

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. Изящество 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 за-

быть, 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.

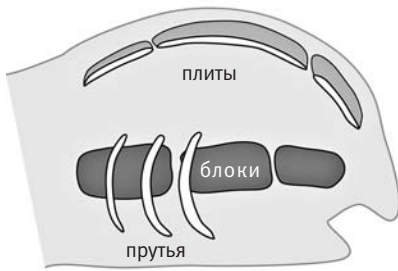
Наш череп состоит из трех основных частей: “плит”, “блоков” и “прутьев”. Плиты закрывают собой наш мозг. Их можно нащупать, если похлопать себя по голове. Эти довольно крупные плиты соединены друг с другом как детали пазла и составляют значительную часть черепа. У новорожденных они отделены друг от друга. 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.

обобщенная голова



наша голова



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 отчая-

ние. 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 мышца-

ми — 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, пытаясь 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 электриче-

ской 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 струк-

туры, 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 разо-

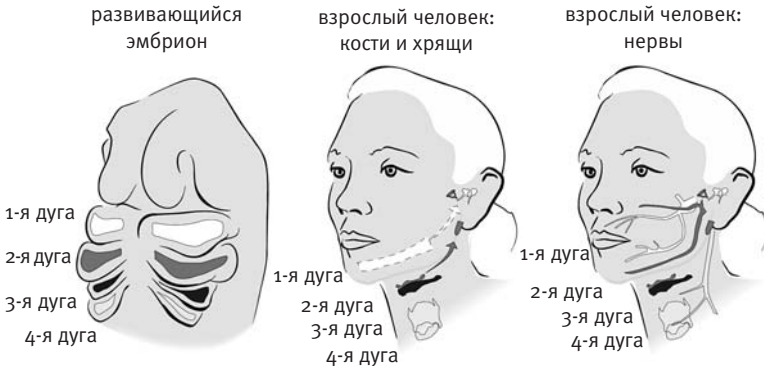
вляются кости, мышцы и нервы, расположенные глубже в горле, — мы используем их, когда глотаем. Наконец, из четвертой дуги возникнут самые глубокие структуры горла, в том числе части гортани, а также мышцы и сосуды, окружающие гортань и помогающие ее работе.

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 незамеченный 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, подчиня-

ются 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 груды 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. Это была поистине революционная идея, открывшая, что в основе строения черепа и позвоночни-



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.

ка 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 врож-

денным 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

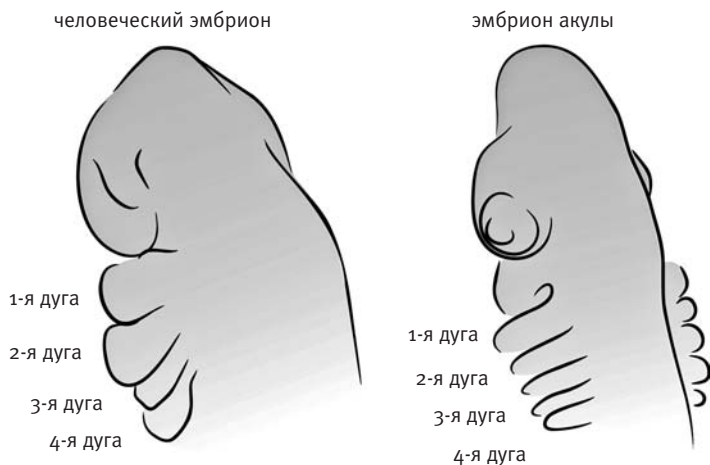
Есть немало анекдотов про адвокатов, суть которых в том, что адвокаты — это особо ненасытная разновидность акул. Когда я преподавал эмбриологию, был популярен один из таких анекдотов, и мне подумалось, что этот анекдот про всех нас, а не только про адвокатов. Все мы видоизмененные акулы, или, иначе говоря,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

дит 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 оттого, 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, составившими 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



Передний конец человеческого эмбриона на ранних стадиях развития мало чем отличается от переднего конца эмбриона акулы.

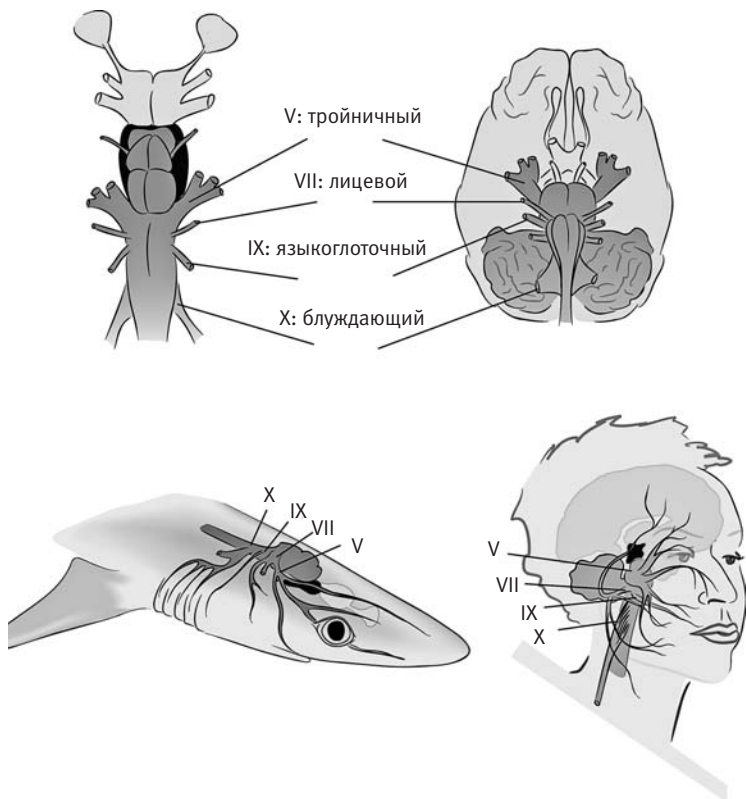
внутри этих дуг. Заглянув внутрь, мы можем по пунктам сравнить нашу голову с головой акулы и увидеть их глубинное сходство.

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.

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 опо-



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.

рой 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 *Hox*-генов. В каждой жаберной дуге задейство-

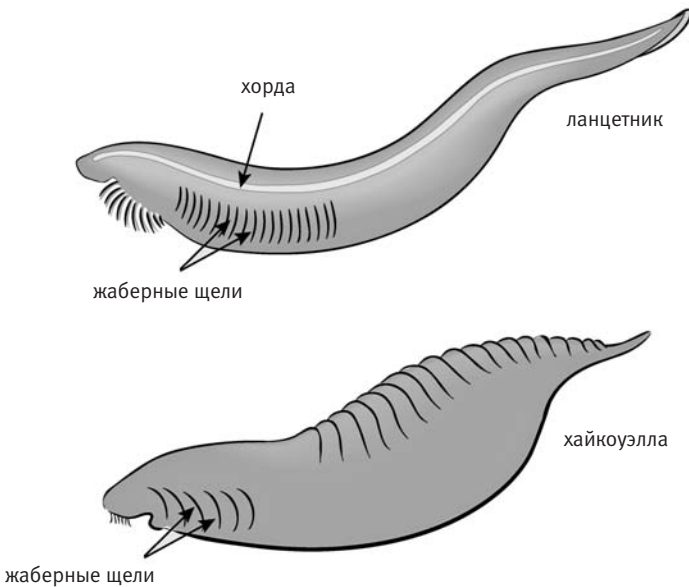
ван разный набор этих генов. Обладая соответствующей информацией, мы можем составить карту наших жаберных дуг и созвездий из генов, задействованных в развитии каждой из них.

После этого можно приступить к экспериментам. Заменим 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. Так вот, ланцетник, с одной стороны, беспозвоночное, что-то вроде червя, а с другой стороны, он обладает многими общи-



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.

