возникали на протяжении развития жизни. Изучение ДНК в свою очередь, как мы уже убедились, открывает широкое поле для изучения истории жизни и механизмов формирования тел и органов. Роль ДНК особенно велика в тех вопросах, о которых палеонтологические данные ничего не говорят. Многие структуры живых организмов, например мягкие ткани, сохраняются в ископаемом виде лишь в редчайших случаях. Об истории многих таких структур у нас имеются сведения, добытые почти исключительно из ДНК.

Извлекать ДНК из живых организмов удивительно просто — так просто, что вы можете делать это у себя на кухне. Возьмите немного ткани какого-либо растения или животного — горох, или кусок мяса, или куриную печенку. Добавьте немного соли и воды и поместите все это в кухонный комбайн, чтобы размолоть в однородную массу. Затем добавьте немного средства для мытья посуды. Оно растворит окружающие клетки мембраны, оказавшиеся слишком маленькими, чтобы их размолот кухонный комбайн. После этого добавьте немного

размягчителя для мяса. Он удалит некоторые белки, прикрепленные к молекулам ДНК. Теперь у вас получилось жидковатое мыльное пюре, в котором плавает ДНК. Добавьте к нему немного технического изопропилового спирта. У вас получится двухслойный коктейль: внизу мыльное пюре, вверху прозрачный спирт. ДНК охотно смешивается со спиртом, поэтому она выйдет из пюре в спирт. Если вы увидите, что в спирте появился округлый белый сгусток, значит, вы все сделали правильно. Этот сгусток и есть ДНК.

Теперь с помощью этого белого вещества можно разобраться во многих фундаментальных связях между нами и остальными живыми существами. Чтобы сделать это, нужно сравнивать строение и функции ДНК разных видов, и на это занятие у нас уходит немало часов и долларов. В этом деле очень помогает одно на первый взгляд неожиданное обстоятельство. Извлекая ДНК из *любой* ткани того или иного вида, к примеру из печени, можно добыть сведения об истории не только этой ткани и части тела, но и любой другой, например органов обоняния. В ДНК, содержащейся в любой клетке, будь это клетка печени, крови или мышечной ткани, содержится рецепт формирования того устройства, которым мы пользуемся для восприятия запахов окружающей среды. Во всех наших клетках заключен один и тот же набор ДНК. Разница между клетками, напомню, состоит в том, что в них работают разные участки ДНК (то есть гены). Гены, ответственные за наше обоняние, имеются во всех наших клетках, хотя работают они только в клетках носовой полости.

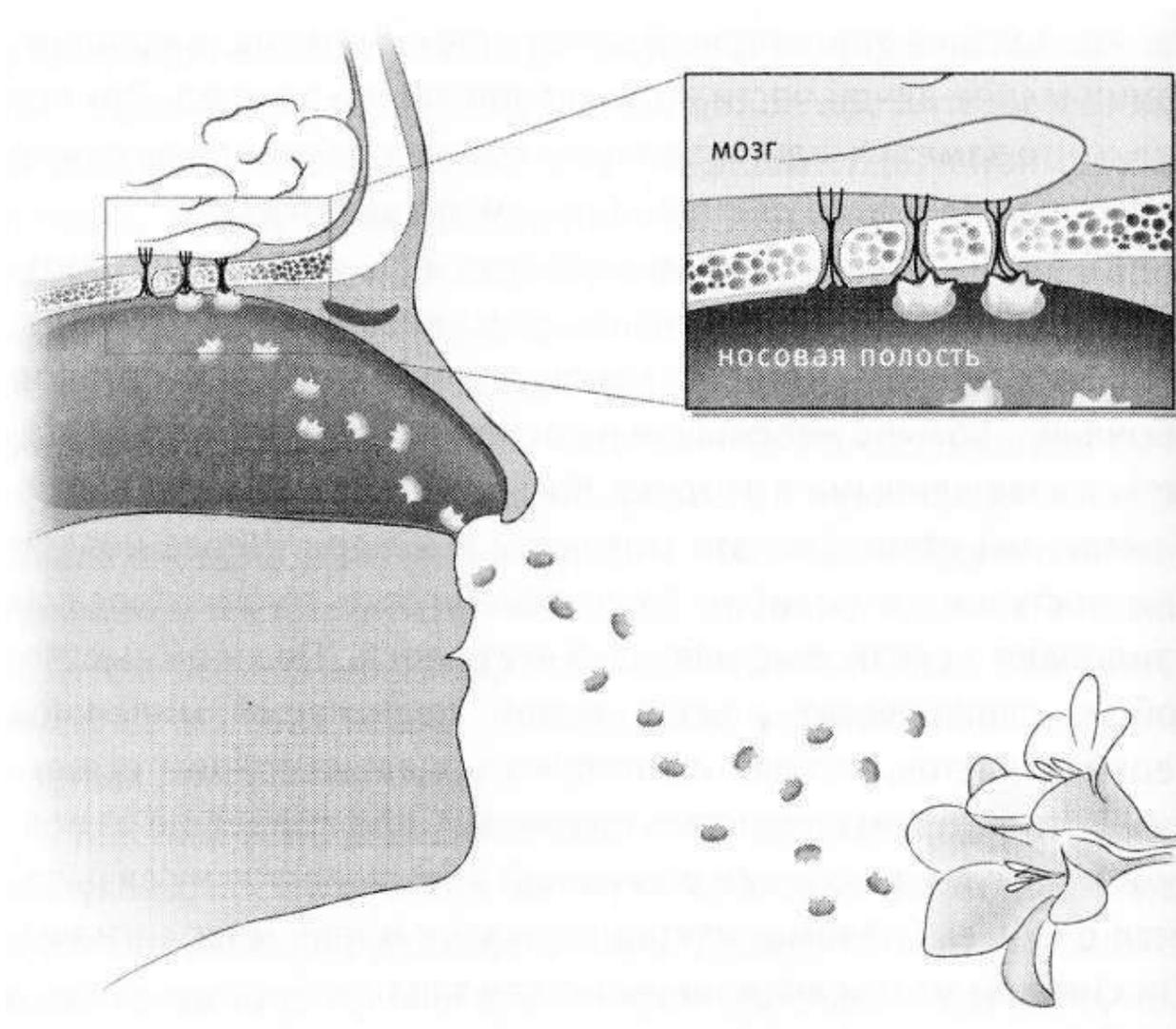
Как нам всем хорошо известно, запахи вызывают нервные импульсы, поступающие в мозг и во многом определяющие наше восприятие окружающего мира. Даже слабый запах может живо напомнить тот класс, в котором мы сидели в детстве, или уютный старый чердак в доме бабушки и дедушки и вновь оживить те чувства, которые мы там когда-то испытывали. Кроме того, и это еще важнее, запахи помогают нам выжить. Запах вкусной еды возбуждает в нас чувство голода, а запах канализации вызывает тошноту. У нас есть врожденная схема поведения, заставляющая нас избегать тухлых яиц. Если вам нужно продать дом, намного лучше, если покупатели, которые придут его осмотреть, почувствуют запах выпекаемого в духовке хлеба, чем варящейся на плите капусты. Люди вкладывают в запахи огромные деньги: в 2005 году в одних Соединенных Штатах парфюмерная промышленность получила 24 миллиарда долларов прибыли. Вот свидетельство того, как тесно мы связаны с нашим обонянием.

Обоняние позволяет нам различать от пяти до десяти тысяч разных запахов. Некоторые люди могут почувствовать вещество, придающее характерный запах острому перцу, в концентрации менее одной части на триллион частей воздуха. Это все равно что заметить единственную песчинку на песчаном пляже в полтора километра длиной. Как нам это удается?

То, что мы воспринимаем как запах, есть ответ нашего мозга на плавающий в воздухе коктейль из разных веществ. Молекулы этих веществ, которые мы ощущаем с помощью органов обоняния, обычно небольшие и достаточно легкие, чтобы оставаться взвешенными в воздухе. Когда мы дышим или принимаем, мы втягиваем эти молекулы в ноздри. Через ноздри они поступают в полость, расположенную в глубине носа, и прилипают к слизи, выстилающей эту полость. Под этой выстилкой из слизи лежит участок ткани, содержащей миллионы нервных клеток, каждая из которых наделена тонким выростом, достигающим слизистого покрова. Когда выпавшие из воздуха молекулы доходят до окончаний этих выростов и связываются с их мембранами, клетки посылают в наш мозг сигналы. Эти сигналы мозг и воспринимает как запах.

На молекулярном уровне наше обоняние работает по принципу ключа и замка. Ключом служит молекула воспринимаемого вещества, замком — рецептор на мембране нервной клетки. Молекула, пойманная выстилающей носовую полость слизью, взаимодействует с рецептором на поверхности мембраны нервной клетки. Клетка посылает в мозг сигнал, только когда молекула связывается с рецептором. Каждому рецептору соответствуют молекулы определенного типа. То, что мы воспринимаем как один запах, часто вызывается набором из молекул многих разных веществ и, соответственно, набором из многих сигналов, поступающих в мозг.

Чтобы пояснить это, как нельзя лучше подойдет аналогия из области музыки: многие запахи — это что-то вроде аккорда. Каждый аккорд состоит из нескольких нот, звучащих и воспринимаемых вместе.

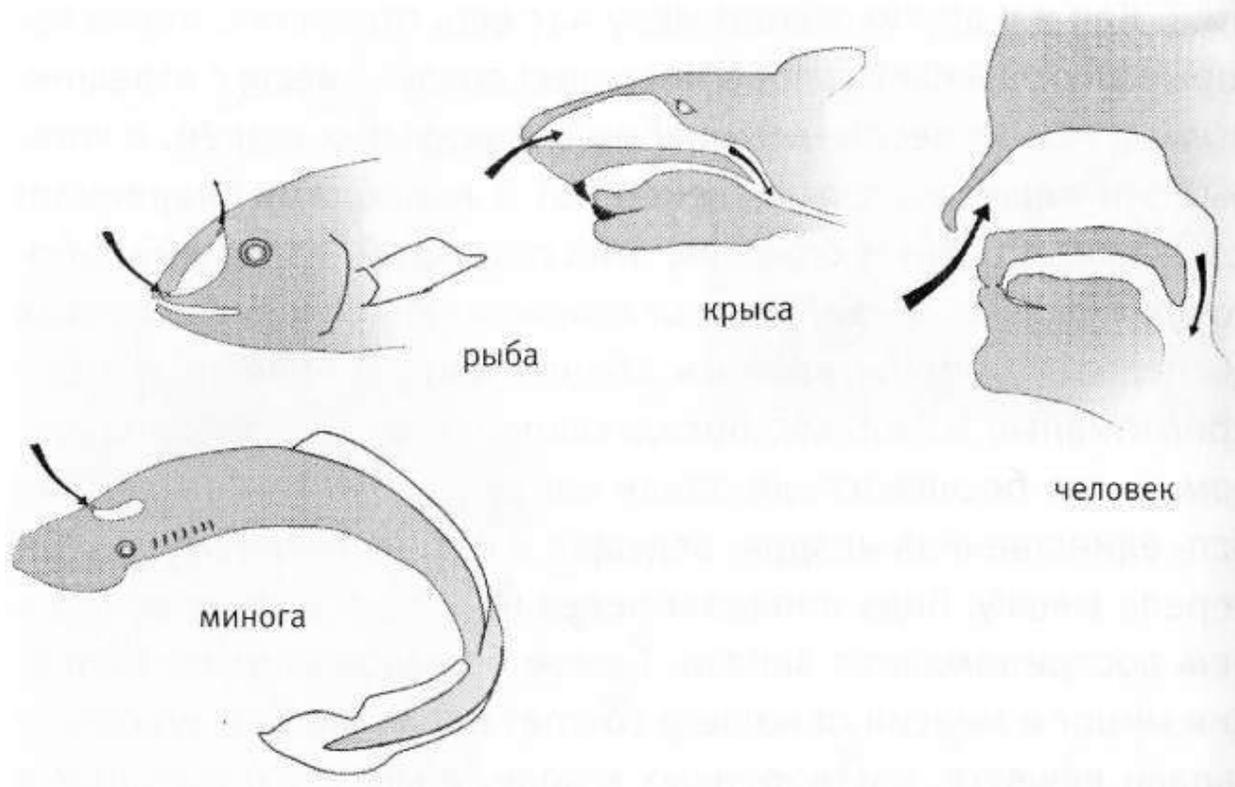


Молекулы пахучих веществ (увеличены во много-много раз) выходят из цветка и парят в воздухе. Попадая в носовую полость человека, эти молекулы соединяются с рецепторами, расположенными в глубине выстилающей эту полость слизи. Когда молекула присоединяется к рецептору, от него в мозг поступает сигнал. То, что мы воспринимаем как один запах, нередко состоит из набора сигналов от многих рецепторов, с которыми связываются разные молекулы. Наш мозг объединяет этот набор сигналов в один определенный запах.

Точно так же и запах может состоять из сигналов от нескольких, часто даже многих рецепторов, работа которых запускается только определенными ключами — молекулами веществ определенного типа. Наш мозг воспринимает набор сигналов, поступающий от этих рецепторов, как один запах.

Органы обоняния находятся у нас внутри черепа, как и у других млекопитающих, а также у рыб, амфибий, рептилий, птиц. Как и у других животных, у нас есть отверстия, через которые внутрь нашей головы поступает воздух вместе с взвешенными в нем веществами, и набор специальных тканей, в которых эти вещества взаимодействуют с нейронами (нервными клетками). Сравним строение этих отверстий, полостей и оболочек у разных организмов от примитивнейших позвоночных до человека, чтобы выявить общие закономерности. Самые примитивные животные, обладающие черепом и позвоночником, — это бесчелюстные, такие как миноги и миксины. У них есть единственная ноздря, ведущая к расположенному внутри черепа мешку. Вода попадает через ноздю в этот мешок, и в нем воспринимаются запахи. Самое большое отличие обоняния миног и миксин от нашего состоит в том, что они чувствуют запахи веществ, растворенных в воде, а мы — взвешенных в воздухе. У тех рыб, с которыми мы состоим в особенно близком родстве, например двоякодышащих или тиктаалика, органы обоняния еще больше похожи на наши: вода попадает внутрь черепа через ноздри и в итоге достигает полости, соединенной с полостью рта. У этих рыб две пары ноздрей — наружная и внутренняя. В этом они очень похожи на нас. Попробуйте дышать с закрытым ртом. Воздух будет входить сквозь наружные ноздри, проходить сквозь носовую полость и достигать внутренних ноздрей, через которые он попадает в глубину глотки и оттуда в трахею (дыхательное горло). У тех рыб, от которых мы исходим, тоже были наружные и внутренние ноздри, и неудивительно, что это были именно те рыбы, у которых была также плечевая кость — и ряд других общих с нами признаков.

Наши органы обоняния содержат немало сведений, отражающих наши связи с далекими предками — рыбами, амфибиями, млекопитающими. Большой прорыв в изучении этих связей произошел в 1991 году, когда Линда Бак и Ричард Аксель открыли большое семейство генов, отвечающих за наше обоняние.



Носовые отверстия и движение молекул пахучих веществ в обонятельных органах позвоночных от бесчелюстного (миноги) до человека.

Планируя свои эксперименты, Бак и Аксель исходили из трех важных предположений. Во-первых, у них была правдоподобная гипотеза, основанная на результатах, полученных в других лабораториях, о том, как должны выглядеть гены, на которых записан рецепт обонятельных рецепторов. Эксперименты показали, что структура этих рецепторов включает характерные молекулярные петли, помогающие рецепторам передавать информацию в пределах нервной клетки. Это была важная подсказка, потому что благодаря ей Бак и Аксель могли теперь искать в мышинном геноме все гены, которые позволяют синтезировать такие структуры. Во-вторых, они предположили, что характер действия этих генов должен быть специфическим — они должны работать только в тканях, участвующих в восприятии запахов. Вполне логично: если эти гены отвечают за синтез обонятельных рецепторов, они не должны работать в тканях, где таких рецепторов нет. В-третьих, и это предположение было довольно смелым, Бак и Аксель решили, что должен быть не один такой ген и даже не несколько, что таких генов должно быть очень много. Эта гипотеза была выдвинута из

тех соображений, что разные запахи стимулируются множеством разных веществ, и если каждому типу вещества соответствует один тип рецепторов, за который отвечает один ген, то таких генов должно быть очень и очень много. Однако исходя из данных, которые имелись в распоряжении исследователей на тот момент, эта гипотеза вполне могла оказаться ошибочной.

Но все три предположения вполне подтвердились. Бак и Аксель смогли найти искомые гены, обладающие характерной структурой. Они установили, что все эти гены работали только в тканях, задействованных в обонянии, а именно в обонятельном эпителии носовой полости. И наконец, они нашли огромное число таких генов. Это был полный успех. Затем Бак и Аксель открыли нечто поистине поразительное: целых три процента нашего генома занимают гены, отвечающие за восприятие разных запахов. Каждый из этих генов позволяет синтезировать рецептор, чувствительный к веществам определенного типа. За эти исследования Линда Бак и Ричард Аксель в 2004 году получили Нобелевскую премию по физиологии и медицине.

Успех экспериментов Бак и Акселя вдохновил многих других ученых на поиски генов обонятельных рецепторов у разных видов животных. Оказалось, что такие гены представляют собой настоящую летопись, в которой отражены все основные переходные этапы в истории жизни. Возьмем, к примеру, выход позвоночных из воды на сушу более 365 миллионов лет назад. Как выяснилось, существует два типа генов, ответственных за обоняние: одни специализируются на улавливании пахучих веществ, растворенных в воде, а другие — взвешенных в воздухе. Растворенные в воде молекулы иначе реагируют с обонятельными рецепторами, чем молекулы, летающие по воздуху, поэтому и рецепторы для них нужны разные. Как и следовало ожидать, оказалось, что у рыб на мембранах носовых нейронов сидят рецепторы для воды, а у рептилий и млекопитающих — для воздуха.

Это открытие помогает нам разобраться в устройстве обоняния самых примитивных из живущих в наши дни позвоночных — бесчелюстных, таких как миноги и миксины. Оказывается, у этих существ, в отличие от более продвинутых рыб и млекопитающих, нет генов ни "водных", ни "воздушных" рецепторов. Их обонятельные рецепторы представляют собой нечто среднее. Вывод ясен: эти примитивные позвоночные возникли раньше, чем гены обоняния разделились на два типа.

Изучение бесчелюстных позволяет сделать и еще одно очень

важное наблюдение: генов обоняния у них очень мало. У рыб таких генов больше, а у амфибий и рептилий — еще больше. Число генов обоняния постепенно возрастало в ряду предков млекопитающих и только у них стало по-настоящему огромным. У нас, млекопитающих, таких генов больше тысячи, и значительная часть нашего генетического аппарата посвящена одному лишь обонянию. В целом, по-видимому, чем больше таких генов имеется у животного, тем острее его обоняние и тем выше способность различать запахи. Поэтому вполне закономерно, что у нас этих генов так много: млекопитающие особо специализированы на использовании обоняния. Вспомним, как хорошо идут по следу собаки, безошибочно держа курс на едва уловимый запах.

Но откуда возникли все эти многочисленные новые гены? Не могли же они появиться на пустом месте! Если мы посмотрим на строение этих генов, ответ на это вопрос станет для нас вполне очевидным. Если сравнить гены обоняния млекопитающего с горсткой генов обоняния миноги, мы увидим, что "избыточные" гены млекопитающего все представляют собой как бы вариации на тему: они выглядят как копии, хотя и видоизмененные, генов миноги. Это означает, что огромное число наших генов обоняния возникло в результате многократного удвоения генов, которые были у наших далеких предков — примитивных бесчелюстных позвоночных.

Но из всего, что известно о генах обоняния млекопитающих, следует один парадоксальный вывод. У людей, как и у всех остальных млекопитающих, эти гены занимают около трех процентов генома. Когда генетики рассмотрели структуру этих генов в подробностях, оказалось, что их ждал большой сюрприз: из тысячи имеющихся у нас генов обоняния целых триста стали совершенно нефункциональными в результате мутаций, изменивших их структуру до полной непригодности. У многих других млекопитающих эти гены используются. Почему у нас так много генов обоняния, если среди них так много бесполезных?

Ответить на этот вопрос помогают исследования дельфинов и китов. Хотя они и похожи внешне на рыб, они настоящие млекопитающие, у них есть молочные железы и три косточки в среднем ухе. История их происхождения тоже записана у них в обонятельных генах: в отличие от рыб, они не имеют генов водных рецепторов, а имеют, как и все млекопитающие, гены воздушных рецепторов. В той ДНК, что отвечает за формирование органов обоняния у китов и дельфинов, записана информация об их происхождении от наземных

млекопитающих. Но вот что интересно: дельфины и киты больше не используют свои носовые полости для восприятия запахов. Что же делают у них эти гены? Бывшие ноздри образовали у китов и дельфинов дыхало, которое они используют для дыхания, но не для обоняния. Примечательно то, что при этом произошло с генами обоняния: у китообразных все гены обоняния на месте, но все они нефункциональны.

То же, что случилось с генами обоняния дельфинов и китов, произошло также и со многими генами многих других видов.

Время от времени, из поколения в поколение, в геноме возникают мутации. Если в результате мутации ген теряет функциональность, это нередко приводит к смерти организма. Но что будет, если в результате мутации отключается ген, который ни для чего не нужен? Последствия таких событий описаны множеством математических моделей, но в общих чертах их и так нетрудно предсказать: подобные мутации будут спокойно передаваться из поколения в поколение. По-видимому, именно это и случилось с дельфинами. Гены обоняния им больше не нужны: воспринимать запахи из воздуха им незачем, дыхало служит им только для дыхания. Поэтому мутации, отключавшие эти гены, из поколения в поколение постепенно накапливались. Эти гены стали бесполезны, но остались в ДНК как безмолвные свидетельства эволюции.

Но ведь люди чувствуют запахи, так почему же у нас выключено так много генов обоняния? На этот вопрос ответили Йоав Гилад и его коллеги, сравнив гены разных приматов. Гилад обнаружил, что приматы, у которых развито цветное зрение, обычно имеют больше выключенных генов обоняния. Вывод ясен. Мы, люди, относимся к эволюционной ветви, которая променяла обоняние на зрение. Мы стали полагаться на зрение больше, чем на обоняние, и это отражено в нашем геноме. Нельзя преуспеть во всем одновременно, и когда наши предки стали больше пользоваться зрением, многие из генов обоняния постепенно выключились за ненадобностью.

У нас в носу спрятано много данных — или, точнее, в тех участках ДНК, которые управляют нашим обонянием. Сотни неиспользуемых обонятельных генов достались нам в наследство от наших предков — древних млекопитающих, которым обоняние помогало выжить в большей степени, чем зрение. Мы можем и еще дальше пойти в подобных сравнениях. Подобно ксерокопиям, которые изрядно изменяются после многократного копирования, наши гены обоняния тем меньше похожи на гены обоняния других существ, чем дальше наше с ними родство. Человеческие гены похожи на гены других приматов, не

так похожи на гены других млекопитающих, еще меньше похожи на гены рептилий, амфибий, рыб и так далее. Информация, которые несут наши гены, служит неммым свидетельством нашего прошлого. У нас в носу не просто база данных, а целое древо жизни.

Глава 9. Зрение.

Только однажды за все годы моей научной работы мне довелось найти глаз ископаемого животного. Это произошло не в палеонтологической экспедиции, а в подсобном помещении лавки минералов в небольшом городке на северо-востоке Китая. Мы с моим коллегой Гао Кэцинем изучали самых древних известных ископаемых саламандр — прекрасные образцы из залегающих в Китае пород возрастом около 160 миллионов лет. Мы только что вернулись из небольшой поездки за ископаемыми в знакомый Гао район. Эти места надо было хранить в секрете, потому что местные крестьяне, которые часто находят ископаемых саламандр, продают их за немалые деньги. Образцы из этих мест особенно ценны тем, что во многих случаях от древних животных здесь остались окаменелые отпечатки мягких тканей, из которых состоят жабры, кишечник, хорда. Коллекционеры-частники очень дорожат такими образцами, ведь ископаемые столь хорошей сохранности встречаются чрезвычайно редко. К моменту нашего визита в лавку минералов мы с Гао уже и сами собрали в тех местах немало красивейших ископаемых саламандр.

Хозяину этой лавки достался один из самых лучших когда-либо обнаруженных образцов ископаемой саламандры. Гао хотел, чтобы мы посмотрели на это образец и посвятили часть предстоящего дня попыткам договориться о его приобретении. От нашего посещения этой лавки так и веяло чем-то противозаконным. Гао провел несколько часов, выкуривая с этим господином одну сигарету за другой, бурно жестикулируя и общаясь с ним по-китайски. Было ясно, что они торгуются, но, не зная китайского, я не имел ни малейшего представления, какие взаимные предложения они при этом высказывают. После многократного пожимания рук и, наконец, долгого финального рукопожатия мне разрешили пройти в подсобное помещение и посмотреть на ископаемое, лежавшее на столе торговца. Это было просто потрясающее зрелище: превосходный отпечаток личинки саламандры не больше восьми сантиметров в длину. В этом образце целиком отпечатались все животное, вплоть до раковин крошечных моллюсков, которых оно съело незадолго до смерти. А еще, в первый и последний раз в моей палеонтологической практике, я увидел глаз ископаемого.

