

ежемесячный научно-информационный журнал

SCIENTIFIC
AMERICAN

В мире науки

www.sciam.ru

№3 2011



Внутреннее
оплодотворение
изменило курс
эволюции

СЕКСУАЛЬНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ КАК ОНА ЕСТЬ

ИННОВАЦИИ

ГЛОНАСС
И НООСФЕРА

НЕЙРОНАУКИ

ТРИЛЛИОНЫ
СВЯЗЕЙ

ИНФЕКЦИОННЫЕ
ЗАБОЛЕВАНИЯ

ФАБРИКИ
ГРИППА

ISSN 0208-0621



9 770208 062001

11003



>



Журнал выходит при поддержке
МГУ имени М.В. Ломоносова





ОТКУДА БЕРУТСЯ **ДЕТИ**

Недавно изученные окаменелые скелеты рыб свидетельствуют о гораздо более древнем происхождении процесса копуляции у позвоночных животных, чем считалось ранее, и указывают на принципиальное значение этого акта в их эволюции

Джон Лонг

В августе 2005 г. мы с моей командой были заняты поисками ископаемых останков древних рыб среди поросших травой холмов на пастбищах Гого–Стэйшн – скотоводческого ранчо, расположенного в самом сердце северо-западной Австралии. Сегодня этот засушливый регион малопригоден для обитания водных животных. Однако около 375 млн лет назад, в конце девонского периода, здесь было мелководное море, и район Гого представлял собой гигантский коралловый риф, кишавший морскими обитателями, включая примитивных рыб. По счастливому стечению обстоятельств многие из их останков сохранились до наших дней. Среди колючих кочек пустынной травы спанифкса и спящих под ними смертельно опасных змей мы искали известняковые конкреции размером с грейпфрут – продукты дряхлеющей миллионы лет эрозии местных сланцев, в которых могли скрываться окаменелые скелеты древних рыб, обитавших на доисторическом рифе. Собрав достаточное количество конкреций, мы вернулись в музей и начали последовательно их вскрывать в надежде найти случайно оказавшееся там «сокровище».

Наиболее распространенными рыбами, населявшими в те времена Гого, были «бронированные» животные, называемые плакодермами (или панцирными рыбами). Эти существа (ныне вымершие) около 70 млн лет господствовали на планете и были первыми позвоночными, у которых появились челюсти. Ученые долгое время спорили, в каком именно родстве они состоят с прочими животными, поэтому в Гого мы искали окаменелости, которые могли бы ответить на данный вопрос и внести ясность в другие аспекты, касающиеся эволюции рыб. В один прекрасный день наши усилия были вознаграждены – мы обнаружили конкрецию, содержащую то, что позже оказалось почти полным скелетом плакодермы. Вначале ископаемый ске-



Окаменевшая пуповина, прикрепленная к эмбриону, обнаружена в теле древней рыбы *Materpiscis*. Эта рыба представляет собой наиболее ранний пример животного, в размножении которого присутствовали половой акт и рождение потомства

лет не поразил меня своей анатомией, я считал его просто еще одним образцом панцирной рыбы, дополняющим наш улов, и отправил в лабораторию, чтобы потом аккуратно извлечь из куска известняка. В тот момент я и не предполагал, что скромная на первый взгляд находка перевернет представления эволюционистов о самом интимном аспекте биологии позвоночных – происхождении полового акта и внутреннего оплодотворения.

Ранее считалось, что внутреннее оплодотворение и вынашивание потомства в теле матери в сумме порождают специализированную форму репродукции, которая впер-

вые появилась у акул и их родственников (в классе, известном как хрящевые рыбы) около 350 млн лет назад, т.е. примерно через 70 млн лет после появления первых представителей данного класса. До этого размножение рыб ограничивалось выметыванием икры – совершенно обезличенным процессом, при котором самка откладывала икру в воду, самец оплодотворял ее, и эмбрионы развивались самостоятельно в открытом пространстве. Но недавние исследования скелета рыбы, найденного нами в 2005 г., вместе с изучением других скелетов плакодерм из Гого и других регионов показали, что копуляция и живорож-

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Ученые считали, что у позвоночных внутреннее оплодотворение появилось около 350 млн лет назад в классе хрящевых рыб, включающем в себя акул и их родственников.
- Однако новые ископаемые находки показали, что копуляция и вынашивание потомства в теле самки до момента рождения возникли на миллионы лет раньше и в более примитивном классе рыб.
- Это открытие пролило свет на происхождение нашей собственной репродуктивной системы и других частей тела.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПОЛОВОГО АКТА