ми 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.

ненные, генов многи. 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 свидетеля эволюции.

Но ведь люди чувствуют запахи, так почему же у нас выключено так много генов обоняния? На этот вопрос ответили Иоав Гилад и его коллеги, сравнив гены разных приматов. Гилад обнаружил, что приматы, у которых развито цветковое 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 ненужностью.

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 отпечаталось 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?

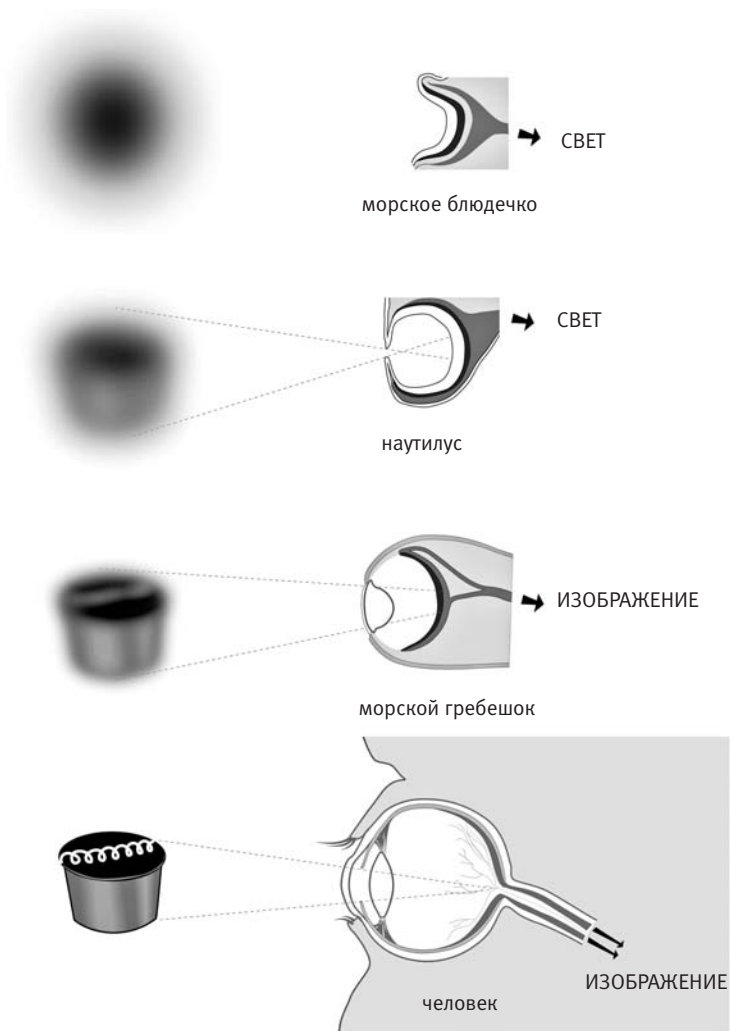
История человеческих глаз во многом напоминает историю автомобилей. Возьмем, к примеру, “шевроле-корвет”. Мы можем проследить историю этой модели в целом, а мо-

жем — 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 непроизвольным 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 наводит 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 подобию 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. Для этого нам нужно



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.

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 двусторчатых 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 исходим 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, имеющихся 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 цветовое 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 светоплавляющая 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 мутан-

ты 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. Мышиный 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 взглянуть в молекулы, ткани и гены, происходящие от микробов, медуз, червей и мух, в глазах можно разглядеть целый зверинец.

ГЛАВА 10

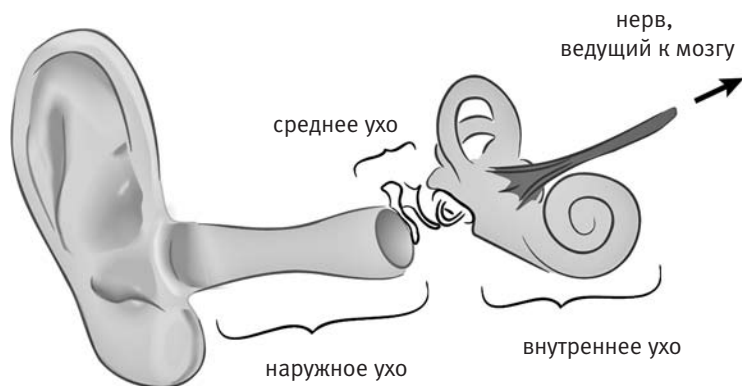
Уши

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 пере-

понки 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. Волосистой кожей 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 стремечку 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 аме-

риканский 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.

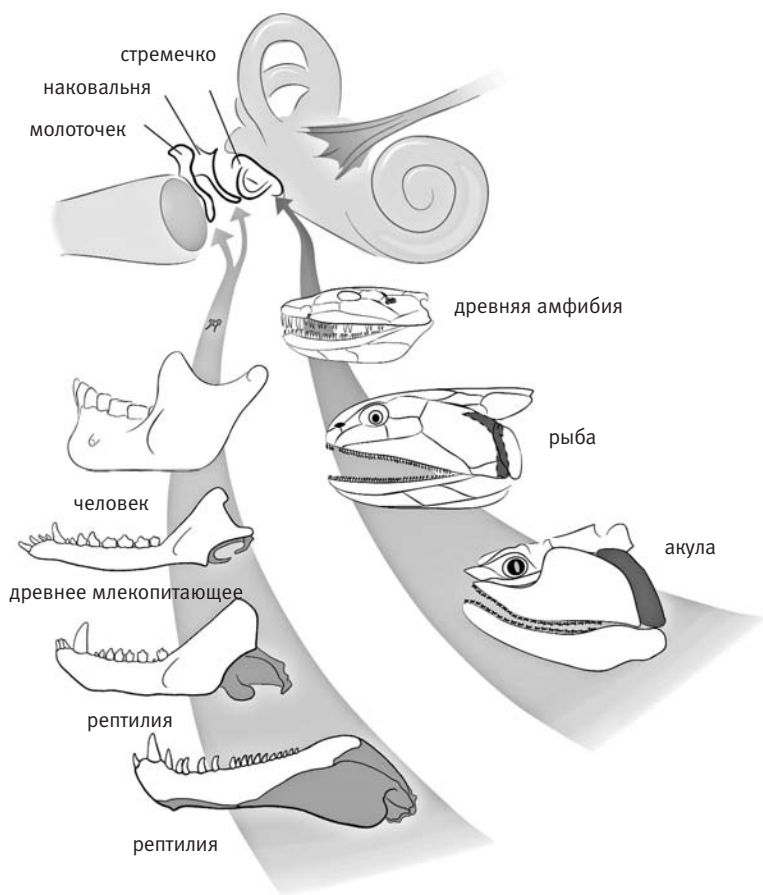
Вот, оказывается, откуда возникли молоточек и наковальня. Но откуда, в свою очередь, появилось стремечко?

Если бы я просто показал вам, как устроены взрослый человек и акула, вы бы ни за что не догадались, что эта крошеч-

ная 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 обоим 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.

В нашем среднем ухе хранятся следы двух важнейших изменений в истории жизни на Земле. Возникновение стре-



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.

мечка — 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.