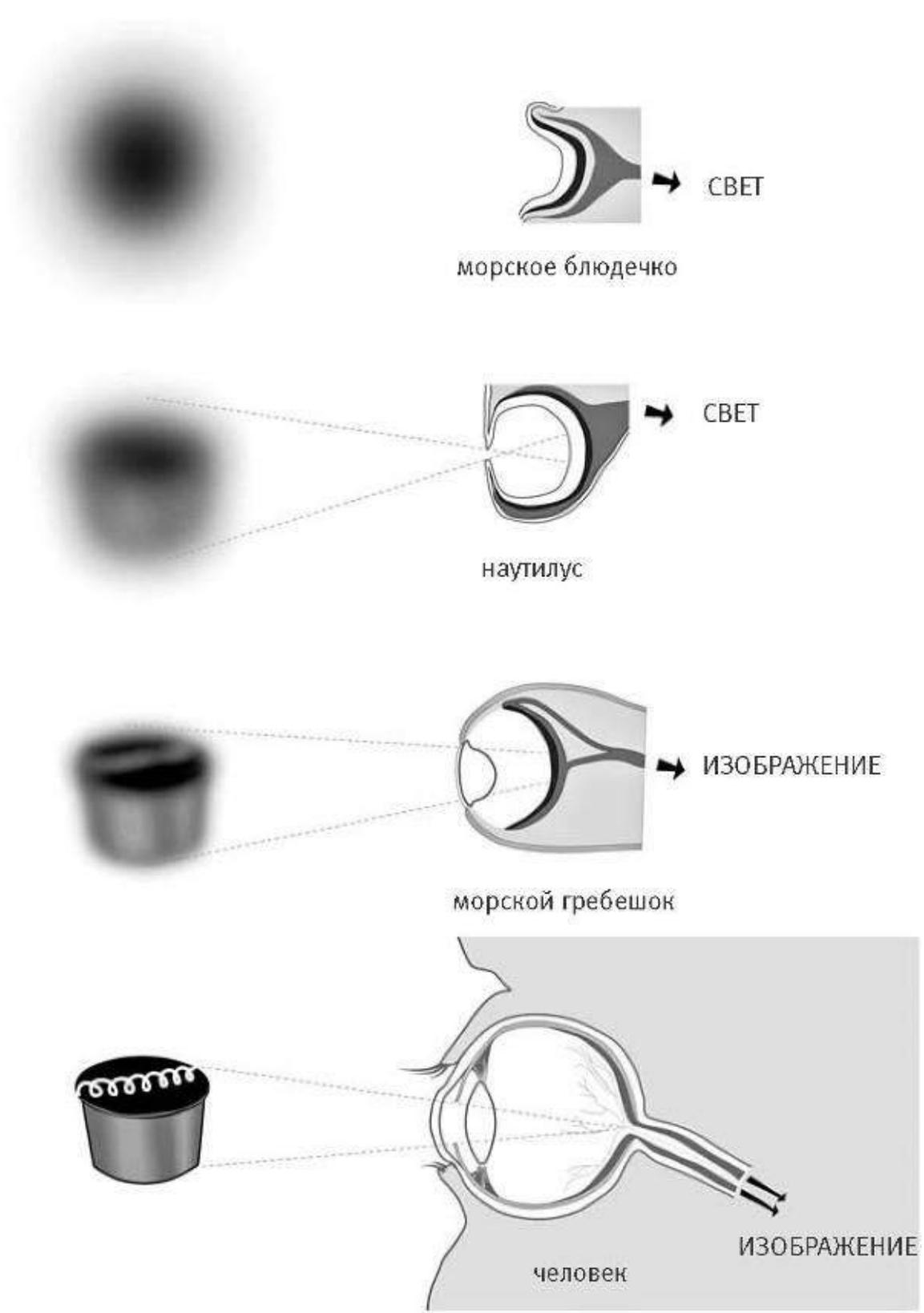
Глаза очень редко сохраняются в ископаемом виде. Как мы уже убедились, наибольшие шансы для успешного захоронения имеют твердые структуры, такие как кости, зубы, чешуи. Если мы хотим разобраться в истории глаз, нам следует привлечь для этого одно важное обстоятельство. Органы и ткани, которыми пользуются животные для улавливания света, на удивление разнообразны: от простых светочувствительных органов многих беспозвоночных до сложных глаз насекомых и наших глаз, похожих на фотоаппарат. Как воспользоваться этим разнообразием, чтобы понять, каким путем развилась наша способность видеть?

История человеческих глаз во многом напоминает историю автомобилей. Возьмем, к примеру, "шевроле-корвет". Мы можем проследить историю этой модели в целом, а можем — историю каждой из ее деталей по отдельности. История "корвета" началась давно: впервые эта модель была выпущена в 1953 году, и ее продолжали выпускать во все последующие годы в постепенно меняющихся вариантах. Есть своя история и у покрышек "корвета", как есть она и у резины, используемой для их изготовления. Все это во многом аналогично истории наших тел и органов. У нашего глаза есть своя история, но есть она и у его составных частей, его клеток и тканей, а также у генов, на основе которых формируются все эти структуры. Если мы разберемся во всех многочисленных пластах истории наших органов, мы поймем, что мы по сути представляем собой сложную мозаику из деталей, которые в том или ином виде есть и у огромного множества других существ на нашей планете.

Обработка зрительных образов происходит в основном у нас в мозгу. Роль глаз ограничивается тем, чтобы улавливать свет и передавать информацию о нем в мозг, где эта информация будет обработана. Наши глаза, как и глаза всех позвоночных животных, устроены по принципу фотоаппарата. После того как свет попадает в глаз, он фокусируется на своеобразном экране, расположенном в глубине глаза. На пути к этому экрану свет проходит через несколько прозрачных слоев. Сперва он проходит через роговицу — тонкий слой ткани, покрывающей глаз спереди, — и попадает в камеру, заполненную жидкостью — водянистой влагой. Количество света, идущего дальше, регулируется радужной оболочкой. В ней расположено отверстие — зрачок, который благодаря произвольным сокращениям миниатюрных мышц может расширяться и сужаться подобно диафрагме фотоаппарата. Затем свет проходит сквозь хрусталик, который, как линза в объективе

фотоаппарата, предназначен для фокусировки изображения. Хрусталик тоже окружают миниатюрные мышцы, которые, сокращаясь, меняют его форму и позволяют фокусировать свет, идущий как от далеких, так и от близких объектов, то есть наводить на резкость. Хрусталик здорового человека прозрачен и состоит из особых белков, определяющих наряду с формой поверхности его оптические свойства. Эти белки, которые называют кристаллинами, существуют необычайно долго, благодаря чему хрусталик может успешно функционировать в течение всей нашей жизни. После хрусталика свет проходит через прозрачное стекловидное тело и попадает на расположенный в глубине экран. Этот экран (сетчатка), на который проецируются изображения видимых нами объектов, набит кровеносными сосудами и светочувствительными клетками. Эти клетки и посылают в наш мозг сигналы, которые мозг интерпретирует как элементы зрительных образов. Светочувствительных клеток у нас два типа. Клетки первого типа (палочки) более чувствительны к свету, клетки второго (колбочки) — менее. Более чувствительные клетки воспринимают свет только в черно-белом виде, а менее чувствительные способны воспринимать цвета. По соотношению палочек и колбочек в сетчатке животного можно определить, к ночному или к дневному образу жизни оно приспособлено. Светочувствительные клетки сетчатки составляют у человека около 70% всех чувствительных клеток тела — яркое свидетельство того, какую важную роль играет в нашей жизни зрение.

Глаза того же типа, что наши, похожие на фотоаппарат, характерны для всех животных, наделенных позвоночником и черепом, от миног до млекопитающих. У животных из других групп мы находим глаза разного типа — от простых скоплений светочувствительных клеток до сложных глаз, собранных из множества линз, таких как глаза мухи, и до примитивных подобий наших собственных глаз. Чтобы разобраться в истории наших органов зрения, нужно прежде всего разобраться в родственных отношениях структур, из которых состоят наши глаза, и структур, образующих глаза других типов.



Глаза наводятся на резкость: от примитивных светоулавливающих устройств некоторых беспозвоночных до наших глаз, похожих на

фотоаппарат и наделенных линзой (хрусталиком). Острое зрение выработалось в ходе эволюции постепенно.

Для этого нам нужно прежде всего изучить вещества, улавливающие свет, ткани, которые позволяют нам видеть, и гены, которые отвечают за формирование всего этого.

Молекулы — светоуловители

Самое главное для работы клеток-светоуловителей — это процессы, происходящие в молекулах определенного вещества, которые, собственно, и улавливают свет. Когда свет попадает на такую молекулу, она меняет форму и распадается на две части. Одна из этих частей представляет собой производное витамина А, а другая — белок под названием опсин. Когда производное витамина А отпадает от опсина, начинается цепная реакция, передающая сигнал нервной клетке, которая посылает этот сигнал в наш мозг. Для цветного и черно-белого зрения мы используем разные опсины. Подобно тому как струйный принтер печатает разноцветные изображения за счет трех или четырех чернил разного цвета, наше цветное зрение обеспечивается тремя типами светоулавливающих молекул, ответственных за разные цвета. Для черно-белого зрения служит лишь один тип молекул опсина.

Когда на эти молекулы попадает свет, они меняют форму, а затем через некоторое время возвращаются в первоначальное состояние, как бы перезаряжаются. Этот процесс может занимать несколько минут. Все мы ощущали это на собственном опыте: если войти в темную комнату после долгого пребывания на свету, нам будет почти ничего не видно. Причина этого в том, что молекулы-светоуловители требуют некоторого времени для перезарядки. Через несколько минут глаза привыкают к темноте, и мы снова можем видеть.

Несмотря на огромное разнообразие светочувствительных органов, у всех животных для восприятия света служат такие же молекулы-светоуловители. И у людей, и у насекомых, и у двустворчатых моллюсков (например, морских гребешков) для этой цели служат опсины. Мы можем не только проследить историю наших глаз, сравнивая структуру опсинов разных организмов, но и располагаем убедительными свидетельствами того, что за эти вещества мы должны быть благодарны прежде всего бактериям.

По сути опсин представляет собой вещество, передающее информацию, приходящую извне, внутрь клетки. Чтобы выполнять этот трюк, молекула опсина должна передать определенное химическое вещество сквозь окружающую клетку мембрану. Для этого в молекуле опсина имеется своеобразный проводник — изгибающаяся и образующая петли часть, проходящая сквозь мембрану внутрь клетки и

наружу. Но извилистый путь этой структуры рецепторной молекулы имеет не случайный, а вполне определенный, специфический характер. Где еще встречаются такие извилистые пути? Они полностью соответствуют фрагментам некоторых молекул бактерий. Поразительное сходство частей этих сложных молекул свидетельствует о том, что этот признак возник очень давно, в те времена, когда на Земле жили бактерии, от которых приходим и мы, и некоторые современные бактерии. Можно сказать, что внутри нашей сетчатки заключены видоизмененные частички древних бактерий, помогающие нам видеть.

Мы можем проследить ход многих важнейших событий в истории наших глаз, изучая опсины разных животных. Возьмем одно из ключевых событий в жизни наших предков-приматов — развитие высокоэффективного цветового зрения. Напомню, что у людей и у наших ближайших родственников среди приматов — обезьян Старого Света — цветовое зрение очень хорошо развито и функционирует за счет разных типов светочувствительных клеток (обладающих разными типами молекул-светоуловителей). Клетки каждого типа настроены на восприятие света определенного цвета. У большинства млекопитающих имеются только два типа таких клеток, поэтому они способны различать меньше цветов, чем мы и наши ближайшие родственники. Оказывается, мы можем проследить ход истории нашего цветового зрения, изучая гены, ответственные за синтез чувствительных к цвету веществ. За два типа светочувствительных веществ, имеющих у большинства млекопитающих, отвечают два типа генов. За наши три типа отвечают три типа генов, причем два из них очень похожи на те, что есть у других млекопитающих. По всей видимости, это означает, что наше продвинутое цветовое зрение возникло благодаря тому, что один из генов, общих для нас и других млекопитающих, удвоился, и его дополнительная копия со временем видоизменилась таким образом, что синтезируемое благодаря этому гену вещество стало улавливать свет другого цвета. Как вы помните, нечто похожее происходило и с нашими генами обоняния.

Переход наших предков к более эффективному цветовому зрению может быть связан с изменениями флоры Земли, происходившими много миллионов лет назад. Чтобы разобраться в этом, стоит задуматься, какую пользу могло приносить хорошее цветовое зрение в те времена, когда оно только появилось. Оно могло быть полезно живущим на деревьях обезьянам, потому что позволяло им лучше различать разные типы плодов и листьев и выбирать из них наиболее питательные. Изучая

других приматов, обладающих хорошим цветовым зрением, мы можем оценить время возникновения такого зрения. По-видимому, это случилось около 55 миллионов лет назад. В то же самое время, судя по ископаемым растениям, происходили существенные изменения в составе древних лесов. До этого периода в лесах преобладали фикусы и пальмы, плоды которых вкусны и питательны, но окрашены примерно одинаково. В более поздних лесах разнообразие растений было выше, и, по-видимому, плоды у них были уже разного цвета.

Вполне возможно, что хорошее цветное зрение у наших предков возникло благодаря тому, что леса, где они жили, и плоды, которыми они питались, стали более разноцветными. Это довольно правдоподобная гипотеза.

Ткани

Глаза животных бывают двух основных разновидностей: одна свойственна многим беспозвоночным, а другая — позвоночным, таким как рыбы или люди. Главное отличие между ними состоит в том, что в них по-разному увеличивается светоулавливающая поверхность чувствительной ткани глаза. У беспозвоночных, таких как мухи и черви, увеличение этой поверхности достигается за счет многочисленных складок ткани, в то время как у нас она увеличивается за счет того, что на этой ткани образуются многочисленные выросты, похожие на крошечные щетинки. Кроме этих двух отличий между двумя разновидностями глаз есть и множество других. От глаз редко что-нибудь остается в ископаемом виде, поэтому когда-то казалось, что людям никогда не разобраться в истории возникновения этих различий между нашими глазами и глазами беспозвоночных. Но когда в 2001 году Детлев Арендт занялся исследованием глаз одного примитивного беспозвоночного, оказалось, что это не такая уж неразрешимая проблема.

Многощетинковые кольчатые черви (принадлежащие к самым примитивным червям) — довольно примитивные беспозвоночные. Их сегментированное тело устроено относительно просто. Кроме того, у них имеются два типа светочувствительных органов. Кроме глаз у них есть еще расположенные под покровами тела небольшие выросты нервной системы, тоже улавливающие свет. Арендт разобрал этих червей по частям как на клеточном, так и на генетическом уровне. Зная, какова последовательность нуклеотидов в генах, ответственных за синтез опсина, и как устроены светочувствительные нервные клетки, Арендт изучил процесс формирования обоих типов светочувствительных органов многощетинковых червей. Он обнаружил, что у этих организмов имеются обе разновидности светочувствительных структур. "Нормальные" глаза состоят из чувствительных клеток, характерных для многих беспозвоночных, и содержат характерные для беспозвоночных опсины. А дополнительные, расположенные под кожей светочувствительные органы содержат опсины, близкие к опсинам позвоночных, и их клеточное строение тоже напоминает строение глаз позвоночных. У их светочувствительных клеток есть даже небольшие, похожие на щетинки выросты, примитивно устроенные, но

напоминающие светочувствительные выросты наших палочек и колбочек. Арендту удалось найти живое существо, у которого имелись глаза обеих разновидностей, одна из которых (наша собственная) была представлена очень примитивным вариантом. Исследуя примитивных беспозвоночных, мы убеждаемся в том, что у различных типов глаз животных встречаются общие элементы.

Гены

Открытие Арендта подводит нас еще к одному вопросу. Одно дело, что у глаз разных животных есть общие части, но как получилось, что такие непохожие друг на друга глаза, как у червей, мух и мышей, родственны друг другу? Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к генетическому рецепту, определяющему формирование глаз.

В конце XX века Милдред Хоудж, исследуя мутантных плодовых мух (дрозофил), нашла мутацию, которая приводила к тому, что глаза у мухи полностью отсутствовали. Такие мутанты появлялись неоднократно, и Милдред Хоудж удалось вывести целую линию таких мух, которую она назвала *eyeless* (безглазая). Вскоре похожая мутация была обнаружена и у мышей. У некоторых мутантных особей глаза были, но очень маленькие, у других отсутствовали не только глаза, но и целые участки лицевой части головы. Похожее врожденное отклонение у человека называется аниридия, у страдающих ею людей в глазах отсутствует часть структур. У таких разных существ, как мухи, мыши и люди, генетики обнаружили сходные мутации.

Прорыв в исследованиях этих мутаций произошел в начале девяностых годов XX века, когда в разных лабораториях стали применять новейшие молекулярные методы, чтобы разобраться в том, как именно мутации безглазости влияют на развитие глаз. Благодаря этим методам удалось картировать ответственные за такие отклонения гены, то есть найти те отрезки ДНК, где и происходят подобные мутации. Когда последовательность нуклеотидов в этих генах была прочитана, оказалось, что эта последовательность сходна в гене, подверженном мутациям безглазости, и у мух, и у мышей, и у людей. За такие мутации у всех этих существ отвечает один и тот же ген, только представленный разными вариантами.

О чем это нам говорит? Ученым удалось выявить единственный ген, который, если в нем происходит мутация, приводит к появлению организма с неполноценными глазами или лишенного глаз. Это значит, что в своем нормальном виде этот ген служит важным пусковым механизмом, обеспечивающим формирование глаз в процессе развития. Теперь появилась возможность поставить новые эксперименты, чтобы ответить на еще один, новый вопрос. Что произойдет, если мы вмешаемся в работу этого гена и будем включать и выключать его не

там, где следует?

В качестве объекта для таких экспериментов как нельзя лучше подходили мухи. За восьмидесятые годы XX века опыты на мухах-дрозофилах позволили разработать ряд весьма эффективных методов генетических исследований. Эти методы дают возможность, зная определенный ген, то есть последовательность нуклеотидов в ДНК, получить муху, у которой этот ген не работает, или муху, у которой он работает не там, где ему следует работать.

Пользуясь этими методами, Вальтер Геринг стал по-разному играть с геном, ответственным за мутацию *eyeless*. Группа Геринга добилась того, что этот ген можно было заставить работать едва ли не в любой части развивающегося организма мухи: в зачатках усиков, ног, крыльев. Когда Геринг и его коллеги вырастили таких мух, результат оказался потрясающим. У тех мух, у которых ген *eyeless* был включен в зачатках усиков, на месте усиков развивались глаза. У тех, у кого он был включен на каком-нибудь сегменте тела, глаза развивались там. В какой бы части тела ни работал этот ген, везде он вызывал развитие дополнительных глаз. Более того, некоторые из этих лишних глаз оказались даже способны слабо реагировать на свет. Геринг установил, что этот ген действительно служит пусковым механизмом и запускает процесс формирования глаз даже там, где в норме глаза отнюдь не должны развиваться.

Но на этом он не остановился. Он провел новую серию экспериментов, в которой ген одного вида внедряли в организм другого. Для этого брали мышинный ген *Pax 6*, который соответствует гену *eyeless* мухи-дрозофилы, внедряли его в клетки мухи и включали его там. Оказалось, что мышинный ген тоже вызывает формирование дополнительных глаз в организме мухи, причем напоминающих глаза мухи, а вовсе не мыши. В лаборатории Геринга установили, что мышинный ген можно заставить запустить механизм образования дополнительных мышинных глаз в любой части тела мухи — на спине, на крыльях, около рта. Оказалось, что гены, служащие у мышей и у мух пусковым механизмом для образования глаз, не только очень похожи друг на друга, но и взаимозаменяемы. Мышинный ген *Pax 6*, внедренный в организм мухи, запускал в нем последовательность изменений, приводивших к развитию у мухи дополнительных глаз.

Теперь мы знаем, что ген типа *eyeless* (или *Pax 6*) управляет развитием глаз у всех живых существ, наделенных глазами. Глаза у них могут быть устроены по-разному, например, обладать хрусталиком или

не обладать им, быть простыми или сложными, но генетический переключатель, запускающий их развитие, у всех по сути один и тот же.

Глядя в глаза, забудьте о романтике, чуде творения и зеркале души. Если взглядеться в молекулы, ткани и гены, происходящие от микробов, медуз, червей и мух, в глазах можно разглядеть целый зверинец.

Глава 10. Уши.

Того, кто заглянет поглубже в ухо, чтобы увидеть, как устроен наш орган слуха, ждет разочарование. Самые интересные структуры этого аппарата скрыты глубоко внутри черепа, за костяной стенкой. Добраться до этих структур можно только вскрыв череп, удалив мозг, а затем еще и взломав саму костяную стенку. Если вам повезет или если вы мастерски умеете это делать, то вашим глазам предстанет удивительная структура — внутреннее ухо. На первый взгляд оно напоминает маленькую улитку вроде тех, что можно найти в пруду.

Выглядит она, быть может, неброско, но при ближайшем рассмотрении оказывается сложнейшим устройством, напоминающим самые хитроумные изобретения человека. Когда до нас долетают звуки, они попадают в воронку ушной раковины (которую мы обычно и называем ухом). По наружному слуховому проходу они достигают барабанной перепонки и вызывают ее колебания. Барабанная перепонка соединена с тремя миниатюрными косточками, которые колеблются вслед за ней. Одна из этих косточек соединяется чем-то вроде поршня со структурой, похожей на улитку. Сотрясение барабанной перепонки заставляет этот поршень ходить взад-вперед. В результате внутри улитки взад-вперед движется особое желеобразное вещество. Движения этого вещества воспринимаются нервными клетками, которые посылают в мозг сигналы, а мозг интерпретирует эти сигналы как звук. Когда вы в следующий раз будете слушать музыку, только представьте себе всю свистопляску, которая при этом происходит у вас в голове.

Во всей этой системе выделяют три части: наружное, среднее и внутреннее ухо. Наружное ухо — это та часть органа слуха, которая видна снаружи. Среднее ухо — это три миниатюрные косточки. Наконец, внутреннее ухо состоит из чувствительных нервных клеток, желеобразного вещества и тканей, которые их окружают. Рассмотрев по отдельности эти три компонента, мы можем разобраться в наших органах слуха, их происхождении и развитии.



Наше ухо состоит из трех частей: наружного, среднего и внутреннего уха. Самая древняя из них — внутреннее ухо. Оно управляет нервными импульсами, посылаемыми от уха в мозг.

Ушная раковина, которую мы обычно и называем ухом, досталась нашим предкам в ходе эволюции сравнительно недавно. В этом можно убедиться, посетив зоопарк или аквариум. У кого из акул, костных рыб, амфибий и рептилий есть ушные раковины? Эта структура свойственна только млекопитающим. У некоторых амфибий и рептилий наружное ухо хорошо заметно, но ушной раковины у них нет, а наружное ухо обычно выглядит как перепонка вроде той, что натянута на барабане.

Тонкая и глубокая связь, существующая между нами и рыбами (как хрящевыми, акулами и скатами, так и костными) откроется нам лишь тогда, когда мы рассмотрим структуры, расположенные в глубине ушей. На первый взгляд это может показаться странным — искать связи между людьми и акулами в ушах, особенно если иметь в виду, что у акул их нет. Но они там есть, и мы их найдем. Давайте начнем со слуховых косточек.

Среднее ухо — три слуховые косточки

Млекопитающие — существа особенные. Волосяной покров и молочные железы отличают нас, млекопитающих, от всех других живых организмов. Но многие, пожалуй, удивятся, если узнают, что структуры, расположенные в глубине уха, тоже относятся к важным отличительным признакам млекопитающих. Таких косточек, как в нашем среднем ухе, нет ни у одного другого животного: у млекопитающих этих косточек три, в то время как у амфибий и рептилий всего одна. А у рыб этих косточек вовсе нет. Как же тогда возникли косточки нашего среднего уха?

Немного анатомии: напомним, что эти три косточки называются молоточек, наковальня и стремечко. Как уже было сказано, они развиваются из жаберных дуг: молоточек и наковальня — из первой дуги, а стремечко — из второй. Вот с этого и начнется наш рассказ.