Вымершие рыбы плакодермы, жившие около 375 млн лет назад в девоне, были первыми позвоночными, в размножении которых присутствовали копуляция и живорождение, а не выметывание икры в воду с наружным оплодотворением и развитием потомства во внешней среде. Несмотря на то что животные с первой репродуктивной стратегией производят на свет гораздо меньшее число потомков, нежели икротечущие виды, их молодь оказывается гораздо крупнее и крепче мальков, вылупляющихся из икры. Данный вид размножения мог давать молодежи значительное преимущество в выживании в течение девонского периода, когда море изобиловало хищниками



Исследование найденных в Австралии окаменелых скелетов плакодерм, называемых *Austrophyllolepis*, показало, что у самцов этого вида присутствовали покрытые плотью выросты брюшных плавников, под названием птеригоподии, которые они вводили в клоаку самки при спаривании



В некоторых ископаемых остатках плакодерм, например *Materpiscis*, встречаются эмбрионы, что доказывает наличие у них живорождения в противоположность икротечению, которое было характерно для их предшественников

Эмбрион

дение возникли на миллионы лет раньше, чем предполагалось, и не у хрящевых рыб, а в гораздо более примитивном классе позвоночных.

Но еще более удивительно другое. Выяснилось, что панцирные рыбы стали предками той ветви позвоночных, которая в итоге породила животных с четырьмя ногами (тетраподов, к которым относятся и человек). Мы занялись изучением сексуальных приспособлений древних плакодерм и увидели в них первые зачатки собственной репродуктивной системы и других частей тела человека. После чего у нас созрела гипотеза о том, как постепенно анатомия этих животных видоизменялась, став, наконец, такой как сегодня. Парные брюшные плавники плакодерм, благодаря которым сперма самцов попадала в тело самок, со временем превратились в гениталии и конечности тетраподов. А челюсти могли возникнуть и первоначально использоваться в качестве приспособления, позволяющего самцу рыбы хватать и удерживать самку во время спаривания, лишь позже преобразовавшись в орган добывания пищи. Таким образом, получается, что, однажды возникнув, секс изменил все.