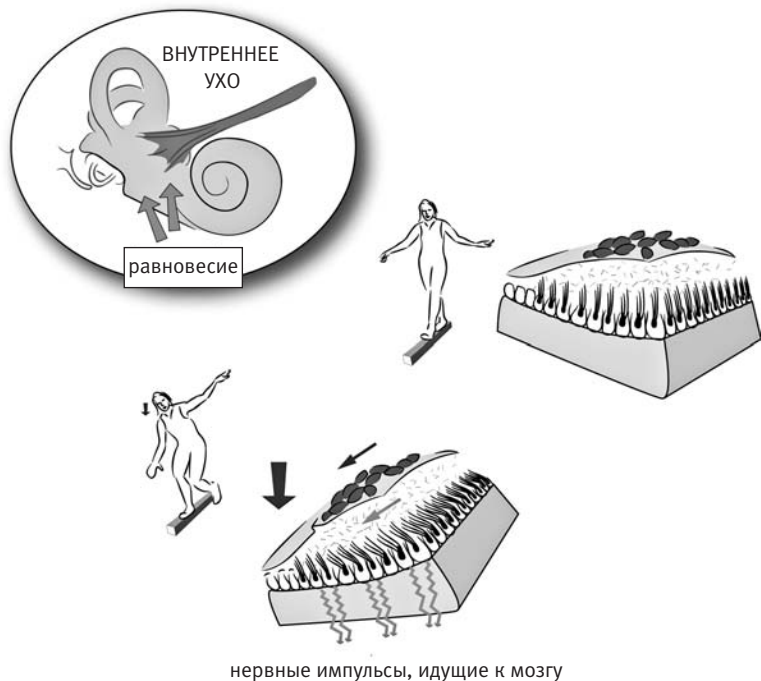
Давайте заглянем в ухо глубже — во внутреннее ухо.

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



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.

импульсы, и мозг получает информацию о звуках, а также о положении и ускорении головы.

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 кото-

рой, 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” оседают, 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.

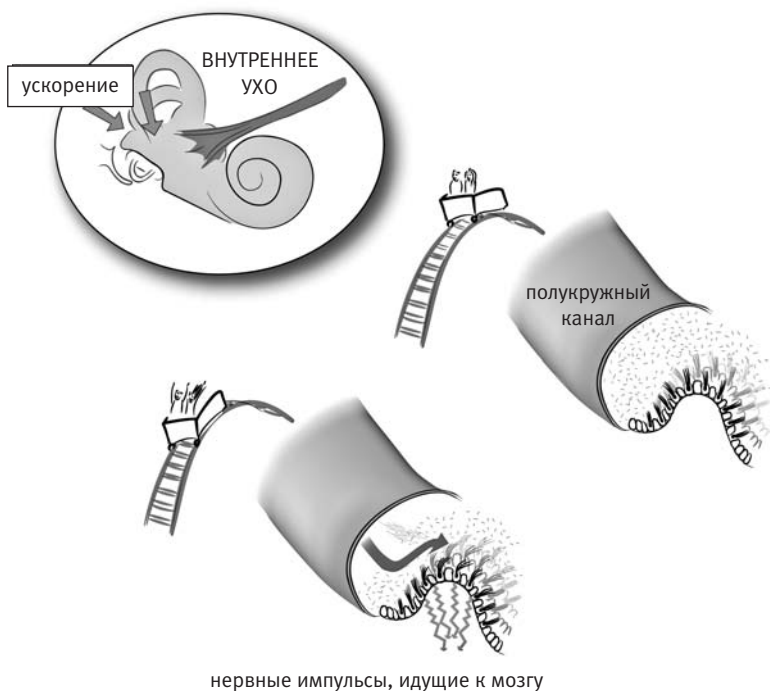
Дополнительную чувствительность этой системе придают лежащие на эластичной оболочке полости крошечные камушки. Когда мы наклоняем голову, перекатывающиеся в жидкой среде камушки давят на оболочку и усиливают движение заключенного в эту оболочку желеобразного вещества. За счет этого вся система становится 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 с 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.

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



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.

глазами, определенным образом сокращая эти мышцы, когда хотим посмотреть в какую-нибудь сторону, но самое необычное их свойство — это способность к произвольной 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 сбои, 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 мертвецки 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 непроизвольно 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 аку-

лы, 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, отвечаю-

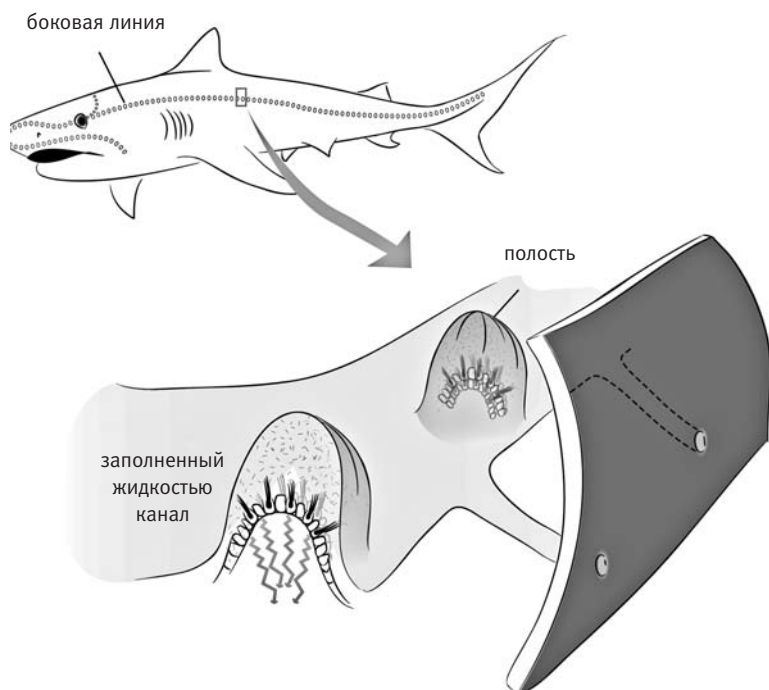
щая за слух, у нас очень большая и завитая, как улитка. У более примитивных организмов, таких как амфибии и рептилии, внутреннее ухо устроено проще и не завито в подобие улитки. Очевидно, наши прародители — древние млекопитающие — выработали новый, более эффективный орган слуха, чем был у их предков-рептилий. 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 волоски 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. Ген *Pax 2* работа-



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.

ет 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 плавает 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 демонстри-

ровали 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.

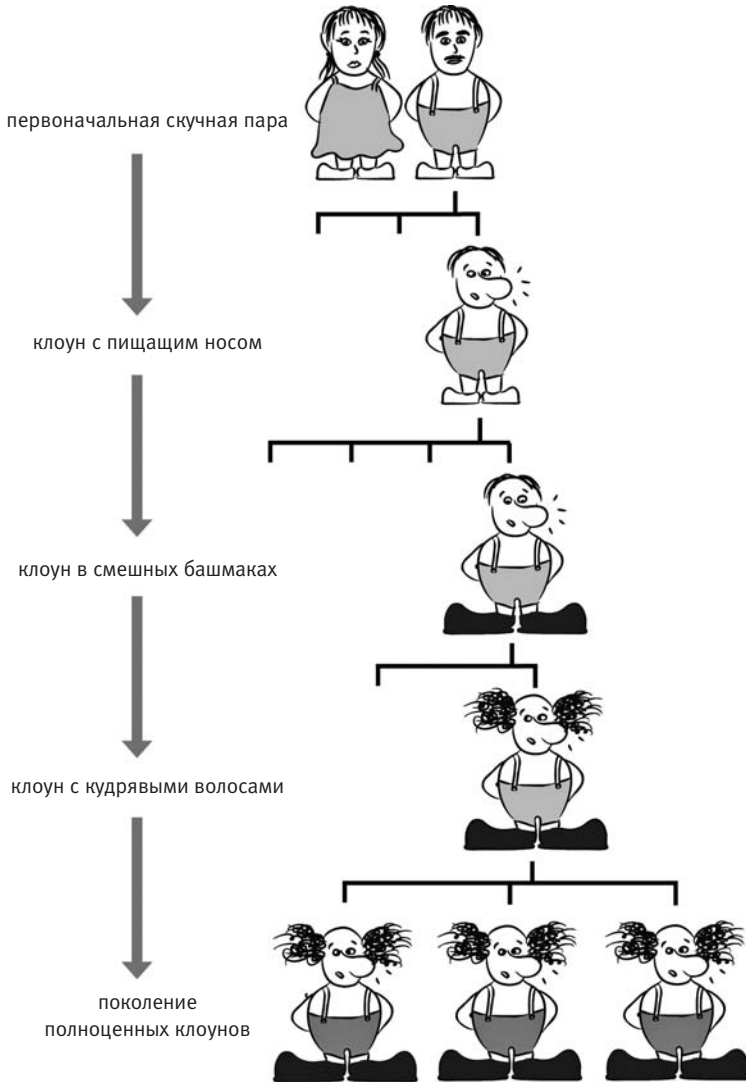
Сила этого закона именно в том, что он находит очень широкое применение. Вот она во всей своей красе: все мы суть модифицированные потомки наших родителей, или их генетической информации. Я потомок своего отца и своей матери, но я отличаюсь от них. Мои родители, в свою очередь, — модифицированные потомки 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 семидесятипятиуродный 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 модификацией², 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 пищущими 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 пищущим носом и шлепающими ступнями. Перейдем дальше еще на одно поколение. Представим себе, что один из детей этого поколения, правнук нашей скучной пары, получает в наследство еще одну мутацию — кудрявые ярко-рыжие воло-