В 1837 году немецкий анатом Карл Рейхерт изучал эмбрионы млекопитающих и рептилий, чтобы разобраться в том, как формируется череп. Он прослеживал пути развития структур жаберных дуг разных видов, чтобы понять, где они оказываются в итоге в черепах разных животных. Результатом продолжительных исследований стал очень странный вывод: две из трех слуховых косточек млекопитающих соответствуют фрагментам нижней челюсти рептилий. Рейхерт не верил своим глазам! Описывая это открытие в своей монографии, он не скрывал своего удивления и восторга. Когда он доходит до сравнения слуховых косточек и костей челюсти, обычный суховатый стиль анатомических описаний XIX века уступает место стилю куда более эмоциональному, показывающему, как поразило Рейхерта это открытие. Из полученных им результатов следовал неизбежный вывод: та же жаберная дуга, которая у рептилий формирует часть челюсти, у млекопитающих формирует слуховые косточки. Рейхерт выдвинул тезис, в который он сам с трудом верил, что структуры среднего уха млекопитающих соответствуют структурам челюсти рептилий. Ситуация будет выглядеть сложнее, если мы вспомним, что Рейхерт пришел к этому выводу на двадцать с лишним лет раньше, чем прозвучало положение Дарвина о едином генеалогическом древе всего живого (это случилось в 1859 году). Какой смысл в утверждении, что разные структуры у двух разных групп животных "соответствуют" друг

другу, без представления об эволюции?

Намного позже, в 1910 и 1912 годах, другой немецкий анатом, Эрнст Гаупп, продолжил дело Рейхерта и опубликовал результаты своих исчерпывающих исследований по эмбриологии органов слуха млекопитающих. Гаупп представил больше деталей, а кроме того, учитывая, в какое время он работал, смог интерпретировать открытие Рейхерта в рамках представлений об эволюции. Вот к каким выводам он пришел: три косточки среднего уха демонстрируют связь между рептилиями и млекопитающими. Единственная косточка среднего уха рептилий соответствует стремянке млекопитающих — и то и другое развивается из второй жаберной дуги. Но по-настоящему ошеломляющее открытие состояло не в этом, а в том, что две другие косточки среднего уха млекопитающих — молоточек и наковальня — развились из косточек, расположенных в задней части челюсти у рептилий. Если это действительно так, то ископаемые остатки должны показывать, как косточки перешли из челюсти в среднее ухо в процессе возникновения млекопитающих. Но Гаупп, к сожалению, изучал лишь современных животных и не был готов вполне оценить роль, которую могли сыграть ископаемые в его теории.

Начиная с сороковых годов XIX века в Южной Африке и России стали добывать ископаемые остатки животных неизвестной ранее группы. Было обнаружено немало находок хорошей сохранности — целые скелеты существ размером с собаку. Вскоре после того, как эти скелеты были обнаружены, многие их образцы упаковали в ящики и послали в Лондон Ричарду Оуэну — на определение и изучение. Оуэн обнаружил, что у этих существ была поразительная смесь признаков разных животных. Одни структуры их скелетов напоминали рептилий. В то же время другие, особенно зубы, были скорее как у млекопитающих. Причем это были не какие-то единичные находки. Во многих местонахождениях эти похожие на млекопитающих рептилии были самыми многочисленными ископаемыми. Они были не только многочисленны, но и довольно разнообразны. Уже после исследований Оуэна такие рептилии были обнаружены и в других районах Земли, в нескольких слоях горных пород, соответствующих разным периодам земной истории. Эти находки образовали прекрасный переходный ряд, ведущий от рептилий к млекопитающим.

До 1913 года эмбриологи и палеонтологи работали в изоляции друг от друга. Но этот год был знаменателен тем, что американский палеонтолог Уильям Кинг Грегори, сотрудник Американского музея

естественной истории в Нью-Йорке, обратил внимание на связь между эмбрионами, которыми занимался Гаупп, и обнаруженными в Африке ископаемыми. У самой "рептильной" из всех похожих на млекопитающих рептилий в среднем ухе была всего одна косточка, а ее челюсть, как и у других рептилий, состояла из нескольких косточек. Но, изучая ряд рептилий, все более близких к млекопитающим, Грегори обнаружил нечто весьма примечательное — то, что глубоко поразило бы Рейхерта, будь он жив: последовательный ряд форм, однозначно свидетельствующий о том, что кости задней части челюсти у похожих на млекопитающих рептилий постепенно уменьшались и смещались, пока, наконец, у их потомков, млекопитающих, не заняли свое место в среднем ухе. Молоточек и наковальня действительно развились из костей челюсти! То, что Рейхерт обнаружил у эмбрионов, давным-давно покоилось в земле в ископаемом виде, дожидаясь своего первооткрывателя.

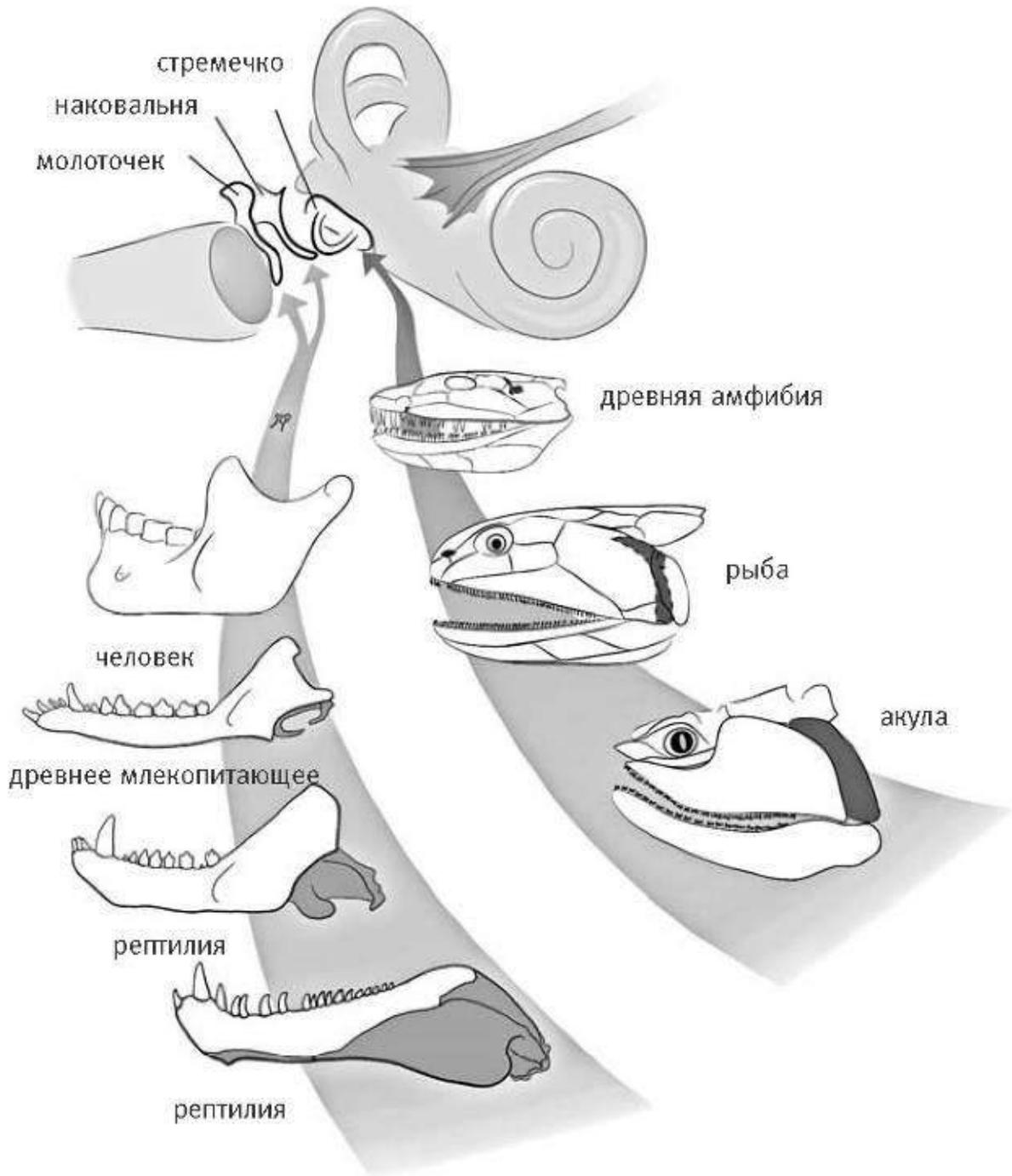
Зачем же млекопитающим понадобилось иметь три косточки в среднем ухе? Система этих трех косточек позволяет нам слышать звуки более высокой частоты, чем способны слышать те животные, у которых косточка в среднем ухе всего одна. Возникновение млекопитающих было сопряжено с развитием не только прикуса, о чем мы говорили в четвертой главе, но и более острого слуха. Причем улучшить слух млекопитающим помогло не появление новых косточек, а приспособление старых к выполнению новых функций. Кости, которые изначально служили для того, чтобы помогать рептилиям кусаться, теперь помогают млекопитающим слышать.

Вот, оказывается, откуда возникли молоточек и наковальня. Но откуда, в свою очередь, появилось стремечко?

Если бы я просто показал вам, как устроены взрослый человек и акула, вы бы ни за что не догадались, что эта крошечная косточка в глубине человеческого уха соответствует большому хрящу в верхней челюсти морской хищницы. Однако, изучая развитие человека и акулы, мы убеждаемся, что это именно так. Стремечко представляет собой видоизмененную скелетную структуру второй жаберной дуги подобно этому акульему хрящу, который называют подвеском, или гиомандибуляре. Но подвесок — не косточка среднего уха, ведь акулы не имеют ушей. У наших водных родственников — хрящевых и костных рыб — эта структура связывает верхнюю челюсть с черепной коробкой. Несмотря на очевидную разницу в строении и функциях стремечка и подвеска, их родство проявляется не только в сходном происхождении,

но и в том, что их обслуживают одни и те же нервы. Основной нерв, ведущий к обеим этим структурам, — это нерв второй дуги, то есть лицевой нерв. Итак, перед нами случай, когда две совершенно разных скелетных структуры имеют сходное происхождение в процессе развития эмбриона и сходную систему иннервации. Как это можно объяснить?

И вновь нам стоит обратиться к ископаемым. Если мы проследим изменения подвеска от хрящевых рыб до таких существ, как тиктаалик, и дальше, до амфибий, мы убедимся, что он постепенно уменьшается и наконец отделяется от верхней челюсти и становится частью органа слуха. При этом изменяется и название этой структуры: когда она большая и поддерживает челюсть, ее называют подвеском, а когда маленькая и участвует в работе уха — стремечком. Переход от подвеска к стремечку совершился, когда рыбы вышли на сушу. Чтобы слышать в воде, нужны совсем другие органы, чем на суше. Небольшие размеры и положение стремечка как нельзя лучше позволяют ему улавливать происходящие в воздухе мелкие вибрации. А возникла эта структура за счет видоизменения устройства верхней челюсти.



Мы можем проследить историю происхождения наших слуховых косточек из скелетных структур первой и второй жаберной дуг. История молоточка и наковальни (слева) показана начиная от древних рептилий, а история стремечка (справа) — начиная от еще более древних хрящевых рыб.

В нашем среднем ухе хранятся следы двух важнейших изменений в

истории жизни на Земле. Возникновение стремечка — его развитие из подвеска верхней челюсти — было вызвано переходом рыб к жизни на суше. В свою очередь, молоточек и наковальня возникли в ходе превращения древних рептилий, у которых эти структуры входили в состав нижней челюсти, в млекопитающих, которым они помогают слышать.

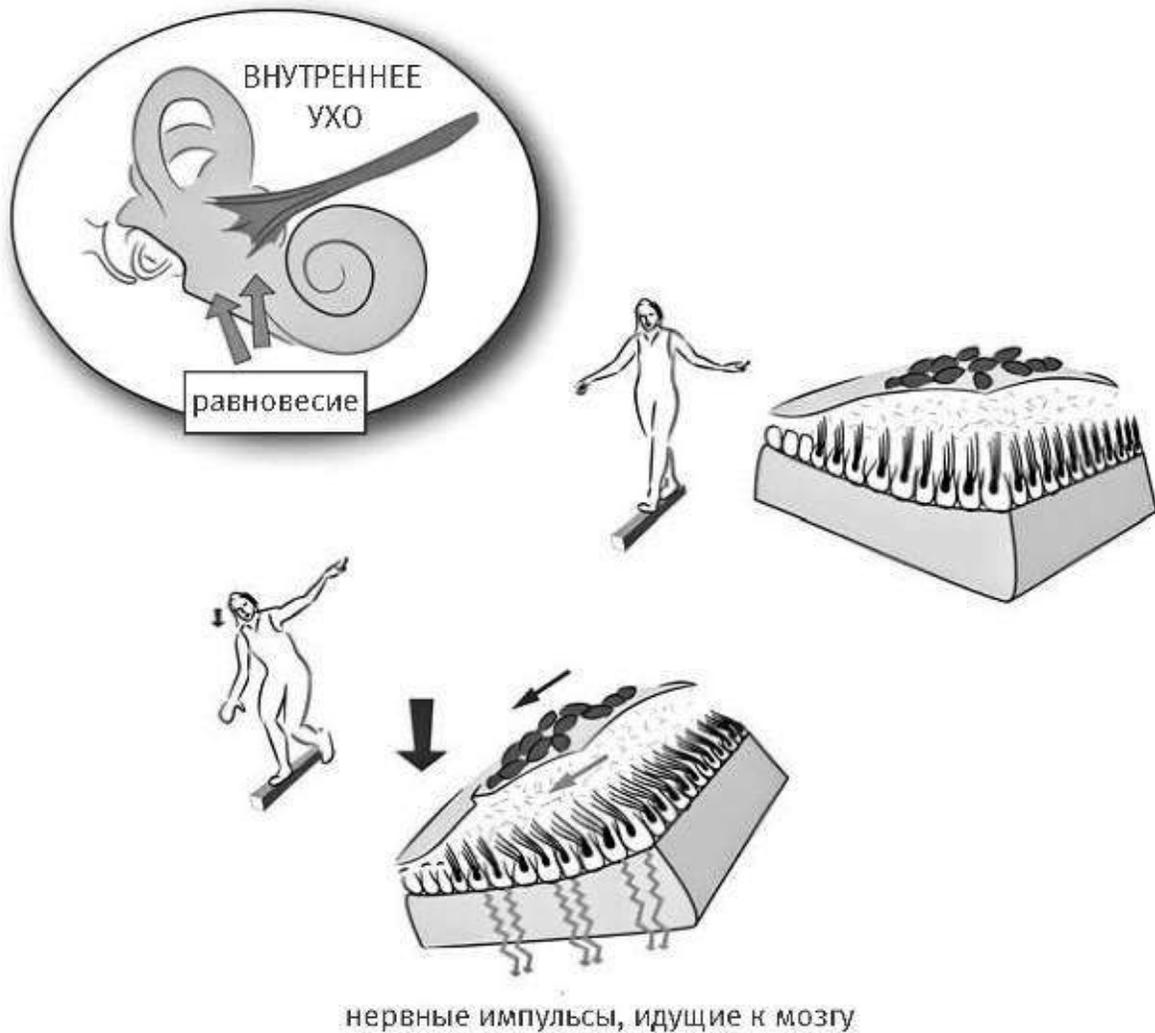
Давайте заглянем в ухо глубже — во внутреннее ухо.

Внутреннее ухо — движение желе и колебание волосков

Представьте себе, что мы заходим в слуховой проход, проходим сквозь барабанную перепонку, мимо трех косточек среднего уха и оказываемся глубоко внутри черепа. Здесь расположено внутреннее ухо — заполненные желеобразным веществом трубки и полости. У людей, как и у других млекопитающих, эта структура напоминает улитку с завитой раковиной. Ее характерный облик сразу бросается в глаза, когда мы препарируем тела на занятиях по анатомии.

Разные части внутреннего уха выполняют разные функции. Одна из них служит для слуха, другая — чтобы говорить нам, как наклонена у нас голова, а третья — чтобы мы чувствовали, как ускоряется или замедляется движение нашей головы. Выполнение всех этих функций осуществляется во внутреннем ухе довольно сходным образом.

Все части внутреннего уха заполнены желеобразным веществом, которое может менять свое положение. Специальные нервные клетки посылают в это вещество свои окончания. Когда это вещество движется, перетекая внутри полостей, волоски на концах нервных клеток наклоняются как от ветра. Когда они наклоняются, нервные клетки посылают в мозг электрические импульсы, и мозг получает информацию о звуках, а также о положении и ускорении головы.



Каждый раз, когда мы наклоняем голову, во внутреннем ухе с места сдвигаются крошечные камушки, лежащие на оболочке заполненной желеобразным веществом полости. Перетекающее вещество воздействует на нервные окончания внутри этой полости, и нервы посылают в мозг импульсы, говорящие ему, что голова наклонена.

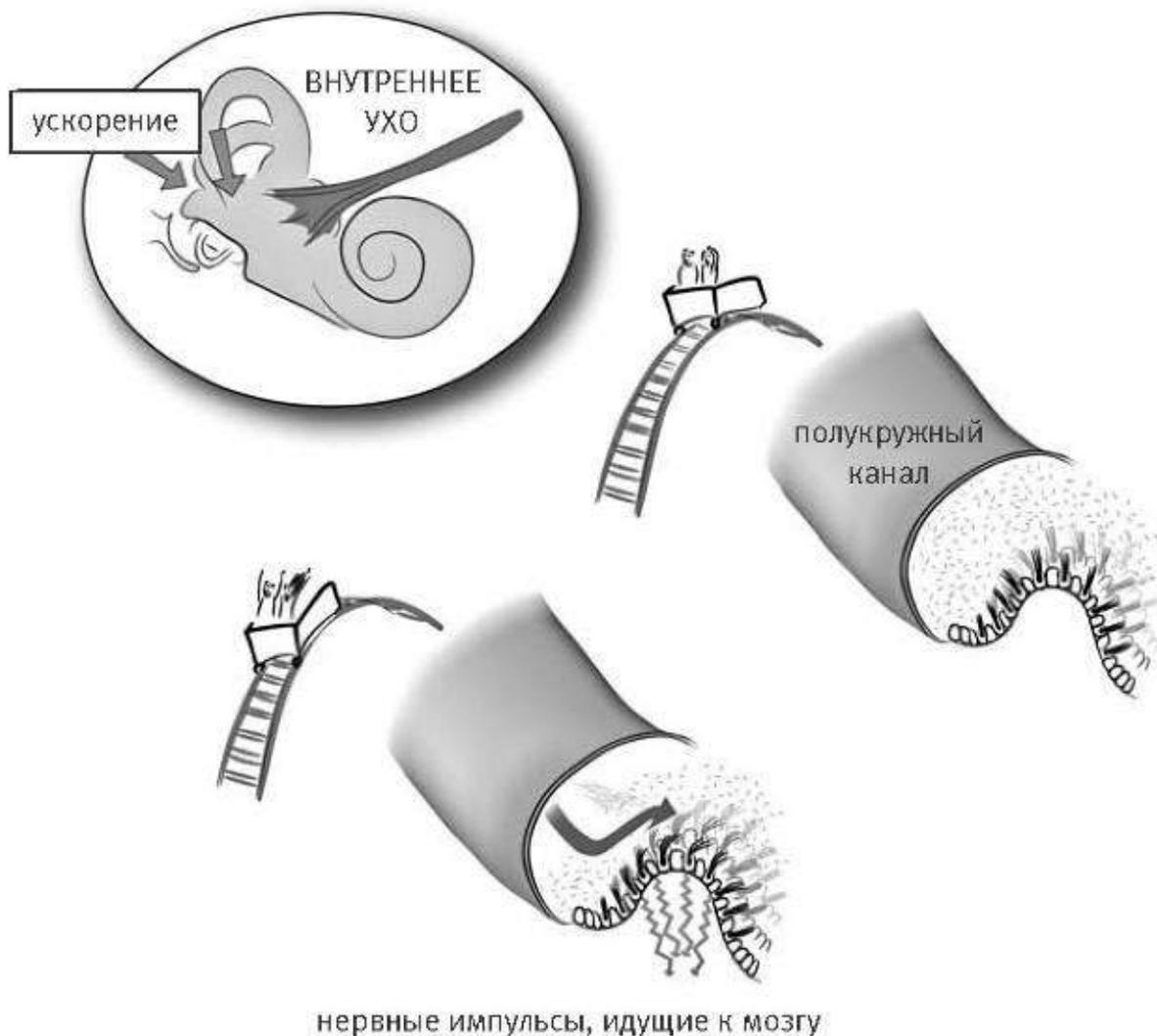
Чтобы понять принцип работы структуры, которая позволяет нам чувствовать положение головы в пространстве, представьте себе рождественскую игрушку — полусферу, заполненную жидкостью, в которой плавают "снежинки". Эта полусфера сделана из пластика, а заполняет ее вязкая жидкость, в которой, если ее встряхнуть, начинается метель из пластиковых снежинок. Теперь представьте себе такую же полусферу, только сделанную не из твердого, а из эластичного вещества. Если резко наклонить ее, жидкость в ней задвигается, а затем "снежинки"

осядут, но не на дно, а на бок. Именно это, только в сильно уменьшенном виде, и происходит у нас во внутреннем ухе, когда мы наклоняем голову. Во внутреннем ухе имеется полость с желеобразным веществом, внутрь которой выходят нервные окончания. Перетекание этого вещества и позволяет нам чувствовать, в каком положении находится наша голова: когда голова наклоняется, вещество перетекает в соответствующую сторону, и в мозг посылаются импульсы.

Дополнительную чувствительность этой системе придают лежащие на эластичной оболочке полости крошечные камушки. Когда мы наклоняем голову, перекатывающиеся в жидкой среде камушки давят на оболочку и усиливают движение заключенного в эту оболочку желеобразного вещества. За счет этого вся система становится еще более чувствительной и позволяет нам воспринимать даже небольшие изменения положения головы. Стоит нам едва наклонить голову, как внутри черепа уже перекатываются крошечные камушки.

Можно себе представить, как непросто жить в космосе. Наши органы чувств настроены на работу при постоянном действии земного тяготения, а не на околоземной орбите, где притяжение Земли компенсируется движением космического аппарата и совершенно не чувствуется. Неподготовленному человеку в таких условиях становится плохо, потому что глаза не позволяют понять, где верх и где низ, а чувствительные структуры внутреннего уха оказываются совершенно сбиты толку. Именно поэтому космическая болезнь — серьезная проблема для тех, кто работает на орбитальных аппаратах.

Ускорение мы воспринимаем за счет еще одной структуры внутреннего уха, связанной с остальными двумя. Она состоит из трех полукруглых трубочек, тоже заполненных желеобразным веществом. Всякий раз, когда мы ускоряемся или тормозим, вещество внутри этих трубочек смещается, наклоняя нервные окончания и вызывая импульсы, идущие в мозг.



Всякий раз, когда мы ускоряемся или замедляемся, это вызывает перетекание желеобразного вещества в полукруглых трубочках внутреннего уха. Движения этого вещества вызывают нервные импульсы, посылаемые в мозг.

Вся система восприятия положения и ускорения тела связана у нас с глазными мышцами. Движение глаза управляется шестью небольшими мышцами, прикрепленными к стенкам глазного яблока. Их сокращение позволяет двигать глазами вверх, вниз, влево и вправо. Мы можем произвольно двигать глазами, определенным образом сокращая эти мышцы, когда хотим посмотреть в какую-нибудь сторону, но самое необычное их свойство — это способность к непроизвольной работе. Они все время управляют нашими глазами, даже когда мы совершенно об этом не думаем.

Чтобы оценить чувствительность связи этих мышц с глазами, подвигайте головой в ту и в другую сторону, не отрывая взгляда от этой страницы. Двигая головой, смотрите пристально в одну и ту же точку.

Что при этом происходит? Голова движется, а положение глаз остается почти неизменным. Такие движения для нас так привычны, что мы воспринимаем их как что-то простое, само собой разумеющееся, но в действительности они необычайно сложны. Каждая из шести мышц, управляющих каждым глазом, чутко отвечает на любые движения головы. Расположенные внутри головы чувствительные структуры, о которых речь пойдет ниже, непрерывно регистрируют направление и скорость ее движений. От этих структур идут сигналы в мозг, который в ответ на них посылает другие сигналы, вызывающие сокращения глазных мышц. вспомните об этом, когда в следующий раз будете пристально смотреть на что-нибудь, двигая при этом головой. Эта сложная система иногда может давать сбой, по которым можно многое сказать о том, какими нарушениями работы организма они вызваны.

Чтобы разобраться в связях между глазами и внутренним ухом, проще всего вызывать разные нарушения работы этих связей и смотреть, какой эффект они произведут. Один из самых распространенных способов вызывать такие нарушения — чрезмерное потребление алкоголя. Когда мы выпиваем много этилового спирта, мы говорим и делаем глупости, потому что спирт ослабляет работу наших внутренних ограничителей. А если мы выпиваем не просто много, а очень много, у нас к тому же начинает кружиться голова. Такое головокружение часто предвещает тяжелое утро — нас ждет похмелье, симптомами которого будут новые головокружения, тошнота и головная боль.