2 Происхождение, сопровождаемое модификацией (*descent with modification*), — термин, которым Дарвин называл в книге “Происхождение видов” то, что сегодня обычно называют биологической эволюцией. — *Примеч. перев.*



Родословное древо клоунов.

сы. 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, непрямая, 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 так же, 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 Се-

верной 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 на-

шей 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 зайдем 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, бе-

лых 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, ка-

ковы 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 приходится 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, на-

сколько 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, трихоплаксов 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.

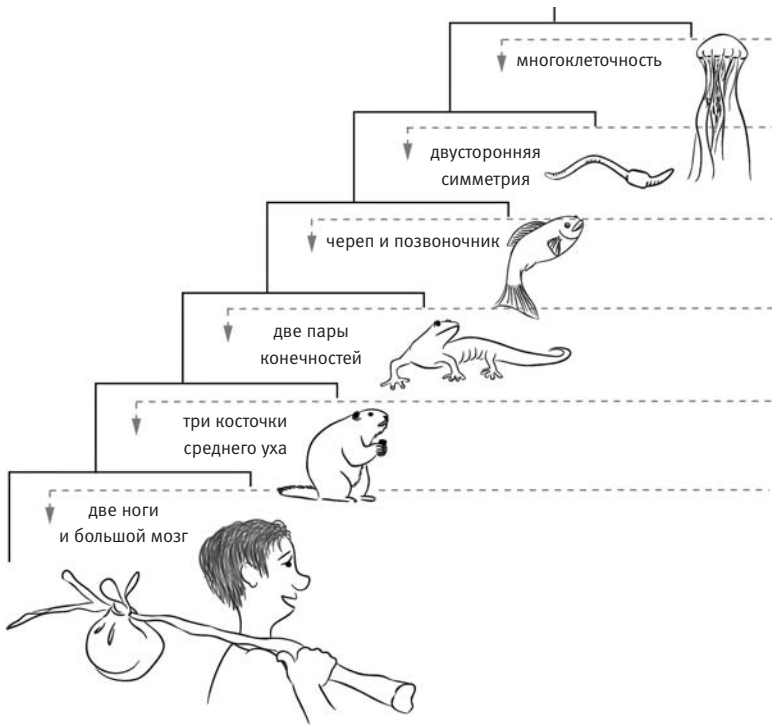
Подгруппа следующего ранга, в составе подгруппы двусторонне-симметричных многоклеточных животных, объединяет организмы, обладающие *черепом и позвоночником*. Их называют позвоночными животными.

Следующая подгруппа объединяет многоклеточных животных, двусторонне-симметричных, обладающих черепом и позвоночником, у которых к тому же есть *две пары конечностей*. Этим 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*. Этим 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*. Этим млекопитающих называют людьми.

Сила этого разделения на группы — в том множестве данных, которые лежат в его основе. Эту схему подтвержда-



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

ют 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, ес-

ли 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 цветовое 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 строе-ния рыбы, переоборудуем его, чтобы получить млекопитаю-щее, 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 преде-лов. 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 заканчи-вая раком.

Нигде наша история не проявляется так отчетливо, как в изгибах, извилах 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 по-том причудливо изогнуться и привести в совсем неожиданное место. Эти изгибы и извивы представляют собой поразитель-ные порождения нашего прошлого, которые, как нам предсто-ит убедиться, нередко создают нам проблемы, например та-кие, 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 противоре-чия между нашим прошлым и нашим человеческим настоящим означают, что наши тела обречены нередко ломаться опреде-ленным 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 древа 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 на-

шему 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 генотипа”. 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, стиму-

лируя 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 удается 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 головастика.

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 сбои. 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

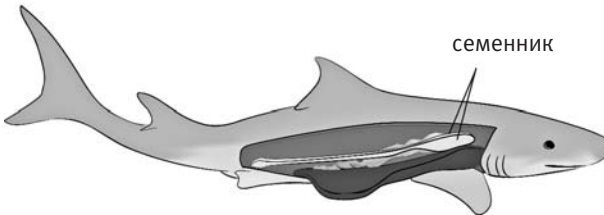
Наша предрасположенность к грыжам, по крайней мере к тем из них, что возникают в области паха, вызвана тем, что наш организм представляет собой бывшее рыбье тело, превращенное в тело млекопитающего.

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 распола-

гались 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. Этот механизм обеспечивает не-



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).

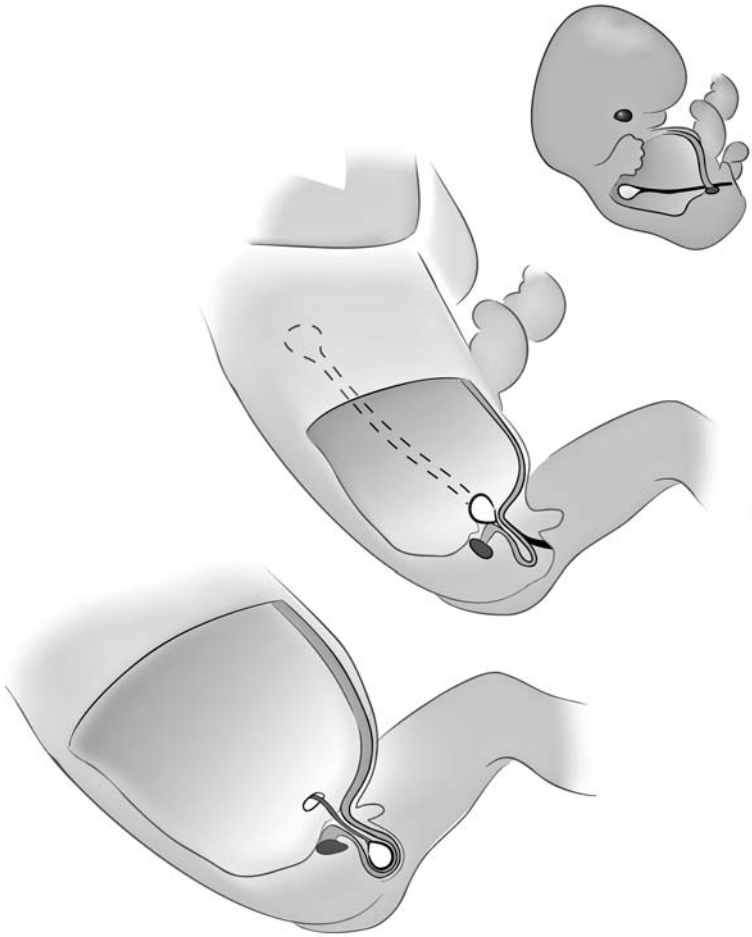
прерывное производство здоровых сперматозоидов при разных условиях среды.

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, — сверху, 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 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,



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.

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 са-

харов 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 разлагается. 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 получаются вода 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 изуче-

ния 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 му-

ха”, “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 — приходиться 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 поездопклонников 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 Андерс — 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 измене-

ния, 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: С. 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).

3 Русский перевод: Р. Кэрролл. *Палеонтология и эволюция позвоночных* в 3-х томах (М.: Мир, 1992). — Примеч. перев.

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: Т. 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. (Sunderland, 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. L., 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*

4 Русский перевод более раннего издания: С. Гилберт. *Биология развития* в 3-х томах (М.: Мир, 1995). — *Примеч. перев.*

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 конодонтов 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, перера-

ботанный 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) *Hoxa2* 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. Райков, *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.

5 Оригинал: В. Е. Райков. *Карл Бэр, его жизнь и труды* (М.; Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1961). — *Примеч. перев.*

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 Arceheaga, J. The Spemann Organizer: 75 years on, *International Journal of Developmental Biology* 45 (специальный выпуск).

Чтобы познакомиться с обширной литературой, посвященной *Hox*-генам 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, C. 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 ки-

шечнополостных (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; Chourouat, 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. Szathmari, *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 А. 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 Boxhorn, 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, B., 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 человеческого 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 Paäbo, 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 опсинов, 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 Виттбродта, посвященных светочувствительным тканям, были впервые опубликованы в следующем первоисточнике: Arendt, D., Tessmar-Raible, K., Synman, H., Dorresteijn, A., and Wittbrodt, J. (2004) Ciliary photoreceptors with a ver-

tebrate-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 (Bernard Frizsch and Joram Piatigorsky) к результатам, полученным Арендтом и Виттбротом, 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.

Генетические основы эволюции внутреннего уха обсуждаются в статье: Beisel, K. W., and Fritsch, 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) Über die Visceralbogen der Wirbeltiere im allgemeinen und deren Metamorphose bei den Vögeln und Säugetieren, *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medicin* 1837:120–222; Gaupp, E. (1911) Beiträge zur Kenntnis des Unterkiefers der Wirbeltiere I. Der Processus anterior (Folii) des Hammers der Säuger und das Goniale der Nichtsäuger, *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 Säugern, *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, *Grundzüge 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: Lucioli, S., et al. (2006) Introducing a novel human mtDNA mutation into the *Paracoccus denitrificans* COX I 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.kalliorimo-noyios.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 Даунс, 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, которые пригодились 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 проницательных 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 науч-

ных 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.

Предметный указатель

А

- Австралия 48, 229, 161
австралопитек афарский (“Люси”) 41
Аксель, Ричард 191, 192, 193
акантостега (*Acanthostega gunnari*)
50, 51, 52, 59
актинии 151, 152, 153, 154, 278
акулы 63, 76, 77
 орган боковой линии 225, 226
 печень 224, 258, 259, 260
 половые железы 257, 258, 259,
 260, 261
 челюсти 123, 217
 эмбриональное развитие 63,
 76, 78, 79, 81, 121, 122, 123
алевролит 21
алкоголь (его действие на орга-
низм) 224
Аляска 26
Амазонка (река) 22, 24, 25
Американский музей естественной
истории 231
Американская академия в Берли-
не 288
амфибии (земноводные) 17, 20, 37,
51, 59, 60, 61, 91, 102, 128, 132,
138, 143, 190, 194, 197, 213, 217,
227, 249, 254, 256
 их личинки (головастики) 254
 их органы слуха 20
аниридия 208
“Аполлон-8” (космический аппа-
рат) 267, 268
апноэ (синдром ночного апноэ)
253, 284
Арендт, Детлев 206, 207, 280, 281
Аризона (штат) 87
Арктика 10, 12, 27, 28, 29, 30, 33,
39, 40, 63, 105

белые медведи 29, 32, 240
 Африка Южная *см.* Южная Африка

Б

Бак, Линда 191, 192, 193
 бактерии 157, 160, 180, 204, 232, 233, 263, 264, 283, 284
 их опсины 204
 их родство с митохондриями 263, 264
 стрептококки *Paracoccus denitrificans* 264, 284
 Бальфур, Фрэнсис Мейтленд 125, 275
 барабанная перепонка *см.* перепонка барабанная
 бедра (их положение) 61
 Белл, сэр Чарльз 45
 беременность внематочная 134, 135
 беспозвоночные 127, 128, 129, 277
 близкие к позвоночным 127-128, 129
 их органы зрения 199, 202, 206, 207
 бесчелюстные 105, 191, 192, 194
 гены обонятельных рецепторов 192, 279, 280
 зубы 58, 86, 104, 105, 106
 конодонты 103, 104, 105, 106
 миксины 191, 194
 миноги 191, 192, 194, 195
 органы обоняния 191, 194, 195
 остракодермы 105, 106, 109
 биология молекулярная 186
 бластоциста 134, 135, 137
 близнецы 141, 143
 боковой линии орган 225, 226, 227, 228, 229

болезни *см.* заболевания человека
 Бораас, Мартин 183
 Бушеми, Стив 175
 Бэр, Карл Эрнст фон (Карл Максимович) 133, 135, 138, 140, 143, 144, 276

В

варикозное расширение вен 252
 вирусы 180, 232
 водоросли 160, 183
 волосы 108, 111, 136, 139, 141, 236

Г

Галилей, Галилео 168
 Гаспе (полуостров) 48
 Гасселинг, Мэри 70
 Гаупп, Эрнст 214, 215, 216
 Гегенбаур, Карл 48
 Гейтси, Стив 35
 Геккель, Эрнст 138
 Гексли (Хаксли), Томас 48, 275
 геморрой 249
 генератор ритма центральный 255, 256, 257
 “Геном человека” (проект) 178
 геномы 177, 192, 193, 195, 196
 гены
 их взаимодействие 150, 178
 генетические переключатели и жаберные дуги 65, 66, 67, 121, 125, 126, 127, 129, 139
 нефункциональные мутации в них 145, 196
 обоняния (обонятельных рецепторов) 192, 193, 194, 195, 196, 205, 279 280

- организатора 143, 148, 149
ответственные за план строения 146, 148, 152, 153, 265
ответственные за развитие глаз 208, 229
их положение в хромосомах 145
их работа в клетках 65, 66, 74, 150, 154, 180, 188
BMP 150
eyeless 208, 209, 210
hedgehog 73, 74
Hox 125, 146, 147, 148, 149, 153, 273, 276, 277, 278
Noggin 149, 150, 154
Otx 125
Pax2 228, 229, 283
Pax6 209, 210, 229, 281, 283
Sonic hedgehog 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 273
- Геринг, Вальтер** 146, 209, 281
Герон Александрийский 181
Гете, Иоганн Вольфганг 119, 120, 275
гидроксиапатит 102, 104, 168, 170
Гилад, Иоав 196
гиоид 123, 126
гиомандибуляре 217
Гитлер, Адольф 247
- глаз**
безглазые мутанты 207, 208
беспозвоночных и позвоночных 199, 202, 206, 207
вещества-светоуловители 203, 204
гены, ответственные за развитие 67, 75, 107, 144, 145, 147, 150, 152, 208, 209, 210, 229, 230
медуз 229, 230, 243, 244, 278, 283
мышцы 65, 119
опсины сложные 203, 204, 207
сходство с фотоаппаратом 199, 200, 201, 202
тиктаалика 39, 41, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 63, 191, 286
ткани 166, 199, 200, 203, 206, 210, 226, 263
см. также зрение
- Глесснер, Мартин** 161
Гоби (пустыня) 23
- голова**
акулы 121, 125, 126, 216, 218, 226
восприятие ее положения 40, 130, 131, 219, 220, 221, 223
ее мышцы 112, 113, 114, 115, 117, 118, 125, 200, 223, 253, 254
у остракодерм 105, 106
плоская (у рыб) 12, 35, 36, 37, 38, 39, 58
ее сегментация 111, 113, 120 275
человеческая 110
черепно-мозговые нервы 110, 116, 124, 125
эмбриональное развитие 113, 132, 139, 149
см. также глаза; уши; обоняние; череп
- головастики** 253, 254, 256, 257,
гомеобокс 146
гоминиды 41
гортань
и голосовой аппарат человека 118, 252, 253, 255
- гранты научные** 30
Грегори, Уильям Кинг 216
Гренландия 20, 23, 26, 27, 28, 29, 49