Когда мы выпиваем лишнего, в крови у нас оказывается много этилового спирта, но в вещество, заполняющее полости и трубки внутреннего уха, спирт попадает не сразу. Лишь некоторое время спустя он просачивается из кровотока в разные органы и оказывается в том числе в желеобразном веществе внутреннего уха. Алкоголь легче, чем это вещество, поэтому результат оказывается примерно таким же, как если налить немного спирта в стакан с оливковым маслом. В масле при этом образуются беспорядочные завихрения, и то же происходит у нас во внутреннем ухе. Эти беспорядочные завихрения вызывают хаос в организме невоздержанного человека. Волоски на концах чувствительных клеток колеблются, и мозгу кажется, что тело находится в движении. Но оно не движется — оно покоится на полу или на стойке бара. Мозг оказывается обманут.

Зрение тоже не остается в стороне. Мозгу кажется, что тело вращается, и он посылает соответствующие сигналы глазным мышцам. Глаза начинают съезжать в одну сторону (обычно вправо), когда мы пытаемся удержать их на чем-нибудь, двигая головой. Если открыть глаз мертвеца пьяного человека, можно увидеть характерные подергивания, так называемый нистагм. Этот симптом хорошо знаком полицейским, которые нередко проверяют на него водителей, остановленных за неаккуратное вождение.

При тяжелом похмелье происходит несколько иное. На следующий день после попойки печень уже удалила алкоголь из крови. Она делает это на удивление быстро и даже слишком быстро, потому что в полостях и трубочках внутреннего уха алкоголь еще остается. Он постепенно просачивается из внутреннего уха обратно в кровоток и при этом снова взбаламучивает желеобразное вещество. Если взять на следующее утро того же вусмерть напившегося человека, глаза которого вечером произвольно дергались, и осмотреть его во время похмелья, может оказаться, что глаза у него снова дергаются, только в другом направлении.

Всем этим мы обязаны нашим далеким предкам — рыбам. Если вы когда-нибудь ловили форель, вы наверняка сталкивались с работой органа, от которого, по-видимому, и происходит наше внутреннее ухо. Рыбакам хорошо известно, что форель держится лишь в определенных участках русла — обычно там, где она может особенно успешно добывать себе пищу, при этом избегая хищников. Часто это затененные участки, где течение образует водовороты. Крупная рыба особенно охотно скрывается за большими камнями или поваленными стволами. У форели, как и у всех рыб, есть механизм, позволяющий чувствовать скорость и направление движения окружающей воды, во многом похожий на механизм работы наших органов осязания.

В коже и костях рыб располагаются небольшие чувствительные структуры, идущие рядами вдоль тела от головы до хвоста, — так называемый орган боковой линии. Эти структуры образуют небольшие пучки, из которых выходят миниатюрные волосовидные выросты. Выросты каждого пучка выступают в заполненную желеобразным веществом полость. Вспомним еще раз рождественскую игрушку — полусферу, заполненную вязкой жидкостью. Полости органа боковой линии тоже напоминают такую игрушку, только снабженную смотрящими внутрь чувствительными волосками. Когда вода обтекает тело рыбы, она давит на стенки этих полостей, заставляя наполняющее

их вещество двигаться и наклоняя волосовидные выросты нервных клеток. Эти клетки, подобно чувствительным клеткам нашего внутреннего уха, посылают в мозг импульсы, которые дают рыбе возможность чувствовать, как движется окружающая ее вода. Чувствовать направление движения воды могут и акулы, и костные рыбы, а некоторые акулы ощущают даже небольшие завихрения в окружающей воде, вызываемые, например, другими рыбами, проплывающими мимо. Мы пользовались системой, очень похожей на эту, когда пристально смотрели в одну точку, двигая головой, и видели нарушения ее работы, когда открывали глаза в стельку пьяному человеку. Если бы наши общие с акулами и форелями предки использовали в органах боковой линии какое-нибудь другое желеобразное вещество, в котором не возникали бы завихрения при добавлении алкоголя, у нас никогда не кружилась бы голова от употребления спиртных напитков.

Вполне вероятно, что наше внутреннее ухо и рыбий орган боковой линии представляют собой варианты одной и той же структуры. Оба эти органа формируются в ходе развития из одной и той же эмбриональной ткани и очень похожи по внутреннему строению. Но что возникло раньше, боковая линия или внутреннее ухо? На этот счет у нас нет однозначных данных. Если посмотреть на некоторых древнейших обладавших головой ископаемых, которые жили около 500 миллионов лет назад, мы увидим в их плотных защитных покровах небольшие ямки, которые заставляют нас предположить, что у них уже был орган боковой линии. К сожалению, мы ничего не знаем о внутреннем ухе этих ископаемых, потому что у нас нет образцов, в которых сохранилась бы эта часть головы. До тех пор пока у нас не появятся новых данных, нам остается альтернатива: либо внутреннее ухо развилось из органа боковой линии, либо, наоборот, боковая линия развилась из внутреннего уха. В любом случае перед нами пример работы принципа, проявления которого мы уже наблюдали в других структурах тела: органы нередко возникают для выполнения одной функции, а затем перестраиваются для выполнения совсем другой — или многих других.

Наше внутреннее ухо разрослось по сравнению с рыбьим. Как и у всех млекопитающих, часть внутреннего уха, отвечающая за слух, у нас очень большая и завитая, как улитка. У более примитивных организмов, таких как амфибии и рептилии, внутреннее ухо устроено проще и не завито в подобие улитки. Очевидно, наши прародители — древние млекопитающие — выработали новый, более эффективный орган слуха,

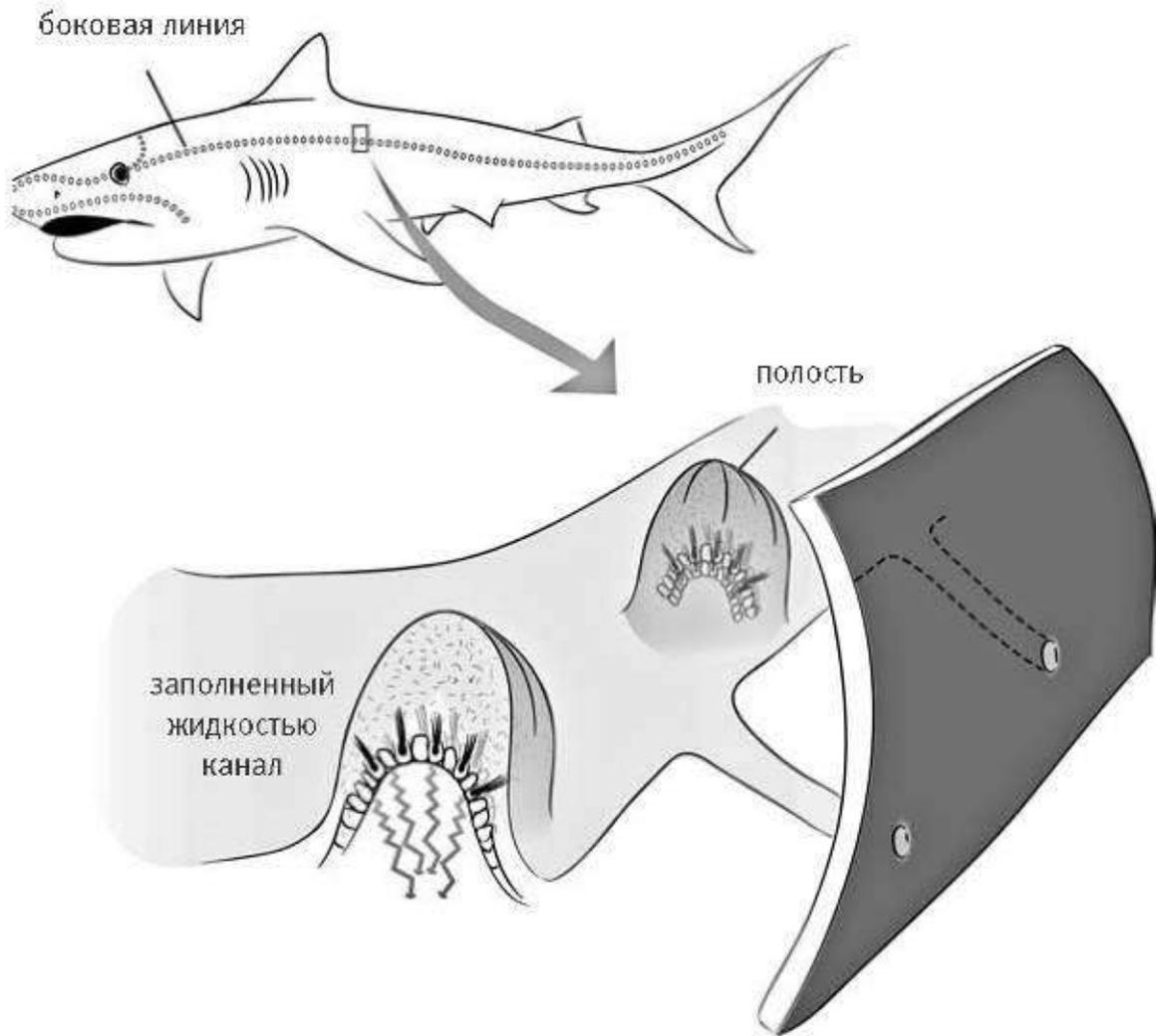
чем был у их предков-рептилий. То же относится к структурам, позволяющим чувствовать ускорение. В нашем внутреннем ухе есть три трубочки (полукружных канала), ответственные за восприятие ускорения. Они расположены в трех плоскостях, лежащих под прямым углом друг к другу, и это позволяет нам чувствовать, как мы движемся в трехмерном пространстве. Древнейшее известное позвоночное, обладавшее такими каналами, похожее на миксину бесчелюстное, имело лишь по одному каналу в каждом ухе. У более поздних организмов таких каналов было уже два. И наконец, у большинства современных рыб, как и у других позвоночных, полукружных каналов три, как у нас.

Как мы убедились, наше внутреннее ухо имеет долгую историю, начавшуюся во времена древнейших позвоночных, еще до появления рыб. Примечательно, что нейроны (нервные клетки), окончания которых погружены в желеобразное вещество в нашем внутреннем ухе, еще древнее, чем само внутреннее ухо.

Эти клетки, так называемые волосковидные, обладают признаками, не свойственными другим нейронам. Похожие на волосы выросты каждой из таких клеток, включающие один длинный "волосок" и несколько коротких, и сами эти клетки и в нашем внутреннем ухе, и в рыбьем органе боковой линии строго ориентированы. В последнее время были предприняты поиски таких клеток у других животных, и их удалось обнаружить не только у организмов, не имеющих таких развитых органов чувств, как у нас, но и у организмов, не имеющих даже головы. Эти клетки есть у ланцетников, с которыми мы познакомились в пятой главе. У них нет ни ушей, ни глаз, ни черепа.

Стало быть, волосковидные клетки появились задолго до того, как возникли наши уши, и первоначально выполняли другие функции.

Разумеется, все это записано в наших генах. Если у человека или мыши происходит мутация, выключающая ген *Pax 2*, полноценное внутреннее ухо не развивается.



Примитивный вариант одной из структур нашего внутреннего уха можно найти под кожей у рыб. Небольшие полости органа боковой линии расположены вдоль всего тела, от головы до хвоста. Изменения потоков окружающей воды деформируют эти полости, и расположенные в них чувствительные клетки посылают в мозг информацию об этих изменениях.

Ген *Rax 2* работает у эмбриона в том районе, где закладываются уши, и, вероятно, запускает цепную реакцию включения и выключения генов, приводящую к образованию нашего внутреннего уха. Если поискать этот ген у более примитивных животных, мы обнаружим, что он работает в голове эмбриона, а также, представьте себе, в зачатках органа боковой линии. За головокружение у пьяных людей и за чувство воды у рыб отвечают одни и те же гены, свидетельствуя о том, что у

этих разных чувств общая история.

Медузы и происхождение глаз и ушей

Подобно ответственному за развитие глаз гену *Pax 6*, который мы уже обсуждали, *Pax 2*, в свою очередь, — один из главных генов, необходимых для развития ушей. Примечательно, что эти два гена довольно похожи. Это говорит о том, что глаза и уши, возможно, происходят от одних и тех же древнейших структур.

Здесь нужно рассказать о кубомедузах. О них хорошо знают те, кто регулярно плавают в море у берегов Австралии, потому что эти медузы обладают необычайно сильным ядом. Они отличаются от большинства медуз тем, что имеют глаза — больше двадцати штук. Большинство из этих глаз — простые ямки, рассеянные в покровах. Но несколько глаз на удивление похожи на наши: в них есть что-то вроде роговицы и даже хрусталика, а также похожая на нашу система иннервации.

У медуз нет ни *Pax 6*, ни *Pax 2* — эти гены возникли позже, чем медузы. Но у кубомедуз мы находим нечто весьма примечательное. Ген, который отвечает у них за формирование глаз, не является ни геном *Pax 6*, ни геном *Pax 2*, но представляет собой как бы мозаичную смесь *обоих этих генов*. Иными словами, этот ген выглядит как примитивный вариант генов *Pax 6* и *Pax 2*, свойственных другим животным.

Важнейшие гены, управляющие развитием наших глаз и ушей, у более примитивных организмов — медуз — соответствуют единственному гену. Вы, быть может, спросите: "Ну и что?" Но это довольно важный вывод. Древняя связь, которую мы обнаружили между генами ушей и глаз, помогает разобраться во многом из того, с чем сталкиваются в своей практике современные врачи: многие из врожденных человеческих дефектов сказываются *на обоих этих органах* — и на глазах, и на ушах. И все это отражает нашу глубокую связь с такими существами, как ядовитая морская медуза.

Глава 11 Что все это значит

Внутренний зоопарк

Я впервые приобщился к миру науки в 1980 году еще студентом колледжа, решив подработать волонтером в Американском музее естественной истории в Нью-Йорке. Это была для меня замечательная возможность познакомиться с коллекциями, хранящимися в этом богатейшем музее, но, кроме того, этот опыт запомнился мне посещением проводившихся в музее весьма экстравагантных еженедельных семинаров. Каждую неделю на этих семинарах выступал какой-нибудь специалист, рассказывавший об одной из хорошо известных лишь узкому кругу специалистов областей естественной истории. После его выступления, которое часто не производило большого впечатления, слушатели разбирали его речь по кусочкам. Делалось это со всей беспощадностью. Временами все действо напоминало большой пикник, на котором приглашенный специалист выступал в роли окорока, зажаренного на вертеле. В ходе этих дебатов участники нередко переходили на крик, топали ногами, выражая возмущение, и демонстрировали богатство мимики и жестов, достойное классического немого фильма.

Вот где я очутился! И это происходило в священных залах храма науки, на семинаре, посвященном биологической систематике! Вы, возможно, знаете — это наука о том, какие названия давать живым организмам и как их классифицировать в соответствии со схемой, которую все мы учили в школе на уроках биологии. Сложно представить себе тему, которая имела бы меньшее отношение к повседневной жизни, и тем более сложно представить, как обсуждение этой темы может довести выдающихся ученых до буйства и даже потери достоинства. Глядя на это, сторонний наблюдатель имел бы все основания сказать им: "Идиоты! Займитесь делом!"

Ирония в том, что теперь я понимаю, почему эти люди так кипятились. В то время мне еще сложно было по достоинству оценить это, но они обсуждали одну из важнейших концепций всей биологической науки. На первый взгляд, в ней нет ничего особо важного, но эта концепция лежит в основе того, как мы сравниваем разные организмы — человека и рыбу, рыбу и червя или что угодно одно с чем угодно другим. Эта концепция позволила разработать методы, с помощью которых мы изучаем наши родственные связи, находим

преступников по следам их ДНК, разбираемся в том, как возник вирус СПИДа, отслеживаем расселение вирусов гриппа по планете. Эта концепция, о которой я собираюсь сейчас рассказать, служит логическим основанием для значительной части того, о чем шла речь в этой книге. Если понять суть этой концепции, мы поймем, о чем нам говорят пресловутые рыбы, черви и бактерии, которых мы находим внутри себя.

Все поистине великие идеи о законах природы были сформулированы исходя из простейших первоначальных посылок, с которыми мы сталкиваемся каждый день. Базируясь на простых понятиях, такие идеи находят более широкое применение и объясняют уже по-настоящему значительные явления, такие как движение звезд или работа времени. В духе этих представлений я хотел бы поделиться с вами одним законом природы, с истинностью которого мы все можем согласиться. Этот закон настолько глубок, что многие из нас воспринимают его как нечто совершенно само собой разумеющееся. Но при этом он составляет отправную точку для всего, что мы делаем, занимаясь палеонтологией, биологией развития и генетикой.

Этот биологический "закон всего" состоит в том, что у каждого живого существа на нашей планете были биологические родители.

У каждого знакомого вам человека были родители. Были они и у каждой птицы, каждого тритона, каждой акулы, которых вам доводилось видеть. Новые технологии могут изменить положение дел с помощью клонирования или какого-нибудь другого метода, который еще предстоит изобрести, но пока этот закон природы повсеместно работает. Сформулируем его более четко: каждое живое существо развилось на основе родительской генетической информации. Эта информация определяет само понятие родителя, и, пользуясь этим определением, мы можем разобраться в биологическом механизме наследственности и применять это понятие даже к таким существам, как бактерии, которые размножаются совсем не так, как мы.

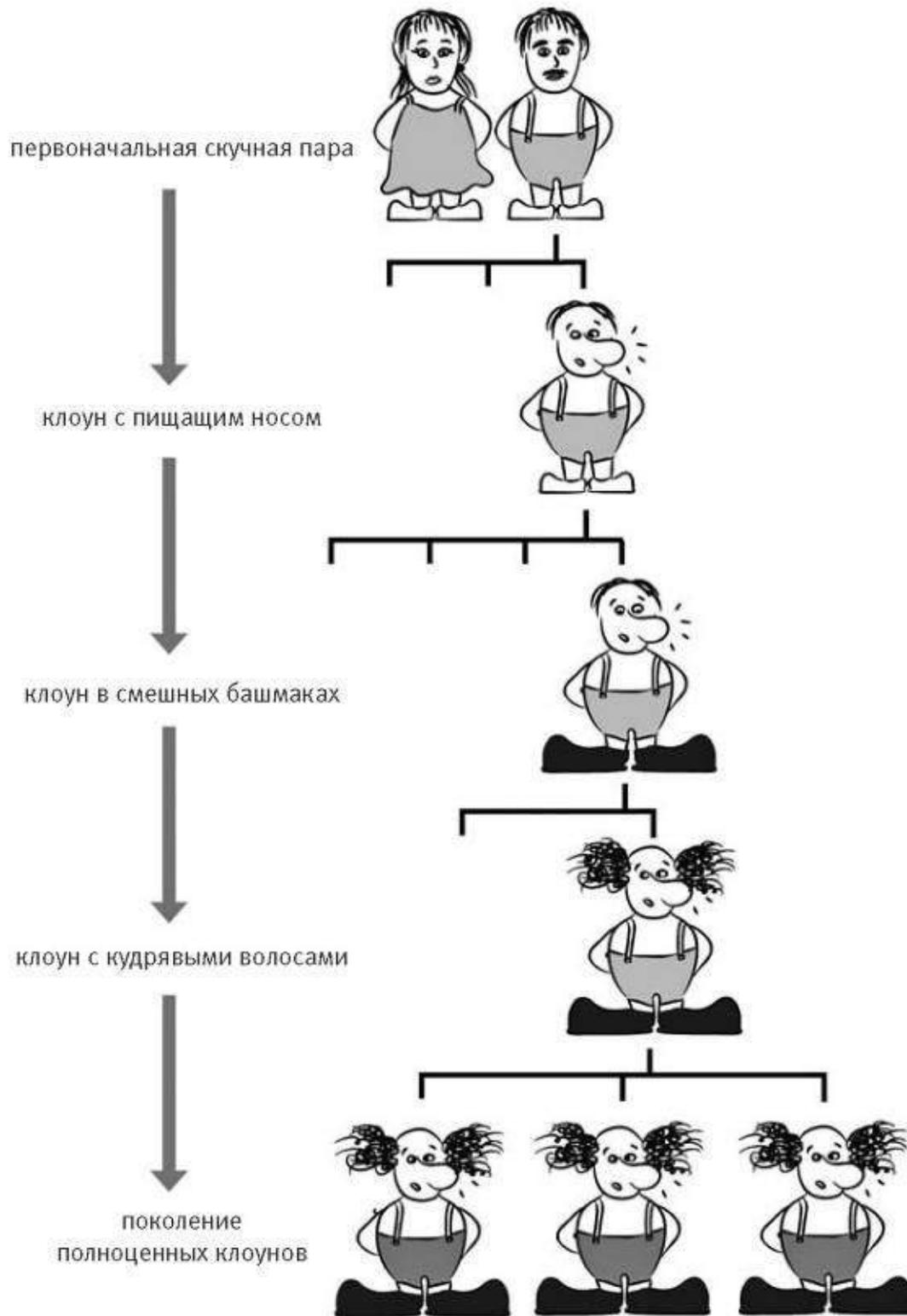
Сила этого закона именно в том, что он находит очень широкое применение. Вот она во всей своей красе: все мы суть модифицированные потомки наших родителей, или их генетической информации. Я потомок своего отца и своей матери, но я отличаюсь от них. Мои родители, в свою очередь, — модифицированные потомки своих родителей. И так далее. Схема происхождения их всех и тех модификаций, которые при этом происходили, определяет генеалогическое древо моей семьи. Причем определяет так однозначно, что восстановить это древо можно даже по небольшим образцам крови

— моей и моих родственников.

Представьте себе, что вы стоите в комнате, заполненной людьми, с которыми вы никогда доселе не встречались. Вам дают простое задание: определить степень вашего родства с каждым из находящихся в этой комнате людей. Как вам разобраться, кто из них ваш дальний родственник, кто очень дальний, а кто ваш семидесятипятиюродный прапрадедушка?

Чтобы решить эту задачу, нам нужен некий биологический механизм, который можно было бы положить в основу наших изысканий и который позволял бы нам проверять гипотезы, касающиеся нашего генеалогического древа. Этот механизм можно вывести из уже знакомого нам закона биологии. Знание того, как именно работает наше происхождение, сопровождаемое модификацией^[2], дает нам ключ к тайнам собственной биологической истории, потому что каждый этап такого происхождения оставляет в нас следы, которые мы можем выявить.

Давайте представим себе гипотетическую скучную супружескую пару, совершенно не похожую на клоунов, и их потомство. Один из их сыновей родился с генетической мутацией, которая дала ему красный резиновый нос, способный издавать громкий писк. Этот сын становится взрослым и осчастлиливает некую женщину, сочетаясь с нею браком. Он передает этот мутантный нос своим сыновьям, и все они рождаются с пищащими резиновыми красными носами. Теперь представим себе, что один из его сыновей наследует новую мутацию, из-за которой у него развиваются огромные шлепающие ступни. В следующем поколении все его сыновья такие же, как он, — с красным пищащим носом и шлепающими ступнями. Перейдем дальше еще на одно поколение.



Родословное древо клоунов.

Представим себе, что один из детей этого поколения, правнук

нашей скучной пары, получает в наследство еще одну мутацию — кудрявые ярко-рыжие волосы. Когда эта мутация переходит в следующее поколение, все его сыновья оказываются с кудрявыми рыжими волосами, шлепающими ступнями и пищащим красным носом. В итоге все эти праправнуки нашей бедной скучной пары оказались настоящими клоунами.

Этот несерьезный пример иллюстрирует одну в высшей степени серьезную идею. В результате происхождения, сопровождаемого модификацией, образуются генеалогические деревья, ветви которых мы можем определять по их признакам. Эти ветви обладают своими характерными чертами. Представители каждого поколения определенной ветви обладают уникальными признаками, по которым их можно разделить на группы разного ранга, входящие одна в другую как матрешки. Группа "настоящих клоунов", правнука и праправнуков первоначальной пары, вся происходит от того из их внуков, у которого был пищащий нос и шлепающие ступни. Этот внук относился к группе "протоклоунов" — потомков того сына первоначальной пары, у которого был только пищащий резиновый нос. Этот "предпротоклоун", в свою очередь, произошел от родителей, совершенно не похожих на клоунов.

Эта схема происхождения, сопровождаемого модификацией, означает, что вы могли бы представить гипотетическое родословное древо клоунов, даже если бы я ничего вам о нем не рассказал. Если бы перед вами была комната, заполненная представителями разных поколений клоунов, вы бы догадались, что все клоуны, у которых есть пищащий нос, составляют группу родственников. В составе этой группы будет подгруппа с пищащим носом и шлепающими ступнями, в составе этой подгруппы будет подгруппа более низкого ранга — настоящих клоунов с оранжевыми волосами, пищащим носом и шлепающими ступнями. Главное здесь то, что по наблюдаемым признакам — таким как оранжевые волосы, пищащий нос, большие шлепающие ступни — можно выделить все эти группы. Эти признаки дают нам возможность выделять группы клоунов, состоящие друг с другом в родстве, начиная с определенного поколения.

Если рассматривать вместо этой воображаемой клоунской семьи реальные организмы, обладающие реальными признаками, возникшими за счет мутаций, видоизменявших тела их предков, то и их родословное древо можно будет восстановить по наблюдаемым признакам. Если именно так и работает происхождение, сопровождаемое модификацией,

то в основе каждой ветви наших деревьев должны находиться организмы, обладающие теми или иными базовыми признаками. Эта истина обладает такой огромной силой, что позволяет нам восстанавливать генеалогические деревья, даже основываясь на одних только генетических данных, в чем мы убеждаемся из результатов целого ряда генеалогических проектов, осуществляемых в настоящее время. Разумеется, реальный мир намного сложнее, чем этот простой гипотетический пример. Восстановление генеалогических деревьев нередко оказывается непростой задачей, например, если тот или иной признак неоднократно независимо возникал у разных представителей изучаемой родственной группы, или если взаимосвязь между признаком и геном, его определяющим, не прямая, или если наблюдаемые признаки определяются не генетическими изменениями, а изменениями рациона питания или каких-то условий окружающей среды. К счастью, восстановление схемы развития, сопровождаемого модификацией, нередко оказывается возможным, несмотря на все эти трудности, примерно также, как оказывается возможной очистка принимаемых радиосигналов от шума.

Но откуда растут все ветви этих деревьев, где их начало? Началась ли ветвь клоунов с той скучной пары? Ответ во многом зависит от того, как мы договоримся считать. Начинается ли моя ветвь с первых моих предков, носивших фамилию Шубин? Начинается ли она с украинских евреев или жителей Северной Италии? Как насчет древнейших людей? Или ее началом нужно считать микробов, живших 3,5 миллиарда лет назад или еще раньше? Все согласятся, что их родословная где-то начинается, но весь вопрос в том, где именно ее начало.

Если наша родословная началась с древнейших микробов и если это соответствует нашему закону биологии, то мы можем приводить в систему имеющиеся у нас данные и делать специфические предсказания. Жизнь на Земле оказывается не случайным набором из разных существ, она обретает систему, все элементы которой несут общие признаки происхождения, сопровождаемого модификацией, вроде тех, что мы видели в семье клоунов. Неслучайной должна быть и структура всей геологической летописи. Признаки, появившиеся позже, должны встречаться у ископаемых из менее древних слоев горных пород, чем признаки, возникшие ранее. Точно так же, как на моем собственном генеалогическом древе я появился позже, чем мой дедушка, на общем генеалогическом древе всего живого все его элементы тоже должны иметь свое место во времени.

Чтобы увидеть, как биологи на практике восстанавливают наши родственные связи с другими живыми существами, нам нужно покинуть наш воображаемый цирк и вернуться в зоопарк, который мы посетили в первой главе этой книги.

Еще одна прогулка по зоопарку — на сей раз подольше

Как мы с вами уже убедились, наши тела устроены далеко не случайно. Здесь я использую слово "случайно" в особом значении: я имею в виду, что строение нашего тела далеко не случайным образом соотносится со строением тел других животных, бегающих, летающих, ползающих и плавающих по нашей планете. Разные черты нашего строения объединяют нас с одними животными и отличают от других. Все то, что объединяет нас с остальными живыми существами, подчиняется определенному порядку. У нас два глаза, два уха, одна голова, пара рук и пара ног. У нас нет семи рук или двух голов. Нет у нас и колес.

Прогулка по зоопарку наглядно демонстрирует нашу связь со всей остальной жизнью. Более того, мы убеждаемся в том, что реальных живых существ можно распределить по группам так же, как мы распределили клоунов. Давайте пойдём и для начала посмотрим на трех разных животных, которых содержат в нашем зоопарке. Начнем с белых медведей. Из признаков, объединяющих нас с белыми медведями, можно составить длинный список: волосяной покров, молочные железы, четыре конечности, шея, два глаза, два уха — и многое другое. Перейдем теперь в отдел рептилий, к черепахам. Сходство с нами тоже налицо, но список общих черт получится короче. У черепах, как и у нас, есть четыре конечности, шея и два глаза (а также некоторые другие признаки). Но, в отличие от нас и от белых медведей, черепаха лишена волосяного покрова и молочных желез. Что касается ее панциря, то он, похоже, уникален для черепах, точно так же как белый мех уникален для белого медведя. Теперь зайдём в аквариум и посмотрим на экзотических рыб. У них тоже есть общие с нами признаки, но список этих признаков будет еще короче, чем список наших общих признаков с черепахами. Как и у нас, у рыб два глаза. Как и у нас, у них тоже есть конечности, но эти конечности представляют собой плавники, а не ноги и не руки. Мы не найдем у рыб и многих других признаков, объединяющих нас с белыми медведями, в частности волосяного покрова и молочных желез.

Все это начинает напоминать систему групп и подгрупп, входящих друг в друга как матрешки, с которыми мы только что имели дело на примере семейства клоунов. Рыб, черепах, белых медведей и людей

объединяет ряд признаков: голова, два глаза, два уха и так далее. Черепах, белых медведей и нас объединяют не только эти признаки, но также наличие шеи и четырех конечностей, что рыбам не свойственно. Белые медведи и люди образуют более элитарную группу, представители которой обладают не только всеми этими признаками, но также шерстью и молочными железами.

Пример с клоунами дает нам способ, позволяющий во многом разобраться в ходе прогулки по зоопарку. У клоунов наблюдаемое распределение признаков отражало происхождение, сопровождаемое модификацией. Из этого следовало, что настоящие клоуны, обладающие всеми характерными признаками клоунов, происходили от менее далекого предка, чем все, у кого есть пищащий нос. Это вполне логично: первый клоун с пищащим носом приходится дедом отцу всех настоящих клоунов. Применяя тот же подход к группам животных, выделенным нами во время прогулки по зоопарку, мы приходим к выводу, что у людей и белых медведей должен быть не такой далекий общий предок, как у людей, белых медведей и черепах. Этот вывод подтверждается палеонтологическими данными: остатки древнейших млекопитающих известны из слоев намного более поздних, чем остатки древнейших рептилий.

Главная задача здесь состоит в том, чтобы узнать, как выглядело генеалогическое древо видов, то есть узнать, в какой степени разные виды родственны друг другу. Представления о степени родства разных организмов помогают нам толковать признаки ископаемых, таких как тиктаалик, в свете нашей прогулки по зоопарку. Тиктаалик — замечательная промежуточная форма между рыбами и их потомками, заселившими сушу, но вероятность того, что это наш непосредственный предок, очень невелика. Скорее всего, это родственник нашего предка. Ни один палеонтолог, находящийся в здравом уме, никогда не станет утверждать, что им открыт чей-нибудь Предок. Подумайте, каковы шансы, что, гуляя по какому-нибудь случайно выбранному на нашей планете кладбищу, я обнаружу могилу своего предка? Они крохотны. Что я действительно могу обнаружить, так это то, что все люди, похороненные на любом кладбище — где бы оно ни находилось, в Китае, в Ботсване или в Италии, — в разной степени приходятся мне родственниками. Это можно узнать, исследуя их ДНК с помощью одной из многих продвинутых методик, применяемых сегодня в следственной экспертизе. Я могу убедиться в том, что одни из тех, кто покоится на этом кладбище, состоят со мной в далеком родстве, а другие приходятся

мне довольно близкими родственниками. Построенное на основании таких данных родословное древо пролило бы немало света на мое прошлое, на историю моего рода. Эти данные можно было бы применить и на практике: их можно использовать, чтобы узнать, насколько я предрасположен заболеть той или иной болезнью, и разобраться в некоторых других биологических особенностях моего организма. То же самое можно сказать и о выяснении родственных связей между разными видами.

Сила родословного древа жизни прежде всего в том, что оно позволяет делать проверяемые предсказания. Важнее всего, что мы можем предсказывать, когда будут выявлены те или иные неизвестные ранее общие признаки разных групп организмов, они должны укладываться в построенную нами схему степеней родства. Таким образом, когда мы выявляем какие-то свойства клеток, ДНК и любых других структур, тканей и веществ, мы ожидаем, что степень их сходства у разных животных будет соответствовать тем группам, которые мы выделили, гуляя по зоопарку. Проверая, действительно ли это так, мы проверяем нашу гипотетическую схему родства на ложность. Если будут обнаружены признаки, которые не соответствуют построенной нами схеме, значит, мы построили ее неправильно и она должна быть переделана. Например, если бы мы обнаружили множество признаков, общих для рыб и людей, но не свойственных белым медведям, это означало бы, что наша схема неправильна и должна быть заменена на другую. В тех случаях, когда имеющиеся данные могут быть интерпретированы неоднозначно, мы применяем ряд статистических методов, чтобы оценить надежность разных признаков и построить наиболее правдоподобный вариант дерева. Такие генеалогические построения рассматривают как рабочую гипотезу — до тех пор пока новые данные не позволят принять их или отказаться от них.

Некоторые из выделяемых нами групп животных так убедительно подтвердились в ходе неоднократных проверок, что мы относимся к ним как к фактам. Например, распределение по группам рыб, черепах, людей и белых медведей подтверждается особенностями тысяч генов, а также по сути и всеми чертами анатомии, физиологии и клеточной биологии этих организмов. Схема наших родственных отношений с этими животными подтверждена так убедительно, что мы уже не занимаемся поиском новых данных для ее проверки. Делать это так же бессмысленно, как пятьдесят раз бросать вниз один и тот же шарик,

чтобы проверить, выполняется ли закон тяготения. Схема нашего родства с рыбами, черепахами и медведями уже не больше нуждается в проверке, чем этот закон. Вероятность того, что на пятьдесят первый раз шарик полетит не вниз, а вверх, не больше, чем вероятность того, что будут обнаружены новые данные, которые опровергнут схему наших связей с этими животными.

Теперь мы можем вернуться к цели, поставленной в начале этой книги. Как безошибочно восстановить отношения животных, которые давно вымерли, с телами и генами современных животных? Для этого мы ищем проявления происхождения, сопровождаемого модификацией, суммируем признаки, определяем, насколько качественны наши данные, и оцениваем, насколько хорошо выделенные нами группы представлены в палеонтологической летописи. Потрясающе то, что сегодня мы располагаем инструментами, которые позволяют проверять предполагаемую нами иерархическую структуру всего живого с помощью информационных технологий и при участии больших лабораторий, читающих последовательности нуклеотидов в ДНК. Эти инструменты помогают анализировать связи живых организмов по тому же принципу, который мы применяли в зоопарке, но на уровне намного более высоком. Кроме того, в последнее время мы получили доступ ко множеству новых местонахождений ископаемых, разбросанных по планете. Место наших тел в мире природы открывается нам яснее, чем когда-либо прежде.

Пройдя главы с первой по десятую, мы убедились, что современных живых существ объединяют с давно вымершими многие черты глубокого сходства. Это относится и к червям, и к губкам, и к рыбам, и к людям. Теперь, вооружившись знаниями о происхождении, сопровождаемом модификацией, мы можем понять значение всего этого. Хватит развлечений в цирке и зоопарке — время перейти к делу.

Как мы убедились, внутри наших тел можно найти связи с целым зверинцем. Одни структуры нашего тела напоминают структуры медуз, другие — червей, третьи — рыб. Это сходство отнюдь не бессистемно. Некоторые черты нашего строения свойственны также всем остальным животным, некоторые — уникальны для нас. Видеть порядок, которому подчиняются все эти черты, прекрасно и удивительно. Тысячи генов, бесчисленные особенности строения и развития — и все это следует той же логике, какой следовали клоуны в приведенном нами воображаемом примере.

Давайте рассмотрим некоторые из признаков, о которых мы уже

говорили в этой книге, и разберемся, какому порядку они подчиняются.

Со всеми животными, населяющими нашу планету, нас объединяют *многоклеточные тела*. Назовем эту группу многоклеточной жизнью. Признак многоклеточности объединяет нас со всеми организмами от губок, трихоплаков и медуз до шимпанзе.

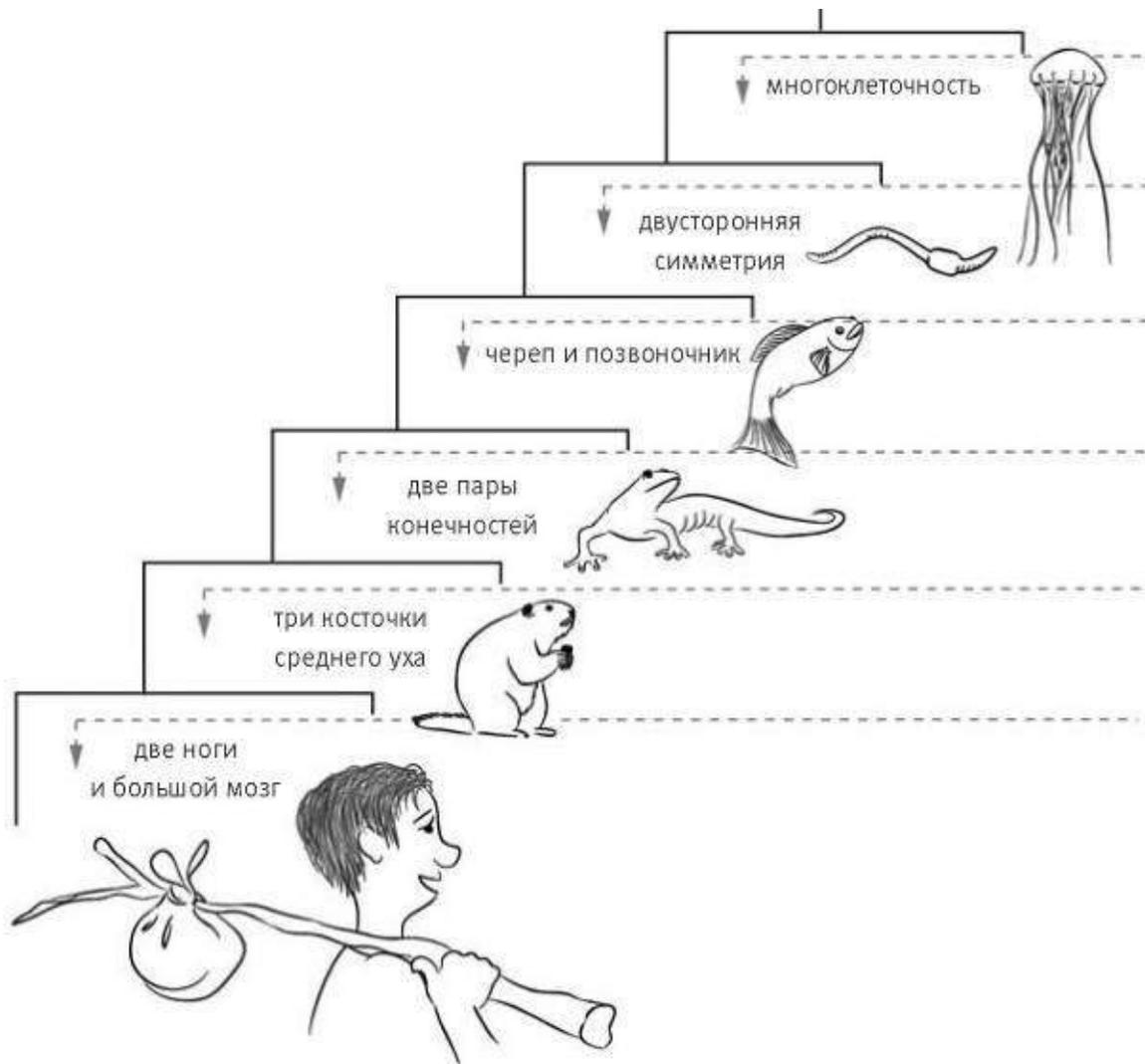
Подгруппа в составе группы многоклеточных объединяет животных, обладающих *планом строения тела*, похожим на наш, который включает перед и зад, верх и низ, правый и левый бок. Систематики называют эту группу *Bilateria* (то есть "двусторонне-симметричные"). Сюда относятся многие животные от червей и насекомых до людей.

Подгруппа следующего ранга, в составе подгруппы двусторонне-симметричных многоклеточных животных, объединяет организмы, обладающие *черепом и позвоночником*. Их называют позвоночными животными.

Следующая подгруппа объединяет многоклеточных животных, двусторонне-симметричных, обладающих черепом и позвоночником, у которых к тому же есть *две пары конечностей*. Этих животных называют тетраподами (то есть "четвероногими") или наземными позвоночными.

Подгруппа еще более низкого ранга объединяет многоклеточных животных, двусторонне-симметричных, с черепом и позвоночником и двумя парами конечностей, у которых к тому же *среднее ухо состоит из трех косточек*. Этих наземных позвоночных называют млекопитающими.

И наконец, следующая подгруппа объединяет многоклеточных животных, двусторонне-симметричных, с черепом и позвоночником, двумя парами конечностей и тремя косточками среднего уха, которые к тому же *ходят на двух ногах и обладают огромным мозгом*. Этих млекопитающих называют людьми.



Родословное древо людей, начиная от медузоподобных организмов. Оно устроено точно так же, как родословное древо клоунов.

Сила этого разделения на группы — в том множестве данных, которые лежат в его основе. Эту схему подтверждают сотни и тысячи генетических, эмбриологических и анатомических признаков. И это разделение позволяет нам по-новому взглянуть на самих себя и на наше внутреннее строение.

Рассматривая эти группы в обратном порядке, мы как бы очищаем луковицу, снимая слой за слоем и обнажая более древние слои нашей истории. На поверхности лежат признаки, объединяющие нас с остальными млекопитающими. Затем, если посмотреть глубже, мы видим черты, которые объединяют нас со всеми наземными позвоночными. Еще глубже лежат наши общие черты с рыбами. Еще

глубже — признаки, которые объединяют нас с червями. И так далее. Исходя из той же логики, которую мы применяли к клоунам, мы открываем для себя схему происхождения, сопровождаемого модификацией, которая выгравирована внутри наших тел. Эта схема отражена и в геологической летописи. Древнейшим многоклеточным ископаемым более 600 миллионов лет, древнейшим ископаемым четвероногим — меньше 400 миллионов лет, а древнейшим млекопитающим — меньше 200 миллионов лет. Древнейшему ископаемому, ходившему на двух ногах, около 4 миллионов лет. Что это — случайное совпадение или отражение закона биологии, работу которого мы наблюдаем повсюду изо дня в день?

Карл Саган однажды сказал, что смотреть на звезды — все равно что смотреть в прошлое. Достигающий наших глаз свет многих звезд начал свой путь миллионы и миллиарды лет назад, задолго до того, как возник мир, который мы знаем. Мне нравится думать о том, что смотреть на людей — во многом все равно что смотреть на звезды. Если знать, как смотреть, то наши тела оказываются капсулами с посланиями из прошлого, и, открывая эти капсулы, мы узнаем о важнейших этапах истории нашей планеты и о живых существах, населявших в далеком прошлом ее океаны, реки и леса. Изменения, произошедшие в древней атмосфере, дали клеткам возможность сообща строить многоклеточные тела. Условия древних рек во многом определили строение наших конечностей. Наши цветное зрение и обоняние оформились под влиянием жизни в древних лесах и на древних равнинах. И этот список можно продолжать и продолжать. Эта история — наше наследие. Оно влияет на нашу жизнь сегодня и будет влиять на нее в будущем.

Как история нас достает

Однажды моя коленка раздулась до размеров грейпфрута, и одному из моих коллег из отделения хирургии пришлось долго мять и сгибать ее, чтобы понять, растяжение ли это, или разрыв одной из связок, или повреждение хрящевых прокладок внутри сустава. Этот осмотр и последовавшая за ним магнитно-резонансная томография выявили разрыв мениска — возможно, следствие двадцати пяти лет блужданий с рюкзаком по скалам и каменным осыпям. Повреждая коленный сустав, мы обычно повреждаем одну или несколько из трех его структур: внутренний мениск, внутреннюю боковую связку или переднюю крестообразную связку. Повреждения этих трех структур коленного сустава случаются так часто, что врачи между собой называют эти структуры "несчастной триадой". Это яркое свидетельство того, что носить в себе рыбу не всегда приятно.

За то, что мы стали людьми, приходится расплачиваться. Мы платим определенную цену за обладание своим исключительным набором признаков — способностью говорить, думать, работать руками и ходить на двух ногах. Это неизбежное следствие заключенного внутри нас древа жизни.

Представьте себе, что кто-нибудь постарался бы переделать "фольксваген-жук" так, чтобы он мог развивать скорость 250 километров в час. В 1933 году Адольф Гитлер поручил конструктору Фердинанду Порше разработать автомобиль, который был бы недорогим, развивал скорость до 100 километров в час и мог служить надежным средством транспорта для средней немецкой семьи. В результате появился легендарный "фольксваген-жук". Эта история и условия, поставленные Гитлером, накладывают определенные ограничения на возможности модификации этого автомобиля. Сегодня его конструкция допускает переналадку лишь до определенных пределов, после которых начнутся серьезные проблемы.

Во многом люди похожи на рыб, прошедших тюнинг — как "фольксваген-жук" для участия в гонках. Возьмем план строения рыбы, переоборудуем его, чтобы получить млекопитающее, а затем постепенно модифицируем это млекопитающее так, чтобы оно могло ходить на двух ногах, говорить, думать и управлять тончайшими движениями своих пальцев, — и мы неизбежно столкнемся с рядом

проблем. Переделывать рыбу, ничего не платя за это, можно лишь до определенных пределов. В мире, который был бы продуктом идеального замысла, а не долгой и непростой истории, нам не пришлось бы страдать от множества разных болезней, начиная с геморроя и заканчивая раком.

Нигде наша история не проявляется так отчетливо, как в изгибах, извивах и поворотах наших артерий, вен и нервов. Если проследить путь некоторых нервов, мы увидим, что они странным образом петляют вокруг определенных органов, следуя поначалу в одном направлении лишь затем, чтобы потом причудливо изогнуться и привести в совсем неожиданное место. Эти изгибы и извивы представляют собой поразительные порождения нашего прошлого, которые, как нам предстоит убедиться, нередко создают нам проблемы, например такие, как икота или грыжа. И это лишь два из многих примеров того, как прошлое дает о себе знать, сказываясь на нашем здоровье.

В разные времена наши предки жили в древних океанах, в мелководных реках и в саваннах, но не в офисных зданиях, не на горнолыжных курортах и не на теннисных кортах. Мы не приспособлены для того, чтобы жить больше 80 лет, сидеть на ягодицах по десять часов в день и есть пирожные. Не приспособлены мы и для того, чтобы играть в футбол. Эти противоречия между нашим прошлым и нашим человеческим настоящим означают, что наши тела обречены нередко ломаться определенным предсказуемым образом.

У всех болезней, от которых мы страдаем, есть некоторая историческая составляющая. Примеры, которые мы сейчас разберем, покажут нам, как разные ветви заключенного в нас дерева жизни, от микробов до рыб, амфибий и, наконец, древних людей, достают до нас из прошлого и сказываются на нашем здоровье. Каждый из этих примеров показывает, что мы не были устроены согласно некому рациональному замыслу, но возникли в ходе долгой и непростой истории.

Наследие охотников и собирателей: ожирение, сердечные заболевания и геморрой

Наши далекие предки-рыбы активно охотились в древних океанах и реках. Предки чуть менее дальние, амфибии, рептилии и млекопитающие, тоже были активными хищниками и добывали разную добычу, от насекомых до рептилий. Предки, которые стоят к нам еще ближе, приматы, активно передвигались по деревьям и питались плодами и листьями. Древнейшие люди, в свою очередь, были активными охотниками и собирателями, которые впоследствии занялись сельским хозяйством. Замечаете общую тему? Красной нитью через весь этот ряд проходит слово "активный".

К несчастью, большинство из нас проводит значительную часть дня в занятиях каких угодно, только не активных. В настоящую минуту я просиживаю зад, набивая на компьютере текст этой книги, а многие из вас делают то же самое, читая ее (за исключением тех немногих праведных, кто делает это во время упражнений в тренажерном зале). Весь ход нашей истории от рыб до древних людей никоим образом не подготовил нас к такому образу жизни. Это несоответствие нашего прошлого нашему настоящему проявляется во многих недугах, свойственных современной жизни.

От чего люди чаще всего умирают? Четыре из первых десяти причин — сердечные заболевания, диабет, ожирение и инсульты — имеют и генетическую, и, по всей видимости, историческую основу. Почти несомненно, что эти проблемы во многом порождены тем, что наши тела приспособлены для жизни активного животного, а мы ведем образ жизни овощей.