грыжи 248, 257, 261, 262
 губки
 клеточное строение 176, 177, 178
 Гюрих, Мартин 160, 161, 164

Д

давление кровяное 250, 251
 Дан, Рэнди 63, 75, 76, 81, 273, 287
 Дарвин, Чарльз 47, 56, 214, 234
 Даунс, Джейсон 32, 287
 Даунс, Уилл 87
 двоякодышащие 48, 87
 двуногость
 Де Робертис, Эдди 149
 девон (девонский период)
 поздний 23, 24, 25, 26, 28, 49, 54, 90
 топография формации Кэт-скилл в этот период 23, 28
 дельфины 195
 дефекты врожденные 121
 Дешлер, Дейзи 52
 Дешлер, Тед 24, 36, 52, 286
 Дженкинс, Фариш (младший) 29, 86, 274, 287, 288
 Джомолунгма (гора) 21
 диабет сахарный 250
 динозавры 44, 45, 89, 93,
 ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота) 11, 17, 41, 76, 77, 78, 81, 145, 146, 147, 148, 149, 174, 178, 179, 180, 186, 187, 208, 232, 241, 243, 264
 выделение в домашних условиях 187, 279
 ее роль в развитии эмбрионов 64, 65, 74, 75, 109

ее роль в разнообразии клеток 65, 67, 72, 74, 144, 188
 сохранение в ней неработающих генов 195, 196, 209
 см. также гены, хромосомы

докембрий 163, 164

доспехи 58, 105

дерево генеалогическое (родословное)

животных 148, 197, 233, 245, 284, 285

его реконструкция 235, 237, 240, 241

см. также эволюция

дрозофилы (плодовые мухи)

мутанты 145, 209,

план строения тела 73, 147

дуги жаберные 117, 118, 119, 121, 122, 123, 126, 129, 139, 213, 215, 217, 276,

Ж

жабры 122, 198, 255, 256,

жгутиконосцы воротничковые см.

хоанофлагелляты

железы молочные 108, 109, 195, 213, 239

железы половые 257, 258, 259, 260, 261

мужские (семенники) 259, 260

женские (яичники) 260

жизнь на Земле (ее история) 19, 160, 161, 166, 238

аналогия с земным годом 160

важнейшие переходные этапы 193

Жоффруа Сент-Илер, Этьен 272, 277

З

заболевания человека

- варикозное расширение вен 252
- геморрой 248, 249
- грыжи 248, 257, 261, 262
- митохондриальные 262-264
- ожирение 249, 250
- рак 158, 248
- связь с эволюцией 249-265
- сердечные 249, 250

закон биогенетический Геккеля 138

запахи, см. обоняние

запястье 37, 55, 56, 57, 58, 62

зародыш, см. эмбриональное развитие

зародышевые листки 135, 142

захоронение ископаемых 12, 13,

- 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 33, 35, 41, 86, 91, 94, 98, 102, 163, 164, 215, 271

- зависимость от условий среды 102, 187

- сохранность мягких тканей 104

- образование отпечатков 128,

- 160, 161, 163, 198

- окаменевшие следы 94, 198

- породы, в которых они встречаются 14, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 58, 98, 160, 163, 164, 198, 271

зачатие, см. оплодотворение

земноводные, см. амфибии

зона поляризующей активности

- (ЗПА) 70-71, 72, 73, 74, 75, 76, 79

зрение

- дневное и ночное 201

- острота 202

- цветовое 196, 203, 204, 205, 206, 246

- см. также глаз

зубы

- бесчелюстных 106

- бугорки 84, 89, 96, 99, 107

- гидроксиапатит 102, 104, 168, 170,

- дентин 102

- износ (характер сточенности)

- 92, 96, 99, 100

- иннервация 115, 118, 120, 217,

- 229

- ископаемые 85, 86, 88, 104

- конодонты 103, 104, 105, 106

- корни 84, 89, 92, 96, 101, 114

- млекопитающих 86, 91, 99, 101,

- 102, 274

- сходство с покровами головы

- остракодерм 105, 106, 109

- прикус 85, 92, 99, 100, 101, 216, 283

- происхождение

- пульпа

- рептилий 85, 86

- смена 85, 86

- твердость 101, 102

- трителедонтов 99, 100, 101, 274

- человеческие 119

- эмаль 102, 106, 107, 139

- эмбриональное развитие 123, 126,

И

известняк 21

икота 248, 253, 254, 256

икринки

- лягушек 154
- рыб 132
- саламандр 132
- тритонов 141

Ингам, Фил 73, 74

инуктитут (эскимосский язык) 39

ихтиостега (*Ichthyostega soderg-erghi*) 51

К

кардиоэнцефаломиопатия 264

Кауфман, Том 146

кембрий (кембрийский период) 161

Кинг, Николь 178, 179

кислород

- концентрация в атмосфере 184, 185
- усвоение живыми организмами 262, 263

киста жаберная 122

кисть руки

- компактность 43
- пронация и супинация 60
- сложность 45

Китай 86, 99, 127, 128, 198, 199, 241

китообразные 195

киты 44, 69, 195

кладистика (филогенетическая систематика) 270, 283

клетки

- волосковые 219, 224, 225, 227, 228
- нервные (нейроны) 65, 189, 191, 112, 225
- половые (сперматозоид и яйцеклетка) 64, 116, 134, 137, 258, 260

Клэк, Дженни 20, 26, 51

кожа 108

- человеческая 42, 136, 104, 158

коллено и его повреждения 247

коллаген 168, 170, 172, 175, 177, 180, 184

конечности

- наземных позвоночных 17, 24, 25, 47, 51, 66, 67, 77, 81, 129, 132, 151, 239
- рыб (плавники) 47, 49, 50, 51, 52, 54, 56, 66, 77, 151, 239
- скелет 54, 56, 67

Коннектикут (штат) 92

конодонты 103, 104, 105, 106, 274, 286

космическая болезнь 221

космонавтика 268

кости

- бедренная 46, 47
- гиоид 123, 126
- запястья 37, 41, 43, 44, 45, 55, 56, 59, 67, 75
- лодыжки 44, 59
- локтевая 44
- лопатка 54, 56
- лучевая 44, 60
- пальцев 44, 45, 46, 49, 50, 52, 59, 67, 70, 158
- плечевая 37, 44, 45, 46, 47, 48, 191
- подвесок (гиомандибуляре) 217
- позвоночник 27, 46, 51, 104, 119, 120, 128, 130, 142, 146, 151, 167, 201, 244, 245, 275
- среднего уха, см. косточки слуховые
- строение ткани 69, 70, 71, 74,

75, 77, 78, 107, 111, 117, 155, 168, 169, 170, 171, 172
челюсти 35, 84, 86, 88, 92, 99, 100, 105, 112, 115, 117, 121, 123, 129, 214, 215, 216, 217, 219
череп 12, 46, 100, 105, 111, 112, 113, 119, 120, 121, 274, 276

косточки слуховые

и восприятие звуков высокой частоты 216
молоточек 117, 121, 213, 215, 216, 218, 219
наковальня 117, 213, 216, 218, 219
стремечко 117, 213, 216, 217, 218, 282
и подвесок (гиомандибуляре) рыб 282
и челюсти рептилий 86, 117, 121, 123, 214, 215, 216, 217

Козны, братья 175

красоты конкурс 97, 98

кристаллины 98

крокодилы 39, 61, 85, 99

курица 74, 76, 79, 82, 137, 143

Кэтскилл (формация) 32, 38

ее топография в девоне 23

Кэцинь, Гао 198, 199

Кювье, Жорж 84

Л

ланцетник 127, 128, 129, 227,

Левин, Майк 146, 149

лепидосирен (*Lepidosiren paradoxa*) 48

леса древние 205, 206, 246

летопись геологическая (палеонтологическая) 19, 104, 186

древние леса 205, 206, 246

древний климат 21, 22

неполнота 104

зубы 85, 100, 104

конодонты 103, 104, 105

микробы 160, 182, 184, 185

многоклеточные тела 159, 162,

163, 164, 181, 182, 184, 185, 246

остракодермы 105

промежуточные (переходные)

формы 20, 187, 193

листки зародышевые, см. зародышевые листки

лодыжка 52

лопатка 54, 56

лягушки 46, 47, 75, 91, 126, 137, 154, 167

М

Макгиннис, Билл 146, 149

Маккуин, Стив 173

Макмэхон, Энди 73, 74

Маллисон, Фред 54, 287

Мангольд, Хильда 141, 142, 143, 144, 277

Марокко 90

Мартиндейл, Марк 151, 152, 153

матка 134, 135, 260

Машек, Боб 54

медведь белый 29, 30

медузы

зрение 210, 229

план строения тела 131

мезозой (мезозойская эра) 19

мел (меловой период) 19

Мелвилл (остров) 30

местонахождения ископаемых

- в Австралии 48
- в Арктике 21, 27, 30, 39, 40, 63, 105
- в Аризоне 87, 99, 274
- богатые ископаемыми слои 91, 97
- возраст пород 12, 14, 17, 19, 20, 22, 23, 26, 27, 34, 37, 48, 86, 92, 93, 100, 102, 160, 161, 181, 184, 198, 225
- на Джомолунгме 21
- на западе США 86, 104
- идеальные районы 23, 93
- в Китае 86, 99, 127, 128, 198
- в Коннектикуте 92
- в Намибии 160
- в Новой Шотландии 93, 94, 95, 96
- в Пенсильвании 23, 24, 27
- на полуострове Гаспе (Канада) 48
- районы обширных обнажений 90
- в России 215
- способы поиска 13, 14, 15, 24
- в Южной Африке 86, 96, 104, 215

микробы (одноклеточные микроорганизмы)

- ископаемые 160
- питание 182, 185
- хоанофлагелляты (воротничковые жгутиконосцы) 179, 180
- см. также бактерии

миксины 191, 194

мимика, см. мышцы мимические

миноги

их органы обоняния 191, 194, 195

митохондрии

- митохондриальные заболевания 263, 264
- их функции 263

млекопитающие

- гены обоняния 188, 193, 194, 195, 196, 197
- ген *Sonic hedgehog* 74-81
- древние 13, 19, 58, 86, 87, 91, 99, 100, 101, 196, 227
- дыхание 254-256
- зубы 86, 91, 99, 101, 102, 274
- среднее ухо (слуховые косточки) 212, 213, 215, 244
- обоняние 188, 189, 190
- план строения тела 265
- половые железы самцов 258, 260, 261
- ушная раковина 213
- челюсти 84, 92, 99, 100, 112, 115, 117, 121, 123
- цветовое зрение 196, 204, 205, 206, 246
- Нох*-гены 146-148

многоклеточность 178, 182, 183, 245

многощетинковые черви 206

мозг головной

- его роль в зрении 200-201
- его роль в обонянии 188-190
- ствол 254-257

мозг спинной 120, 255

мозговой ствол, см. ствол мозговой

молоточек (слуховая косточка) 117, 121, 213, 215, 216, 218, 219

морганукодон (*Morganucodon*) 286

мрамор 20

Музей естественной истории в Нью-Йорке см. Американский музей естественной истории
Музей науки и техники в Чикаго 266, 267
Музей естественной истории Филда в Чикаго 289
мутации генетические 74, 76, 144-146, 196, 207-209, 228, 234, 236, 237, 264
мухи плодовые, см. дрозофилы
мыши 74, 81, 146, 148, 208, 228
мышцы мимические 114, 118

Н

наковальня (слуховая косточка) 119, 209, 216, 218, 219
нерв диафрагмальный 256
нервная система 136
нервы черепно-мозговые
блуждающий 118, 124, 256
зрительный 113
лицевой 110, 114-116, 124, 217
слуховой (преддверно-улитковый) 113
тройничный 110, 114-116, 118, 124
языкоглоточный 118, 124
Нил, Джеймс 250
Нобелевская премия 142, 143, 148, 193, 264
Новая Шотландия 93
ноги
лягушки 46
наземных позвоночных 20, 46
человека 45, 61, 75, 130, 167, 245, 251

нуклеотиды 74, 146, 186, 207-209, 243
Нунавут (территория) 34, 38
совет старейшин 38

О

обезьяны (приматы)
Старого Света 204
цветовое зрение 196
оболочка радужная 200
обоняние
в воде и в воздухе 189, 191, 196
генетические основы 188, 193
отсутствие у китообразных 195, 196
у приматов с развитым цветовым зрением 246
работа органов 189
способность различать запахи 188
эволюция у позвоночных 205, 246
генетические основы 188, 193
строение и работа органов 189, 190, 193
ожирение 249, 250
Окен, Лоренц 120, 272
Олсен, Пол 93-95, 287
оплодотворение 135
опсины 203, 204, 207
организатор (в эмбриональном развитии) 143, 144, 148, 149
остракодермы 105, 106
Оуэн, сэр Ричард 45-49, 53, 56, 59, 215, 272
охота и собирательство 249, 250

П

Пандер, Христиан Иванович 103,
133, 140, 143

парфюмерная промышленность
188

пенис 260

Пенсильвания (штат) 24, 25

перепонка барабанная 211

периоды геологические 19, 23, 24,
28, 49, 54, 93, 161, 215

песчаник 21, 52, 88, 89, 91, 92, 94,
97, 98

плавники

их перепонка 56

их скелет 47, 48, 52-54, 56, 59,
64, 77, 79, 80

план строения тела

актинии 151-153

гены, ответственные за него
152, 154

медузы 131

млекопитающих 265

наземных позвоночных 24, 36,
37, 46, 47, 265

ось директивная (направляю-
щая) 152

ось орально-аборальная 152

плодовых мух 144, 146

позвоночных 44, 46, 47, 134, 143

сегментация 275

симметрия двусторонняя 245

человека 65, 125, 136, 144, 153,
156, 265

подавиться риск 253

подвесок (гиомандибуляре) 217

позвоночник 46, 51, 104, 119, 120,

128, 130, 142, 146, 151, 167, 201,
244, 245, 275

позвоночные

наземные (тетраподы) 30

примитивные 194

связь с беспозвоночными 127-
129

покров волосяной, см. волосы

**полихеты, см. многощетинковые
черви**

породы горные

магматические 20

метаморфические 20-22

осадочные 21-23

Порше, Фердинанд 247

**препараты в палеонтологиче-
ских лабораториях** 52, 54

препарирование человеческих тел
9, 42, 43, 62, 111

пресмыкающиеся, см. рептилии

прикус зубов 85, 92, 99-101, 216, 283

приматы, см. обезьяны

**происхождение, сопровождаемое
модификацией** 234, 237, 240,
см. также эволюция биологиче-
ская

пронация 60

протеогликан 169, 170, 172, 180

птицы 102, 233

Р

**радужная оболочка глаза, см. обо-
лочка радужная**

**развитие конечностей (эмбрио-
нальное)**

акул 63

влияние витамина А 63, 70, 74, 78, 79, 81
зависимость от концентрации веществ 72
зона поляризующей активности (ЗПА) 71-76, 79
мух-дрозофил 73, 74
нарушения 145
общие генетические механизмы 140, 155, 156
ранние стадии (зачатки конечностей) 68
роль генов 140, 155, 156
скатов 63
цыпленка 68-70
рак (как животное) 102
(Как болезнь — см. заболевания человека)
раковина ушная, см. ушная раковина
Рамирес, Нино 284, 288
Рейхерт, Карл 214, 216
реки древние 25, 37
рептилии (пресмыкающиеся)
динозавры 44, 45, 89, 93
зубы 85, 86
похожие на млекопитающих 85, 215, 216
прикус 85, 99
современные 85
трителедонты 99, 274
уши 213, 214, 227
челюсти 86, 96, 214-216, 219
роговица глаза 200, 229
родничок (у младенцев) 112
Россия 215
рука (ее скелет) 44, 45, 47, 75, 262
см. также кисть руки