В 1962 году антрополог Джеймс Нил рассмотрел эту проблему с точки зрения питания. Он сформулировал концепцию, известную как гипотеза "экономного гено типа". Эта концепция предполагает, что наши предки, древние люди, были приспособлены к жизни в условиях чередующихся бумов и спадов. Будучи охотниками и собирателями, они испытывали периоды временного изобилия, когда добыча была многочисленна и охота успешна, сменявшиеся периодами нехватки, когда еды удавалось добыть намного меньше.

Нил предположил, что этот цикл пиров и голодовок отразился на наших генах и на наших болезнях. Его основная идея состояла в том, что

тела наших предков позволяли им накапливать ресурсы во времена изобилия, чтобы впоследствии использовать их в голодные времена. В связи с этим очень полезной оказалась способность накапливать жир. Наш организм распределяет энергию потребляемой пищи таким образом, что часть ее уходит на поддержание активности в настоящее время, а часть запасается, например в виде жира, для использования в будущем. Этот механизм успешно работает в мире бумов и спадов, но дает прискорбные сбои в условиях, когда высококалорийная пища доступна круглые сутки и круглый год. Ожирение и связанные с ним болезни — развивающийся с возрастом диабет, повышенное кровяное давление и многие сердечные заболевания — становятся обычным явлением. Гипотеза экономного генотипа правдоподобно объясняет также наше увлечение жирной пищей. Жирная пища особенно калорийна, то есть богата энергией, и врожденная склонность к такой пище могла давать нашим предкам преимущество перед теми собратьями, кто ею не увлекался.

Сидячий образ жизни тоже сказывается на нашем здоровье, потому что наша кровеносная система сформировалась у намного более активных существ, чем те, которыми мы являемся сегодня.

Наше сердце, как насос, прокачивает по телу кровь, которая доходит до наших органов по артериям и возвращается в сердце по венам. Артерии находятся ближе к сердцу, поэтому давление в них намного выше, чем в венах. Это обстоятельство может затруднять возвращение крови от ступней к сердцу. Кровь, которая поступает туда, должна возвращаться назад, так сказать, в гору, по венам наших ног и вплоть до грудной клетки, где находится сердце. Если давление в венах слишком низкое, у крови может не получиться пройти весь этот путь. В связи с этим у наших предков развились два признака, помогающих крови подниматься вверх. Во-первых, это небольшие клапаны внутри вен, которые пропускают кровь вверх, но преграждают ей дорогу обратно вниз. Во-вторых, это работа мышц наших ног. Когда мы ходим, бегаем или прыгаем, эти мышцы сокращаются, и их сокращение помогает крови подниматься вверх по венам. Клапаны, пропускающие кровь лишь в одну сторону, и ножные мышцы, работающие как насос, позволяют крови успешно достигать грудной клетки, поднимаясь из ступней.

Эта система превосходно работает у активных существ, которым ноги постоянно служат, чтобы ходить, бегать и прыгать. Но у тех, кто ведет сидячий образ жизни, она работает плохо. Если человек мало

пользуется ногами, их мышцы не прокачивают кровь вверх по венам. В итоге кровь застаивается в венах, и ее постоянное давление на клапаны может нарушать их работу. Именно это происходит при варикозном расширении вен. Нарушения работы клапанов еще больше способствуют скапливанию крови в венах. Их стенки растягиваются, и вены раздуваются, образуя под кожей ног выступающую извилистую сеть.

Не меньшие проблемы происходят от сбоев этой системы в районе прямой кишки. Водители-дальнобойщики и люди других специальностей, проводящие долгое время в сидячем положении, особенно подвержены геморрою — еще одной форме нашей расплаты за сидячий образ жизни. Во время продолжительного сидения кровь застаивается в венах, окружающих прямую кишку. Застой крови вызывает расширение, разрастание и воспаление этих вен — неприятное напоминание о том, что мы не приспособлены к продолжительному сидению, особенно на жестких поверхностях.

Наследие приматов: речь достается недешево

Способность разговаривать досталась нам дорогой ценой. За эту способность мы расплачиваемся риском умереть от остановки дыхания во время сна или подавившись какой-нибудь пищей.

Мы издаем звуки, складывающиеся в речь, посредством управляемых движений языка, гортани и задних стенок горла. Все эти структуры возникли в результате несложных модификаций структур, свойственных другим млекопитающим, а также рептилиям. В пятой главе мы уже говорили о том, что человеческая гортань формируется на основе хрящей бывших жаберных дуг. Задние стенки горла, идущие от последних коренных зубов до участка непосредственно над гортанью, у нас мягкие и подвижные и могут смыкаться и размыкаться. Мы издаем звуки речи, двигая языком, меняя форму и положение губ и сокращая ряд мышц, управляющих жесткостью стенки горла.

Синдром ночного апноэ — внезапной остановки дыхания во сне — опасный побочный эффект, иногда вызываемый способностью говорить. Во время сна мышцы человеческого горла расслабляются. У большинства людей их расслабление не вызывает никаких проблем, но у некоторых оно может приводить к тому, что доступ воздуха в легкие оказывается перекрыт и человек в течение довольно долгого времени не дышит. Этот синдром, разумеется, очень опасен, особенно для людей, страдающих сердечными заболеваниями. Гибкость нашего горла, которая позволяет нам говорить, в то же время подвергает нас риску одной из форм остановки дыхания, вызываемого перекрытием дыхательных путей во время сна.

Еще одно неприятное последствие устройства нашего речевого аппарата — повышенный риск подавиться и умереть от удушья. Наш рот ведет и в трахею, через которую мы дышим, и в пищевод, куда поступает наша пища. Таким образом, мы дышим, едим и разговариваем через одно и то же отверстие. Между этими функциями иногда возникают противоречия, например, когда в трахее застревает косточка или кусок пищи.

Наследие рыб и головастиков: икота

Икота — неприятность, восходящая корнями к истории, роднящей нас с рыбами и головастиками.

Если что-то и может нас в связи с этим утешить, так это то, что наше несчастье разделяют с нами и многие другие млекопитающие. У кошек можно искусственно вызвать икоту, стимулируя электродами небольшой участок ткани в стволовой части мозга. По-видимому, в этой части мозга и находится центр, управляющий сложной рефлекторной реакцией, которую мы называем икотой.

Рефлекс икоты представляет собой стереотипные повторяющиеся сокращения ряда мышц, относящихся к стенке нашего тела, диафрагме, шее и горлу. Спазм одного или двух главных нервов, управляющих дыханием, заставляет эти мышцы сокращаться. В результате происходит очень резкий вдох. Затем, около 35 миллисекунд спустя, в глубине нашей гортани смыкается голосовая щель, перекрывая верхнюю часть дыхательных путей. Быстрый вдох с последующим перекрыванием дыхания вызывает звук, похожий на "ик".

Беда в том, что нам редко удастся икнуть лишь единожды. Если икоту получается остановить, икнув раз пять или десять, у нас есть хорошие шансы, что она не возобновится. Но если пропустить этот момент, то икота продолжится и повторится в среднем еще шестьдесят раз. Некоторым из нас довольно быстро избавиться от икоты помогает вдыхание углекислого газа (классический способ — дышать, засунув лицо в бумажный пакет) или распрямление стенки тела (за счет глубокого вдоха и задержки дыхания). Но многим и это не помогает. Иногда патологические приступы икоты могут быть необычайно долгими. Самый долгий известный приступ икоты у человека продолжался непрерывно с 1922 по 1990 год.

Склонность к икоте — еще один способ нашего далекого прошлого напомнить о себе. Здесь стоит обсудить два момента. Первый — причина того нервного спазма, который вызывает икоту. Второй — механизм управления икотой, резким вдохом и быстрым перекрыванием голосовой щели. Нервный спазм — наследие наших предков-рыб, а сама реакция икоты возникла у наших предков-амфибий, личинки которых были похожи на нынешних головастиков.

Начнем с рыб. Наш мозг позволяет контролировать дыхание без

малейших сознательных усилий с нашей стороны. Большая часть работы выполняется в стволовой части мозга, на границе между головным и спинным мозгом. Мозговой ствол посылает нервные импульсы главным дыхательным мышцам. Дыхание всегда происходит ритмично, по одной и той же схеме. Мышцы груди, диафрагма и гортань сокращаются в строго определенном порядке. Управляющая этими сокращениями часть мозгового ствола получила название "центральный генератор ритма". Этот участок мозга вызывает ритмичные нервные импульсы и, посредством этих импульсов, ритмичное сокращение мышц. Ряд других похожих генераторов, расположенных у нас в головном и спинном мозге, управляет другими ритмичными формами активности, такими как глотание или ходьба.

Беда в том, что первоначально ствол нашего мозга управлял дыханием у рыб и лишь впоследствии был переоборудован, чтобы управлять дыханием наземных позвоночных. И у хрящевых, и у костных рыб определенный участок мозгового ствола обеспечивает ритмичное сокращение мышц глотки и жабр. Нервы, вызывающие сокращения этих мышц, все идут из строго определенного участка мозгового ствола. Схема расположения этих нервов, свойственная современным рыбам, наблюдается уже у представителей одной из древнейших ископаемых групп позвоночных. Среди ископаемых остатков остракодерм в породах возрастом более 400 миллионов лет имеются отпечатки мозга и черепно-мозговых нервов. Как и у современных рыб, нервы, управляющие дыханием, выходят у остракодерм из мозгового ствола.

У рыб эта система работает прекрасно, но у млекопитающих дает сбой. Дело в том, что у рыб нервам, которые управляют дыханием, не приходится идти далеко после выхода из мозгового ствола. Жабры и глотка располагаются у них как раз по соседству с этим отделом мозга. У нас, млекопитающих, дела обстоят иначе. Нашим дыханием управляют мышцы стенки грудной клетки и диафрагма — мышечная перегородка, отделяющая грудную полость от брюшной. Сокращения этих мышц и вызывают дыхательные движения. Нервы, управляющие сокращением диафрагмы, выходят из нашего мозгового ствола ровно там же, где выходят нервы, управляющие дыханием у рыб, — в районе шеи. Эти нервы, блуждающий и диафрагмальный, проходят от основания черепа через шею и грудную клетку, достигая диафрагмы и грудных мышц, управляющих дыханием. Этот извилистый путь вызывает проблемы. Если бы наше тело было построено по рациональному замыслу, эти нервы выходили бы не в области шеи, а где-

нибудь поблизости от диафрагмы. А так, к прискорбию, любые препятствия, с которыми встречаются эти нервы на своем долгом пути, могут затруднять их работу и вызывать спазмы.

Если странная конфигурация наших нервов досталась нам в наследство от предков-рыб, то сама реакция икоты, по-видимому, восходит к нашим менее далеким предкам — амфибиям. Икота представляет собой особую форму дыхательных движений — за резким вдохом следует быстрое перекрывание голосовой щели. Икотой, судя по всему, тоже управляет центральный генератор ритма в мозговом стволе. Стимулируя его электрическими импульсами, можно искусственно вызвать икоту. Вполне логично, что икотой тоже управляет центральный генератор ритма, ведь эта реакция, как и нормальные дыхательные движения, включает повторяющиеся в определенной последовательности серии сокращений мышц.

Оказывается, наш генератор ритма, ответственный за икоту, ничем по сути не отличается от соответствующего генератора, имеющегося у амфибий. И не только у взрослых амфибий, но и у их личинок — головастиков, которые используют для дыхания как легкие, так и жабры. У головастиков этот генератор включается тогда, когда они дышат жабрами. В этом случае им необходимо закачивать воду в глотку и прокачивать ее сквозь жаберные щели наружу, но вода при этом не должна попадать в легкие. Чтобы не допустить проникновения в легкие воды, дыхательные пути перекрываются — за счет того, что сжимается ведущая в легкие щель. Вовремя закрывать эту щель сразу после начала вдоха позволяют нервные импульсы, посылаемые центральным генератором ритма в мозговом стволе. Реакция, аналогичная нашей икоте, позволяет головастикам успешно дышать жабрами.

Сходство между нашей икотой и жаберным дыханием головастиков столь велико, что многие исследователи полагают, что оба эти явления суть варианты одной и той же реакции. Жаберное дыхание у головастиков тоже можно блокировать углекислым газом, как и нашу икоту. Блокировку жаберного дыхания можно вызвать и растяжением стенки тела, подобно тому, как мы останавливаем икоту глубоким вдохом с последующей задержкой дыхания. Может быть, мы бы остановили жаберное дыхание у головастика и в том случае, если бы смогли заставить его выпить воду с дальнего края стакана, низко наклонив голову.

Наследие акул: грыжи

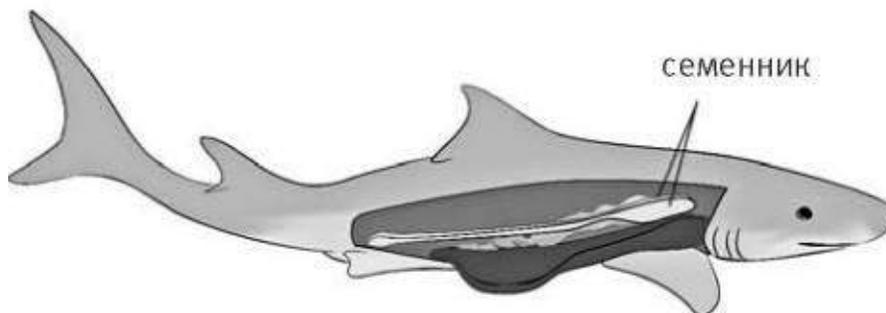
Наша предрасположенность к грыжам, по крайней мере к тем из них, что возникают в области паха, вызвана тем, что наш организм представляет собой бывшее рыбье тело, превращенное в тело млекопитающего.

У рыб половые железы протянуты вдоль тела до его грудного отдела, заканчиваясь вблизи сердца. У млекопитающих это не так, и отсюда возникают проблемы. Но нам нужно, чтобы наши половые железы не заходили в грудной отдел и не располагались возле сердца (надо заметить, что клятвы, которые мы произносим, прижав руку к груди, будь там половые железы, выглядели бы довольно двусмысленно). Если бы наши половые железы располагались в грудном отделе, мы бы не могли размножаться.

Сделаем на теле акулы глубокий надрез от горла до хвоста. Первое, что мы увидим, будет печень — много печени. Печень у акул имеет гигантские размеры. Некоторые зоологи считают, что огромная печень нужна акулам, чтобы увеличивать плавучесть. Если удалить печень, мы увидим половые железы, протянутые по телу до области возле сердца, в грудном отделе. Такое строение характерно для большинства рыб: половые железы протянуты вдоль тела в направлении головы.

Нас, как и большинство других млекопитающих, такое строение привело бы к беде. Особи мужского пола у млекопитающих обычно в течение всей своей жизни производят мужские половые клетки — сперматозоиды. Для формирования наших сперматозоидов требуются особые условия, в частности строго определенный диапазон температур. Лишь в этом диапазоне они могут нормально развиваться и прожить отведенный им срок — около трех месяцев. Если температура слишком высокая, они развиваются неправильно, а если слишком низкая — умирают. В связи с этим у млекопитающих мужского пола есть весьма эффективное устройство для контроля температуры — мошонка. Под кожей мошонки расположены мышечные волокна, которые в зависимости от температуры сокращаются или расслабляются. Мышечные волокна есть также в стенках семенных канатиков, на которых подвешены половые железы. Сокращение всех этих волокон обеспечивает "эффект холодного душа": когда холодно, мошонка уменьшается в размерах и прижимается к телу. Подъем и опускание

мошонки происходят соответственно при снижении и повышении температуры.



Если вскрыть тело самца акулы, первым, что мы увидим, будет огромная печень (вверху). Если ее удалить, нам откроются семенники

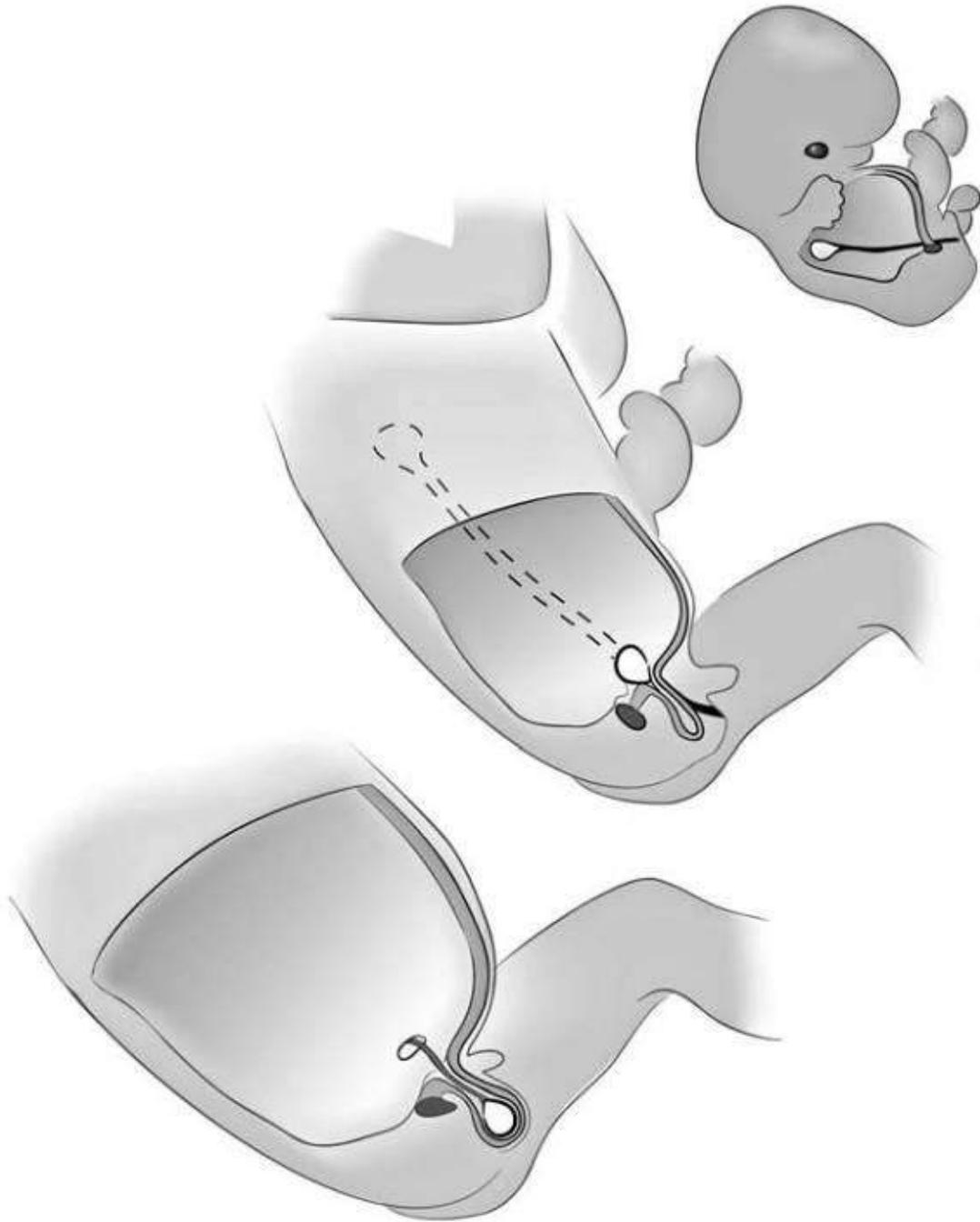
(мужские половые железы), вытянутые вдоль тела и заканчивающиеся вблизи сердца. Подобное строение характерно для большинства примитивных позвоночных. Фото предоставлены доктором Стивеном Камбаной (Канадская лаборатория исследования акул).

Этот механизм обеспечивает непрерывное производство здоровых сперматозоидов при разных условиях среды.

Кроме того, болтающаяся мошонка самца служит у многих млекопитающих половым стимулом для самки. Таким образом, развитие мошонки принесло млекопитающим вполне ощутимые выгоды, как физиологические, связанные с вынесением половых желез за пределы стенки тела, так, в некоторых случаях, и поведенческие, связанные с успешным завоеванием партнерши.

Но с таким строением связан и ряд проблем. Вынесенные за пределы тела семенники (мужские половые железы) означают, что сперматозоиды поступают в пенис окольным путем. Они выходят из семенников по семенным канатикам — которые идут вверх в направлении талии, огибают таз и проходят его насквозь, — а затем попадают в протоки, ведущие в мочеиспускательный канал. На пути сперматозоидов наружу располагается ряд желез, секрет которых образует основу семенной жидкости — спермы.

Нелепое устройство мужской половой системы млекопитающих связано с нашим историческим и индивидуальным развитием. В начале своего развития в эмбрионе млекопитающего половые железы располагаются примерно там же, где они расположены у акул, — вверху, рядом с печенью. По мере роста и развития у женских особей они перемещаются из средней части туловища несколько ниже и оказываются возле матки и фаллопиевых труб. Такое строение позволяет сократить путь яйцеклетки от половой железы туда, где происходит оплодотворение. У мужских особей половые железы опускаются еще дальше.



Опускание семенников у человека. В процессе роста и развития эмбриона половые железы, первоначально расположенные в глубине тела, как у наших далеких предков, постепенно выходят в мошонку — выпячивание стенки тела. В результате в паховой области возникает уязвимое место, в котором может образоваться паховая грыжа.

Опускание наших половых желез, особенно у особей мужского

пола, приводит к возникновению уязвимого участка стенки тела. Чтобы понять, что происходит, когда семенники и семенные канатики опускаются и выходят из тела в мошонку, представьте себе, что вы кулаком продавливаете резиновую пленку. Будем считать, что рука — это семенные канатики вместе с семенниками (кулак соответствует семенникам). Под давлением кулака пленка прогибается и образует карман. Там, где раньше была ровная пленка, образуется дополнительная полость, в которой, у основания кулака, есть свободное место, которое может быть чем-то заполнено. Именно это и происходит при образовании многих форм паховой грыжи у мужчин. Паховая грыжа бывает и врожденной — когда участок кишечника опускается у эмбриона вместе с семенниками и попадает в основание мошонки. Другая разновидность паховой грыжи — приобретенная. Когда мы напрягаем мышцы живота, кишечник давит на стенку тела. Уязвимое место в районе мошонки делает возможным выдавливание участка кишечника в пространство по соседству с семенными канатиками.

Женщины далеко не так уязвимы, как мужчины, по крайней мере в этой части тела. У женщин здесь не проходят никакие длинные трубки, и брюшная стенка у них намного крепче, чем у мужчин. Это свойство оказывается особенно кстати во время беременности и родов, когда женский организм проходит суровое испытание на прочность. Здесь трубки, выходящие за пределы тела, могли бы создать серьезные проблемы. Мужчины же вынуждены мириться с повышенным риском паховой грыжи, расплачиваясь за те выгоды, которые дает нам перестройка рыбьего тела в тело млекопитающего.

Наследие микробов: митохондриальные заболевания

Митохондрии есть в каждой клетке нашего тела, и везде они выполняют ряд важнейших функций. Самая известная из этих их функций состоит в том, чтобы из кислорода и сахаров получать энергию в том виде, в котором ее используют наши клетки. Другие функции митохондрий включают разложение токсинов у нас в печени и регулировку различных процессов, проходящих в наших клетках. Мы осознаем присутствие митохондрий лишь тогда, когда что-то в их работе разлаживается. К сожалению, заболевания, вызываемые неполадками в работе митохондрий, составляют длинный и сложный список. Когда нарушаются химические реакции, за счет которых наши клетки усваивают кислород, нарушается и обеспечиваемое этими реакциями производство энергии. Такого рода нарушения могут затрагивать лишь отдельные ткани, например глаза, а могут и все структуры организма. В зависимости от местоположения и серьезности нарушения оно может иметь разные последствия — от общей слабости до летального исхода.

Многие из процессов, которые обеспечивают нашу жизнедеятельность, отражают историю происхождения наших митохондрий. Цепь химических реакций, в ходе которых из Сахаров и кислорода получают воду и углекислый газ и выделяется энергия в пригодном для использования виде, развилась миллиарды лет назад, и разные ее варианты по-прежнему можно наблюдать у разных микробов. Митохондрии несут в себе наследие этого бактериального прошлого. Генетический аппарат и клеточная микроструктура митохондрий напоминают бактериальные. Согласно теории, которая в последнее время получила всеобщее признание, митохондрии развились из свободноживущих микробов — бактерий, живших более миллиарда лет назад. При этом вся система генерации энергии, имеющаяся у наших митохондрий, возникла еще у их далеких предков — древних бактерий.

Изучение нашего бактериального наследия помогает разобраться в митохондриальных заболеваниях человека. Более того, наилучшими экспериментальными моделями для изучения многих таких заболеваний служат именно бактерии. Использование в качестве модельных объектов свободноживущих бактерий дает возможность проводить множество

экспериментов, которые были бы неосуществимы на материале человеческих клеток. Одно из самых продуктивных исследований такого рода было проведено недавно группой ученых из Италии и Германии. Заболевание, которое они изучали, неизменно приводит к смерти рождающихся с этим недугом младенцев. Это заболевание называют кардиоэнцефаломиопатией. Оно возникает в результате генетической мутации в митохондриях, которая нарушает нормальный обмен веществ в этих структурах. Изучая ДНК одного из пациентов, страдающих этим заболеванием, исследователи выявили мутантный участок, в котором они подозревали причину заболевания. Вооруженные знаниями об истории живых организмов, они затем обратились к микробу *Paracoccus denitrificans*, который нередко называют свободноживущей митохондрией — за сходство его генов и обмена веществ с митохондриальными. Проведенные затем эксперименты наглядно показали, насколько велико это сходство. Исследователи искусственно произвели в гене этой бактерии ту же мутацию, которую они выявили в соответствующем гене человеческой митохондрии. Полученный результат был вполне предсказуем, если знать, откуда произошли наши митохондрии. Митохондриальное заболевание человека удалось воспроизвести у мутантных бактерий, которые оказались подвержены тем же изменениям обмена веществ, что свойственны митохондриям пациентов. Изучению этой болезни помогли знания о событиях нашей истории, которые произошли более миллиарда лет назад!

Это далеко не единственный пример успешных исследований такого рода. Исходя из того, за какие открытия в последние тринадцать лет присуждали Нобелевские премии по физиологии и медицине, я мог бы озаглавить эту книгу "Внутренняя муха", "Внутренний червь", или даже "Внутренние дрожжи". Премию 1995 года присудили за новаторские исследования плодовых мух, в ходе которых был выявлен набор генов, определяющих план строения тела у людей и других животных. Нобелевки по физиологии и медицине 2002 и 2006 годов достались людям, которые сделали возможными ряд важнейших достижений генетики и медицины, изучая непримечательного на первый взгляд почвенного червя *Caenorhabditis elegans* (ценорабдитис изящная). Премией 2001 года были, в свою очередь, отмечены не менее изящные опыты на дрожжах (в том числе обычных пекарских) и морских ежах, позволившие открыть ряд фундаментальных свойств живых клеток. И все это — не какие-то абстрактные эксперименты на странных

существах. Подобные исследования дрожжей, мух, червей — и, конечно, рыб — многое говорят нам о том, как работают наши собственные тела, какие причины вызывают у нас болезни и какие новые методы мы можем использовать для продления нашей жизни и улучшения нашего здоровья.

Послесловие

У меня растут двое детей, и в последние годы я немало времени провожу с ними в музеях, зоопарках и океанариумах. Для меня это необычный опыт — приходить туда в качестве посетителя, потому что я уже не один десяток лет работал с музейными коллекциями, а иногда и принимал участие в подготовке выставок. Посещая эти места, вместе с семьей, я осознал, что, вероятно в силу профессии, я склонен испытывать немой восторг по поводу того, как прекрасно и как изумительно сложно устроены наш мир и наши тела. Я преподаю и изучаю предметы, связанные с миллионами лет истории и причудливыми древними мирами, но мой интерес к этим предметам обычно остается отвлеченным, аналитическим. Теперь же я как будто вновь прохожу эти науки вместе со своими детьми — как раз там, где во мне самом когда-то зародилось увлечение ими.

Один особенно запомнившийся случай произошел со мной недавно, когда я вместе с сыном ходил по Музею науки и техники в Чикаго. В последние три года мы не раз приходили сюда, потому что мы любители поездов, а в самом центре этого музея есть огромная действующая модель железной дороги. Я провел немало часов возле этого экспоната, следя за движением маленьких локомотивов, совершающих свой путь из Чикаго в Сиэтл. После нескольких посещений этого храма поездопоклонников мы с Натаниэлом зашли в уголок музея, который пропустили в прошлые визиты, целиком посвященные наблюдению за поездами и спорадическим набегам на тракторы и самолеты в натуральную величину. В глубине музея, в Космическом центре Генри Крауна, с потолка свисали модели планет, а в витринах были выставлены скафандры и другие реликвии освоения космоса шестидесятых и семидесятых годов XX века. Я почему-то думал, что в глубине музея мы не увидим ничего интересного, стоящего основной экспозиции, размещенной в центральных залах. Один из представленных там экспонатов представлял собой изрядно деформированную капсулу космического аппарата. Ее можно было обойти кругом и даже залезть вовнутрь. На первый взгляд в ней не было ничего примечательного: она выглядела слишком маленькой и убогой, чтобы оказаться чем-то важным. Табличка при этом экспонате была составлена на удивление формально, и мне пришлось прочитать ее

несколько раз, прежде чем до меня дошло, что перед нами не что иное, как подлинный командный модуль корабля "Аполлон-8", который впервые в истории доставил людей — это были Джеймс Ловелл, Фрэнк Борман и Уильям Лидере — на орбиту Луны. За полетом этого корабля я увлеченно следил во время своих рождественских каникул в третьем классе. Теперь, тридцать восемь лет спустя, уже вместе с собственным сыном, я своими глазами увидел этот самый аппарат! Разумеется, я был потрясен. На его поверхности я мог различить рубцы, полученные в ходе далекого путешествия и последующего возвращения на Землю. Но Натаниэла этот экспонат совершенно не заинтересовал. Я приволок его к "Аполлону-8" и хотел объяснить, что это такое. Но оказалось, что я не в силах говорить. Чувства так переполняли меня, что я едва мог вымолвить слово. Через несколько минут мне удалось прийти в себя, и я рассказал сыну историю первого путешествия человека к Луне.

Но только когда-нибудь потом, когда он подрастет, я смогу по-настоящему рассказать, что же все-таки лишило меня тогда дара речи. Я объясню ему, что "Аполлон-8" для меня — символ силы науки, символ власти, позволяющей науке объяснять Вселенную, делать ее познаваемой. Можно долго спорить о том, в какой степени освоение космоса было наукой, а в какой — политикой, но главная истина остается сегодня столь же ясной, какой она была в 1968 году: "Аполлон-8" — порождение того оптимизма, который лежит в основе всех лучших достижений науки и двигает ее вперед, пример того, как неведомое, вместо того чтобы порождать суеверный страх и недоверие, вдохновляет людей на то, чтобы задавать новые вопросы и искать ответы на них.

Подобно тому как достижения космонавтики позволили по-иному взглянуть на Луну, достижения палеонтологии и генетики позволили нам в новом свете увидеть самих себя. По мере того как нам открываются новые тайны, многое из того, что раньше представлялось далеким и недостижимым, оказывается доступным нашему разуму и пониманию. Мы с вами живем в век больших открытий, в век, когда наука открывает основы работы живых организмов — таких разных, как медузы, черви и мыши. Перед нами уже забрезжил свет решения одной из величайших научных загадок — в чем состоят генетические отличия, определяющие разницу между нами и другими живыми существами. Наряду с мощными прорывами в этих областях стоит упомянуть важнейшие достижения палеонтологии последних двадцати лет — открытие новых ископаемых и новых методов их исследования,

благодаря которым истины нашей истории открываются нам все более отчетливо. Изучая изменения, происходившие на Земле за миллиарды лет, мы убеждаемся в том, что все в истории жизни, казавшееся нам новым или уникальным, в действительности старое, только переработанное, перестроенное, переделанное для выполнения новых функций. Такова история каждой части нашего тела — от органов чувств до всей головы и даже до общего плана строения человеческого организма.

Что значат эти миллиарды лет истории для нашей сегодняшней жизни? Ответы на многие стоящие перед нами важнейшие вопросы — об основах работы наших органов и о нашем месте в природе — откроются нам лишь тогда, когда мы разберемся в происхождении своего тела и сознания из структур, которые мы разделяем с другими живыми существами. Мало какое занятие могло бы поспорить по красоте и интеллектуальной глубине с научным поиском основ того, что делает нас людьми, и с поиском средств от поражающих человека недугов в представителях самых скромных существ, когда-либо живших на нашей планете.

Примечания, первоисточники и рекомендуемая литература

Для тех, кто хотел бы больше узнать о предметах, о которых идет речь в этой книге, я приведу ссылки как на первоисточники, так и на обобщающие и популярные работы.

Глава 1. В поисках нашей внутренней рыбы

О том, как результаты палеонтологических экспедиций позволяют судить о важнейших вопросах биологии и геологии, см.: M. Novacek, *Dinosaurs of the Flaming Cliff* (New York: Anchor, 1997), A. Knoll, *Life on a Young Planet* (Princeton: Princeton University Press, 2002) и J. Long, *Swimming in Stone* (Melbourne: Freemantle Press, 2006). Во всех этих книгах научный анализ сочетается с описаниями открытий, сделанных в ходе полевых исследований.

Сравнительные методы, о которых идет речь в моей книге, в том числе те, которыми мы пользовались на воображаемой прогулке по зоопарку — это методы кладистики. Превосходный обзор этих методов приведен в книге: H. Gee, *In Search of Deep Time* (New York: Free Press, 1999). Выделение трех систематических групп, вариант которого я описываю, — первый шаг сравнительного кладистического анализа. Хорошее описание и ссылки на базовые источники можно найти в статье: R. Forey et al., "The lungfish, coelacanth and the cow revisited," in H.P. Schultze and L. Trueb, eds., *Origin of the Higher Groups of Tetrapods* (Ithaca, N.Y.: Cornell University Press, 1991).

О связи палеонтологической летописи и "прогулки по зоопарку" можно прочитать во многих научных статьях. Вот несколько примеров: Benton, M. J., and Hitchin, R. (1997) Congruence between phylogenetic and stratigraphic data in the history of life, *Proceedings of the Royal Society of London*, B 264:855-890; Norell, M. A., and Novacek, M. J. (1992) Congruence between superpositional and phylogenetic patterns: Comparing cladistic patterns with fossil records, *Cladistics* 8:319-337; Wagner, P.J., and Sidor, C. (2000) Age rank/clade rank metrics — sampling, taxonomy, and the meaning of "stratigraphic consistency", *Systematic Biology* 49:463-479.

Слои колонки горных пород и содержащиеся в них ископаемые доходчиво обсуждаются в книге: R. Fortey, *Life: A Natural History of the First Four Billion Years of Life on Earth* (New York: Knopf, 1998). О палеонтологии позвоночных подробно повествуют книги: R. Carroll, *Vertebrate Paleontology and Evolution* (San Francisco: W. H. Freeman, 1987) [3] и M. J. Benton, *Vertebrate Paleontology*.

О происхождении наземных позвоночных можно прочитать в книге, в высшей степени доступно написанной и при этом продвинутой в научном плане: C. Zimmer, *At the Water's Edge* (New York: Free Press,

1998). Во всех подробностях об этом вопросе можно прочитать в монографии: Jenny Clack, *Gaining Ground* (Bloomington: Indiana University Press, 2002). Эта книга — настоящая Библия о выходе позвоночных на сушу. С ее помощью даже новичок в этой области может быстро стать специалистом.

Наши работы, в которых впервые был описан тиктаалик, опубликованы в журнале *Nature* в выпуске от 6 апреля 2006 года. Вот ссылки на эти публикации: Daeschler et al. (2006) A Devonian tetrapod-like fish and the origin of the tetrapod body plan, *Nature* 440:757-763; Shubin et al. (2006) The pectoral fin of *Tiktaalik roseae* and the origin of the tetrapod limb, *Nature* 440:764-771. В этом же выпуске опубликован и комментарий к этим работам, очень хорошо и доступно написанный (Jenny Clack and Per Ahlberg, *Nature* 440:747-749).

Все, что относится к нашему прошлому, во многом субъективно. Субъективна и сама структура этой книги. Я мог бы озаглавить ее "Внутренний человек" — и написать с точки зрения рыбы. Как ни странно, структура книги осталась бы во многом такой же: в центре повествования была бы все та же история, следы которой проявляются в сходстве человеческих и рыбьих тел, нервов и клеток. Как мы с вами убедились, у любого живого существа есть как уникальные черты, так и многочисленные признаки, объединяющие его со многими другими.

Глава 2. Откуда такая хватка

Оуэн был отнюдь не первым, кто обратил внимание на схему "одна кость — две кости — много косточек — пальцы". До него о ней писали, излагая свои воззрения, Вик д'Азир в XVII веке и Жоффруа Сент-Илер в 1812 году. Но Оуэна отличает от этих авторов его концепция архетипа. По его мнению, эта схема была проявлением всеобщего надмирного правила, определяющего строение тел, реализуя замысел Создателя. Сент-Илер, в свою очередь, видел в этой схеме строения не столько проявления архетипа, сколько результат общих законов, управляющих формированием тел. Об этом хорошо написано в книгах: T. Appel, *The Cuvier-Geoffroy Debate: French Biology in the Decades Before Darwin* (New York: Oxford University Press, 1987) и E. S. Russell, *Form and Function: A Contribution to the History of Morphology* (Chicago: University of Chicago Press, 1982).

Всевозможные сведения о разнообразии конечностей и их развитии можно почерпнуть в недавно изданном сборнике, содержащем ряд важных статей о разных типах конечностей: Brian K. Hall, ed., *Fins into Limbs: Evolution, Development, and Transformation* (Chicago: University of Chicago Press, 2007). Вот ссылки еще на две работы, из которых можно узнать более подробно о переходе от плавников к конечностям наземных позвоночных: Shubin et al. (2006) The pectoral fin of *Tiktaalik roseae* and the origin of the tetrapod limb, *Nature* 440:764-771; Coates, M. I., Jeffrey, J. E., and Ruta, M. (2002) Fins to limbs: what the fossils say, *Evolution and Development* 4:390-412.

Глава 3. Ручные гены

Биологии развития разнообразных конечностей посвящен ряд оригинальных публикаций и обзорных работ. Обзоры классической литературы по этому вопросу см. в статьях: Shubin, N., and Alberch, P. (1986) A morphogenetic approach to the origin and basic organization of the tetrapod limb, *Evolutionary Biology* 20:319-387 и Hinchliffe, J. R., and Griffiths, P., "The Pre-chondrogenetic Patterns in Tetrapod Limb Development and Their Phylogenetic Significance", in B. Gordon, N. Holder, and C. Wylie, eds., *Development and Evolution* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1983), p. 99-121. Эксперименты Сондерса и Цвиллинга — теперь уже классика, поэтому одни из лучших описаний этих экспериментов можно найти в основных учебниках по биологии развития. К ним относятся следующие две книги: S. Gilbert, *Developmental Biology*, 8th ed. (Saunders, Mass.: Sinauer Associates, 2006)^[4]; L. Wolpert, J. Smith, T. Jessel, F. Lawrence, E. Robertson, and E. Meyerowitz, *Principles of Development* (Oxford, Eng.: Oxford University Press, 2006).

Вот ссылка на первую публикацию, в которой была описана роль гена *Sonic hedgehog* в развитии конечностей: Riddle, R., Johnson, R. Ц. Laufer, E., Tabin, C. (1993) *Sonic hedgehog* mediates the polarizing activity of the ZPA, *Cell* 75:1401-1416.

Результаты, полученные Рэнди Даном в ходе его исследований сигнальной роли гена *Sonic hedgehog* в развитии плавников у акул и скатов, были опубликованы в статье: Dahn R., Davis, M., Pappano, W., and Shubin, N. (2007) *Sonic hedgehog* function in chondrichthyan fins and the evolution of appendage patterning, *Nature* 445:311-314. Дальнейшие результаты, полученные в нашей лаборатории, касающиеся происхождения конечностей наземных позвоночных — по крайней мере в генетическом аспекте, — были опубликованы в статье: Davis, M., Dahn, R., and Shubin, N. (2007) An autopodial-like pattern of Hox expression in the fins of a basal actinopterygian fish, *Nature* 447:473-476. Поразительное генетическое сходство в развитии мух, кур и людей обсуждается в статьях: Shubin N., Tabin, C., and Carroll, S. (1997) Fossils, genes, and the evolution of animal limbs, *Nature* 388:639-648 и Erwin, D., and Davidson, E. H. (2003) The last common bilaterian ancestor, *Development* 129:3021-3032.

Глава 4. Повсюду зубы

Из многих работ по млекопитающим ясно, насколько важны зубы для изучения этой группы животных. Строение зубов играет особенно важную роль в исследовании древнейших ископаемых млекопитающих. Подробные обзоры по этой теме можно найти в книгах: Z. Kielan-Jaworowska, R.L. Cifelli, and Z. Luo, *Mammals from the Age of Dinosaurs* (New York: Columbia University Press, 2004) и J. A. Lillegraven, Z. Kielan-Jaworowska, and W. Clemens, eds., *Mesozoic Mammals: The First Two-Thirds of Mammalian History* (Berkeley: University of California Press, 1979), p. 311.

Млекопитающие, обнаруженные группой Фэриша Дженкинса-мл. в Аризоне, проанализированы в работе: Jenkins F. A., Jr., Crompton, A. W., Downs, W. R. (1983) Mesozoic mammals from Arizona: New evidence on mammalian evolution, *Science* 222:1233-1235.

Трителедонты, которых мы нашли в Новой Шотландии, описаны в статье: Shubin, N., Crompton, A. W., Sues, H. — D., and Olsen, P. (1991) New fossil evidence on the sister-group of mammals and early Mesozoic faunal distributions, *Science* 251:1063-1065.

Обзор, посвященный происхождению зубов, костей и черепа, особенно в свете новых сведений о конодонтах, можно найти в недавней работе: Donoghue, P., and Sansom I. (2002) Origin and early evolution of vertebrate skeletonization, *Microscopy Research and Technique* 59:352-372. Подробный обзор, посвященный эволюционным связям конодентов и их значению, содержится в статье: Donoghue, P., Forey, P., and Aldridge, R. (2000) Conodont affinity and chordate phylogeny, *Biological Reviews* 75:191-251.

Глава 5. Включи голову

На удивление доступным языком — и вместе с тем подробно — строение, развитие и эволюция черепа описаны в трехтомнике: *The Skull*, James Hanken and Brian Hall, eds. (Chicago: Chicago University Press, 1993). Это издание представляет собой подготовленный многими авторами, переработанный и дополненный вариант одного из томов классической работы о строении и развитии головы: G. R. de Beer, *The Development of the Vertebrate Skull* (Oxford, Eng.: Oxford University Press, 1937).

О развитии и строении человеческой головы можно подробно прочитать в работах по анатомии и эмбриологии человека. Эмбриологии посвящена книга: K. Moore and T. V. N. Persaud, *The Developing Human*, 7th ed. (Philadelphia: Elsevier, 2006). В качестве справочника по анатомии стоит использовать книгу: K. Moore and A. F. Dudley, *Clinically Oriented Anatomy* (Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2006).

Результаты основополагающих исследований Фрэнсиса Мейтленда Бальфура представлены в публикациях: Balfour, F. M. (1874) A preliminary account of the development of the elasmobranch fishes, *Quarterly Journal of Microscopical Science* 14:323-364; F. M. Balfour, *A Monograph on the Development of Elasmobranch Fishes*, 4 vols. (London: Macmillan & Co., 1880-81); M. Foster and A. Sedgwick, eds., *The Works of Francis Maitland Balfour*, with an introductory biographical notice by Michael Foster, 4 vols. (London: Macmillan & Co., 1885). Преемник Бальфура в Оксфорде, Эдвин Гудрич, написал один из классических трудов по сравнительной анатомии: E. Goodrich, *Studies on the Structure and Development of Vertebrates* (London: Macmillan, 1930).

Бальфур, Окен, Гете, Гексли и другие занимались так называемой проблемой сегментации головы. Подобно позвоночнику, в котором позвонки изменяются от головы до хвоста в определенной последовательности, голова позвоночных животных тоже сегментирована. Вот несколько работ, как недавних, так и классических, из которых можно подробнее узнать о полученных в этой области результатах (причем все эти работы — с хорошей библиографией): Olson, L., Ericsson, R., and Cerny, R. (2005) Vertebrate head development: Segmentation, novelties, and homology, *Theory in Biosciences* 124:145-163; Jollie, M. (1977) Segmentation of the vertebrate head, *American Zoologist* 17:323-333; Graham, A. (2001) The development and evolution of the

pharyngeal arches, *Journal of Anatomy* 199:133-141.

Сведения о генетической основе формирования жаберных дуг были недавно обобщены в обзорной статье: Kuratani, S. (2004) Evolution of the vertebrate jaw: comparative embryology and molecular developmental biology reveal the factors behind evolutionary novelty, *Journal of Anatomy* 205:335-347. Примеры экспериментов по искусственному превращению одной жаберной дуги в другую, используя генетические методы, описаны в работах: Baltzinger, M., Ori, M., Pasqualetti, M., Nardi, I., and Riji, F. (2005) *Hoxa 2* knockdown in *Xenopus* results in hyoid to mandibular homeosis, *Developmental Dynamics* и Depew, M., Luftkin, T., and Rubenstein, J. (2002) Specification of jaw subdivision by *Dlx* genes, *Science* 298:381-385.

Подробный, информативный и хорошо проиллюстрированный обзор, посвященный ископаемым черепам и головам древнейших позвоночных, можно найти в книге: P. Janvier, *Early Vertebrates* (Oxford, Eng.: Oxford University Press, 1996). Хайкоуэлла, наделенное жаберными щелями беспозвоночное, жившее 530 миллионов лет назад, описана в статье: Chen, J. — Y., Huang, D. Y., and Li, C. W. (1999) An early Cambrian craniate-like chordate, *Nature* 402:518-522.

Глава 6. Лучший план тела

Происхождение нашего плана строения тела обсуждается на многих страницах в целом ряде книг. Особенно много сведений можно почерпнуть из книги: J. Valentine, *On the Origin of Phyla* (Chicago: University of Chicago Press, 2004), в которой к тому же отличная библиография.

Существует несколько жизнеописаний Карла Эрнста фон Бэра. Его краткую биографию можно найти в статье: Jane Oppenheimer, "Baer, Karl Ernst von" in C. Gillespie, ed., *Dictionary of Scientific Biography*, vol. 1 (New York: Scribners, 1970). Более подробно о его жизни можно прочитать в книге: *Autobiography of Dr. Karl Ernst von Baer*, ed. Jane Oppenheimer (1986; перевод с немецкого: 2-е изд., 1886). См. также книги: В. Е. Раиков, *Karl Ernst von Baer, 1792-1876* (1968; перевод с русского)^[5] и Ludwig Stieda, *Karl Ernst von Baer*, 2nd ed. (1886). Во всех этих книгах обширные библиографические списки. См. также книгу: S. Gould, *Ontogeny and Phylogeny* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1977), в которой обсуждаются открытые Бэром законы.

Эксперименты Шпемана и Мангольд обсуждаются в учебниках по эмбриологии, например в книге: S. Gilbert, *Developmental Biology*, 8th ed. (Sunderland, Mass.: Sinauer Associates, 2006). Взгляд на участок-организатор в свете достижений современной генетики см. в статьях: De Robertis, E. M. (2006) Spemann's organizer and self-regulation in amphibian embryos, *Nature Reviews* 7:296-302 и De Robertis, E. M., and Arecheaga, J. The Spemann Organizer: 75 years on, *International journal of Developmental Biology* 45 (специальный выпуск).

Чтобы познакомиться с обширной литературой, посвященной Нохгенам и их роли в эволюции, лучше всего начать с книги: S. Carroll, *Endless Forms Most Beautiful* (New York: Norton, 2004). Обзор и обсуждение того, как гены помогают нам в поисках общего предка всех двусторонне-симметричных животных, представлены в недавней публикации: Erwin, D., and Davidson, E. H. (2002) The last common bilaterian ancestor, *Development* 129:3021-3032.

В ряде работ высказывается идея, что генетический "переключатель", определивший разницу между планом строения членистоногих и позвоночных, сработал в довольно далеком прошлом. Эта идея обсуждается, например, в статье: De Robertis, E., and Sasai, Y.

(1996) A common plan for dorsoventral patterning in Bilateria, *Nature* 380:37-40. Об исторической роли воззрений Жоффруа Сент-Илера и о научной полемике, сопровождавшей первые годы развития сравнительной анатомии, можно прочитать в книге: T. Appel, *The Cuvier-Geoffroy Debate: French Biology in the Decades Before Darwin* (New York: Oxford University Press, 1987). Однако данные по кишечнодышащим беспозвоночным с трудом укладываются в эту модель и, по-видимому, указывают на то, что в некоторых систематических группах сходная схема зависимости между активностью генов и формированием оси тела могла развиваться независимо. Этот вывод сделан в статье: Lowe, S. L., et al. (2006) Dorsoventral patterning in hemichordates: insights into early chordate evolution, *PLoS Biology* (онлайн-журнал): <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pbio.004029>.