рыбы

выход на сушу 10, 12-14, 35, 271
двоякодышащие 48, 50
костные 125, 226
их легкие 48
орган боковой линии 225, 226
органы обоняния 190, 191
особенности строения 54, 56, 125, 258, 259
подвесок (гиомандибуляре) 217
с плоской головой 12, 35, 38, 58
управление дыханием 254, 255
хищные 58, 217
хрящевые см. также хрящевые рыбы
эмбриональное развитие 63, 132

С

Саве-Содерберг, Гуннар 49, 51
Саган, Карл 246
саламандры 125, 155, 199
Саммербелл, Денис 72
Сахара (пустыня) 23
сегментация 275
Сент-Илер см. Жоффрау Сент-Илер, Этьен
сердца заболевания 251, 252
сетчатка глаза 201
симметрия двусторонняя 245
система кровеносная 251
систематика биологическая 232, 238
систематика филогенетическая, см. кладистика

скаты 63, 80

см. также хрящевые рыбы

скелет

общая схема строения 40, 41, 45, 46, 67-69, 89, 139, 170, 217-218
 конечностей наземных позвоночных 19, 25, 35, 56, 60, 91, 122, 132, 166, 167, 169, 215
 плавников 47, 48, 52-54, 56, 59, 64, 77, 79, 80

Скотт, Мэтт 146

сланец глинистый 21

сланец кристаллический 20

следы окаменевшие

динозавров 93-95, 104

древнейших многоклеточных 161, 163

слух, см. ухо

слуховые косточки, см. косточки слуховые

собирательство, см. охота и собирательство

Сондерс, Джон 69, 70, 76, 273

сперматозоиды 64, 116, 134, 258, 260

Спригг, Реджинальд 161, 164, 174

ствол мозговой 254-257

стремечко (слуховая косточка) 117, 213, 216-218, 282

стрептококки 180

супинация 60

Т

Тейбин, Клифф 73, 74, 76, 78, 82, 288

тела многоклеточных организмов

вещества, входящие в их состав 166, 169, 170, 180

взаимодействие клеток 159

гены, ответственные за развитие 172, 177, 180

ископаемые остатки 163

коллаген и его роль 168, 170, 172, 175, 177, 180, 184

межклеточное пространство 169

митохондрии и их роль 283

отличительные особенности

потребление энергии 184

примитивнейших животных 177

происхождение 157, 159, 162, 181, 182, 184

пропорции 167

протеогликан и его роль 169, 170, 180

разделение труда между структурами 157

сцепление клеток 165

ткани в них 42, 107, 117, 136, 166, 168

хрящи и их роль 169, 180

тенар (возвышение большого пальца) 43

тетраподы, см. позвоночные наземные

тиктаалик (*Tiktaalik*)

грудные мышцы 56

запястье 41, 55, 56

открытие 4, 39, 63

родство с наземными позвоночными 40, 41, 59, 191

скелет конечностей 40, 41, 56, 59-61

способность отжиматься 56, 57

среда обитания 38, 39, 58
в средствах массовой информации 39, 271
строение 39, 40, 58, 217
эскимосское название 38, 39

ткани

костная 117, 168, 170-172
хрящевая 77, 169, 170
зародыша 69-71, 74, 75, 78, 140, 142, 226

триас (триасовый период) 90, 93

трителедонты 99, 274

тритоны 143

трихоплакс 174, 177, 178, 244

трубы фаллопиевы (маточные) 135

У

Уилсон, Генри Ван Питерс 175

ускорение (его восприятие) 221, 222, 227

ухо внутреннее

волосковые клетки в нем 219
восприятие положения головы 220
восприятие ускорения 221, 222, 227
и ген Рах 2 228
действие алкоголя 224, 225
и орган боковой линии 225, 226
происхождение 225-227
связь с глазными мышцами 223, 225

ухо

наружное 212, 213
среднее 212, 213, 215, 244
раковина ушная 211, 213

Ф

Финнерти, Джон 151, 153

Фогт, Вальтер 143

фоторецепция, см. зрение

Х

хайнерпетон (*Huynerpeton*) 25, 26

Хаксли, Томас, см. Гексли, Томас

Харланд, Ричард 149

хищничество

роль в происхождении многоклеточности 183

хоанофлагелляты (воротничковые жгутиконосцы) 179, 180

хорда 127, 128, 139, 198

Хоудж, Милдред 207, 208

хромосомы 145

хрусталик глаза 200-202, 210, 281

хрящевые рыбы 77, 213, 217, 218, 255

мозговой ствол 255

жаберные щели 121, 127, 129

хрящи 119, 123, 129, 155, 169

Ц

цвета, см. зрение цветковое

Цвиллинг, Эдгар 69, 70, 76, 273

центральный генератор ритма, см. генератор ритма центральный
цыпленок, см. курица

Ч

челюсти

акул 123, 217

- млекопитающих 84, 92, 99, 100, 112, 115, 117, 121, 123
 рептилий 86, 96, 214-216, 219
 хрящевых и костных рыб 217
- черви**
 дождевые 265
 многощетинковые 206, 207
Caenorhabditis elegans 265
- чешуя рыба** 20, 39, 52, 105
- Ш**
- Шафф, Чак** 87, 287
шея 20, 37, 38, 239
Шпеман, Ханс 140, 141, 143, 144, 148, 277
щели жаберные 121, 127, 129, 257
- Э**
- Эверест, см. Джомолунгма**
эволюция биологическая
 и научные предсказания 41, 47, 238, 241
 роль генетических мутаций 74, 76, 144-146, 196, 207-209, 228, 234, 236, 237, 264
 см. также происхождение, сопровождаемое модификацией
- Эйзенхауэр, Дуайт** 13
экономного генотипа гипотеза 250
Элсмир (остров) 12, 30, 32, 34, 90
 геологические особенности 12, 32, 90
Эмарал, Билл 87, 287
Эмбри, Эштон 32
эмбриональное развитие
 акул и скатов 63
 «биогенетический закон» 138
 возникновение близнецов 141-143
 жаберные дуги 121, 139
 зародышевые листки 133, 136, 139, 140, 142
 оплодотворение (зачатие) 135
 организатор (участок ткани) 143, 144, 148, 149
 среднего уха 214
 стадия бластоцисты 134, 135, 137
 стадия имплантации 137
 стадия трубки внутри другой трубки 136, 137, 139
 хорда 128, 139
 см. также развитие конечностей
- эозостодон (Eozostodon)** 86
эпителий обонятельный 193
эскимосы 38, 39
эустеноптерон (Eusthenopteron) 49, 50, 59
- Ю**
- Южная Африка** 86, 96, 104, 215
Юкон (территория) 26
юра (юрский период) 93
Юта (штат) 23, 87, 279
- Я**
- яйцеклетка**
 оплодотворенная (зигота) 116, 134, 137
Ярвик, Эрик 51