Обзор работ по эволюции генов, определяющих оси тела, представлен в статье: Martindale, M. Q. (2005) The evolution of metazoan axial properties, *Nature Reviews Genetics* 6:917-927. Гены плана строения тела у кишечнотелых (медуз, актиний и их родственников) обсуждаются в ряде первоисточников: Martindale, M. Q., Finnerty, J. R., and Henry, J. (2002) The Radiata and the evolutionary origins of the bilaterian body plan, *Molecular Phylogenetics and Evolution* 24:358-365; Matus, D. Q., Pang, K., Marlow, H., Dunn, C., Thomsen, G., and Martindale, M. (2006) Molecular evidence for deep evolutionary roots of bilaterality in animal development, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103:11195-11200; Chouruout, D., et al. (2006) Minimal prothox cluster inferred from bilaterian and cnidarian *Hox* components, *Nature* 442:684-687; Martindale, M., Pang, K., and Finnerty, J. (2004) Investigating the origins of triploblasty: "mesodermal" gene expression in a diploblastic animal, the sea anemone *Nemostella vectensis* (phylum, Cnidaria; class, Anthozoa), *Development* 131:2463-2474; Finnerty, J., Pang, K., Burton, P., Paulson, D., and Martindale, M. Q. (2004) Deep origins for bilateral symmetry: *Hox* and *Dpp* expression in a sea anemone, *Science* 304:1335-1337.

Глава 7. Приключения с бодибилдингом

Происхождению и эволюции многоклеточных организмов в свете достижений генетики, геологии и экологии посвящены три важнейших обзорных статьи: King, N. (2004) The unicellular ancestry of animal development, *Developmental Cell* 7:313-325; Knoll, A. H., and Carroll, S. B. (1999) Early animal evolution: Emerging views from comparative biology and geology, *Science* 284:2129-2137; Brooke, N. M., and Holland, P. (2003) The evolution of multicellularity and early animal genomes, *Current Opinion in Genetics and Development* 13:599-603. В этих трех статьях приведены ссылки на основные литературные источники, и все вместе они могут послужить хорошим введением в вопросы, обсуждаемые в этой главе.

К основополагающим исследованиям, посвященным последствиям возникновения многоклеточных организмов и других новых форм биологической организации, относятся книги: L. W. Buss, *The Evolution of Individuality* (Princeton: Princeton University Press, 2006) и J. Maynard Smith and E. Szathmary, *The Major Transitions in Evolution* (New York: Oxford University Press, 1998).

История открытия и изучения эдиакарских животных рассказана, со ссылками на источники, в книгах: R. Fortey, *Life: A Natural History of the First Four Billion Years of Life on Earth* (New York: Knopf, 1998) и A. Knoll, *Life on a Young Planet* (Princeton: Princeton University Press, 2002).

Эксперимент, в котором из одноклеточных организмов сформировались "протомногоклеточные", описан в статье: Boraas, M. E., Seale, D. B., and Voxhorn, J. (1998) Phagotrophy by a flagellate selects for colonial prey: A possible origin of multicellularity, *Evolutionary Ecology* 12:153-164.

Глава 8. Курс на запах

Университет штата Юта поддерживает замечательный сайт Learn.Genetics ("Учите.генетику"), на котором представлен удивительно простой кухонный рецепт выделения ДНК, по адресу: <http://learn.genetics.utah.edu/units/activities/extraction/>.

Эволюции так называемых генов обоняния, или, точнее, генов обонятельных рецепторов, посвящено немало литературы. Вот ссылка на основополагающую статью Бак и Акселя: Buck, L., and Axel, R. (1991) A novel multigene family may encode odorant receptors: a molecular basis for odor recognition, *Cell* 65:175-181.

Сравнительные аспекты эволюции обонятельных генов обсуждаются в статьях: Young, V., and Trask, B. J. (2002) The sense of smell: genomics of vertebrate odorant receptors, *Human Molecular Genetics* 11:1153-1160 и Mombaerts, P. (1999) Molecular biology of odorant receptors in vertebrates, *Annual Review of Neuroscience* 22:487-509.

Гены обонятельных рецепторов бесчелюстных позвоночных обсуждаются в статье: Freitag, J., Beck, A., Ludwig, G., von Buchholtz, L., and Breer, H. (1999) On the origin of the olfactory receptor family: receptor genes of the jawless fish (*Lampetra fluviatilis*), *Gene* 226:165-174. Различия между генами водных и воздушных обонятельных рецепторов описаны в статье: Freitag, J., Ludwig, G., Andreini, I., Rossler, P., and Breer, H. (1998) Olfactory receptors in aquatic and terrestrial vertebrates, *Journal of Comparative Physiology A* 183:635-650.

Эволюция человеческих обонятельных рецепторов обсуждается в ряде статей. Вот подборка из тех, в которых отражены обсуждаемые в этой главе вопросы: Gilad, Y., Man, O., and Lancet, D. (2003) Human specific loss of olfactory receptor genes, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100:3324-3327; Gilad, Y., Man, O., and Glusman, G. (2005) A comparison of the human and chimpanzee olfactory receptor gene repertoires, *Genome Research* 15:224-230; Menashe, I., Man, O., Lancet, J., and Gilad, Y. (2003) Different noses for different people, *Nature Genetics* 34:143-144; Gilad, Y., Wiebe, V., Przeworski, M., Lancet, D., and Paabo, S. (2003) Loss of olfactory receptor genes coincides with the acquisition of full trichromatic vision in primates, *PLoS Biology* (онлайн-журнал): <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pbio.0020005>.

Представление о том, что дупликация (удвоение) генов служит

важным источником новой генетической изменчивости, восходит к основополагающей работе, опубликованной 40 лет назад: S. Ohno, *Evolution by Gene Duplication* (New York: Springer-Verlag, 1970). Недавно была опубликована обзорная статья на эту тему, в которой обсуждаются как гены олеинов, так и гены обонятельных рецепторов: Taylor, J., and Raes, J. (2004) Duplication and divergence: the evolution of new genes and old ideas, *Annual Review of Genetics* 38:615-643.

Глава 9. Зрение

Роль генов опсинов в эволюции глаз обсуждается в ряде работ последних лет. Обзоры, посвященные принципам работы и результатам эволюции генов опсинов, содержатся в следующих статьях: Nathans, J. (1999) The evolution and physiology of human color vision: insights from molecular genetic studies of visual pigments, *Neuron* 24:299-312; Dominy, N., Svenning, J. C., and Li, W. H. (2003) Historical contingency in the evolution of primate color vision, *Journal of Human Evolution* 44:25-45; Tan, Y., Yoder, A., Yamashita, N., and Li, W. H. (2005) Evidence from opsin genes rejects nocturnality in ancestral primates, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102:14712-14716; Yokoyama, S. (1996) Molecular evolution of retinal and nonretinal opsins, *Genes to Cells* 1:787-794; Dulai, K., von Dornum, M., Mollon, J., and Hunt, D. M. (1999) The evolution of trichromatic color vision by opsin gene duplication in New World and Old World primates, *Genome* 9:629-638.

Результаты исследований Детлева Арендта и Йоахима Виттбротта, посвященных светочувствительным тканям, были впервые опубликованы в следующем первоисточнике: Arendt, D., Tessmar-Raible, K., Synman, H., Dorresteyn, A., and Wittbrodt, J. (2004) Ciliary photoreceptors with a vertebrate-type opsin in an invertebrate brain, *Science* 306:869-871. В том же номере журнала *Science* был опубликован популярный комментарий к этой статье: Pennisi, E. (2004) Worm's light-sensing proteins suggest eye's single origin, *Science* 306:796-797. В опубликованной ранее обзорной статье Арендт излагает систему представлений, которую он использовал для интерпретации своего открытия: Arendt, D. (2003) The evolution of eyes and photoreceptor cell types, *International Journal of Developmental Biology* 47:563-571. Последующие комментарии к этому открытию можно найти в работе: Plachetzki, D. C., Serb, J. M., Oakley, T. H. (2005) New insights into photoreceptor evolution, *Trends in Ecology and Evolution* 20:465-467. Новые комментарии двух других авторов (Bernd Frizsch and Joram Piatigorsky) к результатам, полученным Арендтом и Виттброттом, были опубликованы в последующем выпуске журнала *Science*. В этих комментариях обсуждается идея, что глаза могли впервые возникнуть уже у очень древних животных, то есть их историю можно проследить вплоть до очень ранних разветвлений эволюционного древа животных.

Этот текст можно найти в журнале *Science* (2005) 308:1113-1114.

Обзор исследований Вальтера Геринга, посвященных гену Pax 6, и их значения для нашего понимания эволюции глаз был подготовлен самим этим автором: Gehring, W. (2005) New perspectives on eye development and the evolution of eyes and photoreceptors, *Journal of Heredity* 96:171-184.

К работам, в которых рассматриваются различные возможные связи между слабо изменяющимися в ходе эволюции генами, управляющими формированием глаз, и эволюцией зрения, относятся следующие две статьи: Oakley, T. (2003) The eye as a replicating and diverging modular developmental unit, *Trends in Ecology and Evolution* 18:623-627 и Nilsson, D. — E. (2004) Eye evolution: a question of genetic promiscuity, *Current Opinion in Neurobiology* 14:407-414.

Связь между белками хрусталика человеческого глаза и глазами личинки асцидии обсуждается в статье: Shimeld, S., Purkiss, A. G., Dirks, R. P. H., Bateman, O., Slingsby, C., and Lubsen, N. (2005) Urochordate by-crystallin and the evolutionary origin of the vertebrate eye lens, *Current Biology* 15:1684-1689.

Глава 10. Уши

Генетические основы эволюции внутреннего уха обсуждаются в статье: Beisel, K. W., and Frizsch, B. (2004) Keeping sensory cells and evolving neurons to connect them to the brain: molecular conservation and novelties in vertebrate ear development, *Brain Behavior and Evolution* 64:182-197. Развитие уха и управляющие им гены обсуждаются в работе: Represa, J., Frenz, D. A., Van de Water, T. (2000) Genetic patterning of embryonic ear development, *Acta Otolaryngologica* 120:5-10.

Преобразованию подвеска в стремечко посвящены многие страницы в обзорных книгах об эволюции древних рыб и о происхождении наземных позвоночных: J. Clack, *Gaining Ground* (Bloomington: Indiana University Press, 2002); P. Janvier, *Early Vertebrates* (Oxford, Eng.: Oxford University Press, 1996). Этот вопрос также обсуждается в некоторых новых исследованиях последних лет, в том числе в статьях: Clack, J. A. (1989) Discovery of the earliest known tetrapod stapes, *Nature* 342:425-427; Brazeau, M., and Ahlberg, P. (2005) Tetrapod-like middle ear architecture in a Devonian fish, *Nature* 439:318-321.

Происхождение косточек среднего уха млекопитающих, с точки зрения историка науки, обсуждается в книге: P. Bowler, *Life's Splendid Journey* (Chicago: University of Chicago Press, 1996). К основным первоисточникам по этому вопросу относятся следующие статьи: Reichert, C. (1837) Uber die Visceralbogen der Wirbeltiere im allgemeinen und deren Metamorphose bei den Vogel und Säugetieren, *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medizin* 1837:120-222; Gaupp, E. (1911) Beiträge zur Kenntnis des Unterkiefers der Wirbeltiere I. Der Processus anterior (Folii) des Hammers der Sauger und das Goniale der Nichtsauger, *Anatomischer Anzeiger* 39:97-135; Gaupp, E. (1911) Beiträge zur Kenntnis des Unterkiefers der Wirbeltiere II. Die Zusammensetzung des Unterkiefers der Quadrupeden, *Anatomischer Anzeiger* 39:433-473; Gaupp, E. (1911) Beiträge zur Kenntnis des Unterkiefers der Wirbeltiere III. Das Problem der Entstehung eines "sekundären" Kiefergelenkes bei den Säugetieren, *Anatomischer Anzeiger* 39:609-666; Gregory, W. K. (1913) Critique of recent work on the morphology of the vertebrate skull, especially in relation to the origin of mammals, *Journal of Morphology* 24:1-42.

К важнейшим источникам по проблеме происхождения челюстей, прикуса и состоящего из трех косточек среднего уха млекопитающих

относятся статьи: Crompton, A. W. (1963) The evolution of the mammalian jaw, *Evolution* 17:431-439; Crompton, A. W., and Parker, P. (1978) Evolution of the mammalian masticatory apparatus, *American Scientist* 66:192-201; Hopson, J. (1966) The origin of the mammalian middle ear, *American Zoologist* 6:437-450; Allin, E. (1975) Evolution of the mammalian ear, *Journal of Morphology* 147:403-438.

Происхождение генов *Pax 2* и *Pax 6* и эволюционная связь между ушами и глазами, выявленная при изучении кубомедуз, обсуждаются в статье: Piatigorsky, J., and Kozmik, Z. (2004) Cubozoan jellyfish: an evo/devo model for eyes and other sensory systems, *International Journal for Developmental Biology* 48:719-729.

Связи рецепторных молекул в органах чувств с различными молекулами бактерий обсуждаются в статье: Kung, C. (2005) A possible unifying principle for mechanosensation, *Nature* 436:647-654.

Глава 11. Что все это значит

Методы филогенетической систематики (кладистики) обсуждаются во многих книгах и статьях. К важнейшим первоисточникам относится классическая работа Вилли Хеннига, первоначально опубликованная на немецком языке: W. Hennig, *Grundzuge einer Theorie der phylogenetischen Systematik* (Berlin: Deutscher Zentralverlag, 1950), а через шестнадцать лет вышедшая и в английском переводе: W. Hennig, *Phylogenetic Systematics*, transl. by D. D. Davis and R. Zangerl (Urbana: University of Illinois Press, 1966).

Методы филогенетических реконструкций, о которых идет речь в этой главе, подробно обсуждаются в книгах: P. Forey, ed., *Cladistics: A Practical Course in Systematics* (Oxford, Eng.: Clarendon Press, 1992); D. Hillis, C. Moritz, and B. Mable, eds., *Molecular Systematics* (Sunderland, Mass.: Sinauer Associates, 1996); R. DeSalle, G. Girbet, and W. Wheeler, *Molecular Systematics and Evolution: Theory and Practice* (Basel: Birkhauser Verlag, 2002).

Подробное обсуждение такого явления, как независимое возникновение в ходе эволюции похожих признаков у разных организмов, можно найти в книге: M. Sanderson and L. Huffort, *Homoplasy: The Recurrence of Similarity in Evolution* (San Diego: Academic Press, 1996).

Чтобы увидеть древо жизни и узнать о различных гипотезах, касающихся степеней родства современных живых организмов, см. сайт: <http://tolweb.org/tree/>.

Медицинскому значению нашей эволюционной истории посвящены несколько хороших книг, изданных в последние годы. К наиболее подробным источникам, содержащим ссылки на все основные работы по этому вопросу, относятся следующие книги: N. Boaz, *Evolving Health: The Origin of Illness and How the Modern World Is Making Us Sick* (New York: Wiley, 2002); D. Mindell, *The Evolving World: Evolution in Everyday Life* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2006); R.M. Nesse and G. C. Williams, *Why We Get Sick: The New Science of Darwinian Medicine* (New York: Vintage, 1996); W. R. Trevathan, E. O. Smith, and J. J. McKenna, *Evolutionary Medicine* (New York: Oxford University Press, 1999).

Пример с синдромом ночного апноэ я узнал от Нино Рамиреса (Nino Ramirez), председателя отделения анатомии Чикагского университета.

Пример с икотой взят из статьи: Straus, C., et al. (2003) A phylogenetic hypothesis for the origin of hiccoughs, *Bioessays* 25:182-188. Искусственное вызывание у бактерий мутации, свойственной человеческим митохондриям, обсуждается в статье, где эти результаты были впервые опубликованы: Luciola, S., et al. (2006) Introducing a novel human mtDNA mutation into the *Paracoccus denitrificans* COX 1 gene explains functional deficits in a patient, *Neurogenetics* 7:51-57.

Интернет-ресурсы

Дополнительные сведения по обсуждаемым в этой книге вопросам можно также найти на следующих сайтах, заслуживающих доверия и регулярно обновляющихся.

<http://www.ucmp.berkeley.edu/>. Сайт Палеонтологического музея Калифорнийского университета в Беркли — один из лучших интернет-ресурсов по палеонтологии и эволюции. Он постоянно совершенствуется и обновляется.

<http://www.scienceblogs.com/loom/>. Блог Карла Зиммера — прекрасно написанный, регулярно обновляющийся и очень толковый источник сведений и обсуждений по вопросам эволюции.

<http://www.scienceblogs.com/pharyngula/>. Понятный, информативный и содержащий новейшие сведения блог профессора Пола Закари Майерса, специалиста по биологии развития.

Блоги Зиммера и Майерса находятся на сайте <http://www.scienceblogs.com/>, где есть и немало других замечательных блогов, которые также могут служить хорошим источником сведений и комментариев, касающихся недавних научных открытий. Вот еще несколько расположенных здесь блогов, имеющих отношение к предмету этой книги: Afarensis, Tetrapod Zoology, Evolving Thoughts и Gene Expression.

<http://tolweb.org/tree/>. Сайт проекта "Древо жизни" содержит регулярно обновляющуюся информацию о родстве между всеми группами живых организмов. Подобно сайту Палеонтологического музея Калифорнийского университета в Беркли, этот ресурс тоже можно с успехом использовать, чтобы больше узнать о реконструкции и интерпретации эволюционных деревьев.

Благодарности

Все иллюстрации, кроме отмеченных особо, выполнила Капи (Каллиопи) Монойос (www.kalliopimonoyios.com). Капи читала черновые варианты рукописи этой книги и не только помогла улучшить ее текст, но и создала иллюстрации, очень к нему подходящие. Мне очень повезло, что довелось работать с таким разносторонне одаренным человеком. Скотт Ролинс (Университет Аркадия) щедро поделился со мной своим прекрасным рисунком плавника *Sauripterus*, воспроизведенным во второй главе. Тед Дешлер (Академия естественных наук Филадельфии) любезно предоставил сделанные им превосходные фотографии знаменитого экземпляра "С" нашего тиктаалика. Я также признателен Филипу Донохью (Бристольский университет) и Марку Пернеллу (Лестерский университет) за позволение воспроизвести их реконструкцию зубной системы конодонта, руководству издательства "McGraw-Hill" — за позволение перепечатать иллюстрацию из учебника, с которой и началась наша охота на тиктаалика, и Стивену Кампане из Канадской лаборатории исследования акул — за фотографии внутренних органов акулы.

Студенты, изучающие анатомию, особенно обязаны людям, которые завещают свои тела для исследований, давая нам возможность изучать на них устройство человеческого организма. Шанс работать с настоящими человеческими телами — опыт уникальный и бесценный и большая честь для нас. Проводя долгие часы в анатомической лаборатории, мы чувствуем свою глубокую связь с теми людьми, которые оставили нам свои тела и сделали этот опыт возможным. Когда я работал над книгой, я вновь почувствовал эту связь.

Идеи, которые я здесь излагаю, восходят корнями к моим исследованиям и к моей работе преподавателя. Студенты от первокурсников до аспирантов, слишком многочисленные, чтобы всех их назвать, сыграли свою роль в появлении мыслей, высказанных на страницах этой книги.

Я также весьма обязан коллегам, с которыми мне довелось работать за многие годы. Джейсон Дауне, Тед Дешлер, Фэриш Дженкинс-младший, Фред Маллисон, Пол Олсен, Чак Шафф и Уильям (Билл) Эмарал — все они герои рассказанных здесь историй. Без этих людей у меня не было бы тех запасов опыта, которыегодились мне при

написании книги, а кроме того, без них моя жизнь была бы совсем не такой интересной. Сотрудники моей лаборатории в Чикаго — Эндрю Гиллис, Рэндалл Дан, Маркус Дейвис, Кристиан Каммерер, Каллиопи Монойос, Адам Франссен и Бекки Ширман — не только повлияли на мои мысли, но и перетерпели тот период, когда я меньше времени проводил в лаборатории, работая над этой книгой.

Многие коллеги потратили свое время на то, чтобы предоставить мне нужные для книги сведения или прокомментировать текст ее рукописи. Это, в частности, Камла Алувалия, Эндрю Гиллис, Ланс Гранде, Элизабет Гроув, Рэндалл Дан, Маркус Дейвис, Анна Ди-Риенцо, Джон Зеллер, Бетти Катсарос, Майкл Коутс, Шон Кэрролл, Майкл Ла-Барбера, Крис Лоу, Дэниел Марголиаш, Каллиопи Монойос, Джонатан Притчард, Вики Принс, Клифф Рэгсдейл, Нино Рамирес, Каллум Росс, Ави Стоппер, Клифф Тейбин, Николас Хастопулос и Роберт Хо. Многие административные дела мне помог уладить Хайтам Абу-Заид. Мои собственные учителя, Фэриш Дженкинс-младший и Ли Герке, которые преподавали мне анатомию в ходе совместной программы Гарварда и Массачусетского технологического института, привили мне интерес, который ничуть не угас более чем за двадцать лет.

Карл Зиммер и Шон Кэрролл давали мне бесценные советы на начальном этапе работы над этим проектом и затем вдохновляли меня на всем ее протяжении.

Публичная библиотека Уэллфлита (штат Массачусетс) была для меня уютным домом и незаменимым местом уединения, где были написаны многие страницы этой книги. Благодаря краткому пребыванию по работе в Американской академии в Берлине я попал в среду, которая сыграла ключевую роль в завершении моей рукописи.

Оба моих начальника — доктор медицины Джеймс Мадара (генеральный директор Медицинского центра, а также вице-президент по медицинским делам и профессор отдела биологических наук Школы медицины Притцкера Чикагского университета) и Джон Маккартер-младший (генеральный директор Музея Филда) — поддерживали и сам этот проект, и те исследования, которые легли в его основу. Я всегда был несказанно рад возможности работать под началом таких понимающих и проникательных людей, как они.

Мне повезло преподавать в Чикагском университете и иметь возможность взаимодействовать с руководством университетской Школы медицины Притцкера. Деканы Холли Хамфри и Халина Брукнер благосклонно приняли в свою команду палеонтолога. Взаимодействуя с

ними, я смог по-настоящему оценить такое непростое и важное дело, как базовое медицинское образование.

Мне всегда было отрадно сотрудничать с Музеем Филда в Чикаго, где мне довелось работать с уникальной группой людей, преданно служащих развитию науки, претворению научных знаний в жизнь и их распространению в обществе. Среди этих коллег были, в частности, Элизабет Бабкок, Джозеф Бреннан, Шон Ван-Дерзиел, Ланс Гранде, Шила Коли, Джим Крофт, Дебра Московитс, Лора Сэдлер, Диана Уайт, Мелисса Хилтон и Эд Хорнер. Кроме того, за поддержку, советы и ободрение я благодарен руководителям Комитета по науке Совета попечителей Музея Филда — Джеймсу Александеру и Адели Симмонс.

Я в долгу перед моим литературным агентом, Катинкой Мэтсон, которая помогла мне превратить замысел этой книги в предложение от издателя и затем помогала советами по ходу всей работы. Большой честью для себя я считаю возможность работать с Марти Эшлером, моим редактором. Как терпеливый учитель, он всегда поддерживал мои силы питательной смесью советов, потраченного времени и ободрения, которая очень помогала мне на моем пути. Закари Уэгман оказывал этому проекту неоценимую помощь щедрым расходом времени, острым редакторским взглядом и ценным советом. Дэн Фрэнк высказал ряд важных идей, которые помогли мне увидеть свой рассказ в новом свете. Джоланта Бенал, корректор, сделала мой текст неизмеримо лучше, чем он был первоначально. Я также благодарен Эллен Фельдман, Кристен Бирс и всей команде, усердно работавшей над этой книгой и обеспечившей ее публикацию в отведенный на это короткий срок.

Мои родители, Глория и Сеймур Шубины, всегда знали, что я напишу книгу, даже когда я сам этого еще не знал. Сомневаюсь, что мне удалось бы выдать из себя хоть единое слово без их поддержки и неизменной веры в меня.

Моя жена, Мишель Зайдль, и наши дети, Натаниэл и Ханна, жили бок о бок с рыбами — и с тиктааликом, и с этой книгой — в течение почти двух лет. Мишель прочла и прокомментировала каждую страницу черновых вариантов рукописи и всегда поддерживала меня, терпеливо перенося мое отсутствие на выходных, когда я работал над книгой. Ее терпение и любовь сделали появление этой книги возможным.

Notes

1

Диаметр монеты в четверть доллара — около 2,5 см. — *Примеч. перев.*

Происхождение, сопровождаемое модификацией (*descent with modification*), — термин, которым Дарвин называл в книге "Происхождение видов" то, что сегодня обычно называют биологической эволюцией. — *Примеч. перев.*

Русский перевод: Р. Кэрролл. Палеонтология и эволюция позвоночных в 3-х томах (М.: Мир, 1992). — *Примеч. перев.*

Русский перевод более раннего издания: С. Гилберт. Биология развития в 3-х томах (М.: Мир, 1995). — *Примеч. перев.*

Оригинал: Б. Е. Райков. Карл Бэр, его жизнь и труды (М.; Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1961). — *Примеч. перев.*