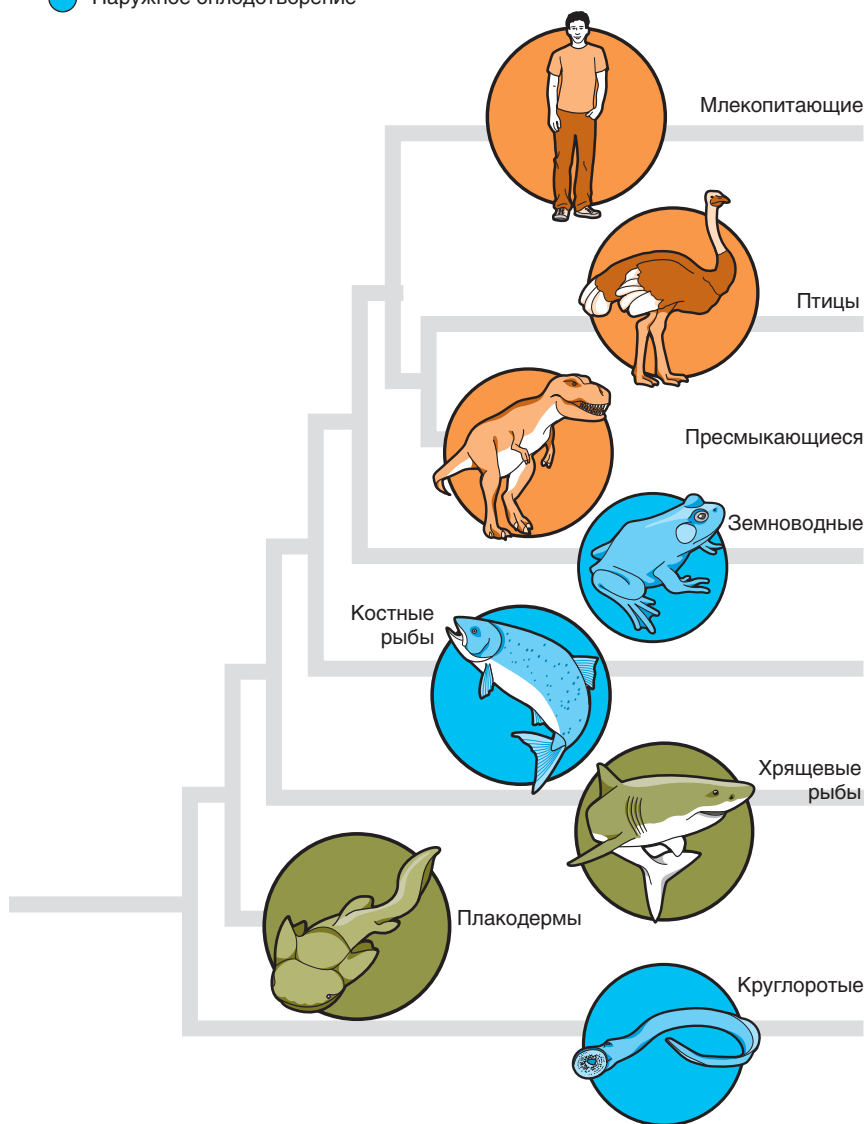
«Беременные» окаменелости

Окаменелые скелеты из Гого знамениты тем, что очень хорошо сохранились. Большинство образцов данного региона, в отличие от всех прочих останков рыб, которые обычно сплющены, демонстрируют первоначальную трехмерную структуру. Полное извлечение такого экземпляра из известняка – весьма затратное по времени занятие: необходимо тщательно растворить всю окружающую скелет породу, используя разбавленную уксусную кислоту, чтобы не повредить окаменелые кости. Поэтому к очистке образца, обнаруженного в августе 2005 г., я приступил лишь два года спустя, в ноябре 2007 г. Основываясь на крупных челюстях этой рыбы и зубах, приспособлен-

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПОЛОВОГО АКТА

Панцирные рыбы – прародители той ветви животного мира, к которой относятся все тетраподы, включая человека. Хотя внутреннее оплодотворение появилось уже у плакодерм, более успешный класс костных рыб в основном вернулся к икротетанию. Однако в процессе эволюционного перехода от костных рыб к тетраподам внутреннее оплодотворение опять «вошло в моду», а анатомические структуры, произошедшие от брюшных плавников плакодерм (включая птеригоподии, использовавшиеся для копуляции), стали основой для развития тазового пояса, задних конечностей и гениталий четвероногих животных. Вместо птеригоподий тетраподы приобрели парные репродуктивные органы, называемые гемипенисами, или одиночный пенис. Диаграмма внизу отражает преобладающую форму репродукции для основных классов позвоночных

- Внутреннее оплодотворение (с помощью пениса или гемипениса)
- Внутреннее оплодотворение (с помощью птеригоподий)
- Наружное оплодотворение



Иллюстрации Питера Траслера (Peter Trusler) (вкладка и *Austrophyllolepis*) и Йена Кристмансена (Jen Christiansen) (*Materpiscis*)

ных к дроблению, мы с коллегой Кейт Тринайстик (Kate Trinajstic) из Университета Кертина в Австралии определили, что окаменевший костяк, по размеру напоминавший макрель, принадлежал панцирной рыбе из семейства так называемых птиктодонтид (*Ptyctodontidae*). находка сама по себе уже была хорошей новостью, так как птиктодонтиды – малоизученная группа, а наш экземпляр выглядел как представитель неизвестного вида. Но случай оказался еще более интересным.

Когда я удалил большую часть пухстой породы, возле основания хвоста ископаемой рыбы проступили какие-то необычные элементы. При более пристальном изучении с помощью микроскопа я обнаружил целый ряд хрупких маленьких челюстей рядом с другими крошечными костями. И тут меня осенило. Эврика! Я пережил ощущения, которые лишь раз в жизни выпадают на долю некоторых удачливых ученых. Обычно такие отпечатки я принимал за остатки последней трапезы доисторического хищника. Но рассмотренные мной в микроскоп крошечные челюсти вне всяких сомнений обладали теми же хорошо различимыми анатомическими чертами, что и челюсти крупной рыбы, кроме того, они не были повреждены и частично оставались сочлененными. Все признаки указывали на то, что это были остатки развивающихся эмбрионов, а не содержимое желудка. Более того, я обнаружил отпечаток изогнутой нити, обернутой вокруг одного из крошечных скелетов. Вскоре, используя сканирующий электронный микроскоп, мы смогли идентифицировать этот след, представлявший собой окаменевшее подобие пуповины, которая снабжала эмбрион питательными веществами из желточного мешка. Стало очевидно: мы обнаружили беременную самку, жившую 375 млн лет назад, и внутри нее – самые древние ископаемые эмбрионы позвоночных. Мы назвали новый вид *Materpiscis attenboroughi* (т.е. «мать-рыба Аттенборо») – в честь

знаменитого британского натуралиста Дэвида Аттенборо (David Attenborough), который в 1979 г. представил миру археологические сокровища Гого в документальном сериале «Жизнь на Земле».

Наша находка пролила свет на тайну строения птиктодонтид. В конце 1930-х гг. британский специалист в области анатомии Дэвид Уотсон (David Meredith Seares Watson) заметил, что самцы этих ископаемых рыб из Шотландии имели длинные хрящевые выросты, отходящие от костного основания брюшных плавников. При жизни животного они скорее всего были покрыты плотью и кожей, образуя структуры, напоминающие птеригоподии всех современных самцов хрящевых рыб (парные копулятивные органы, один из которых при спаривании выгибается вперед и вводится в клоаку самки, обеспечивая транспортировку спермы). Но птеригоподии у шотландского представителя птиктодонтид были покрыты костяными пластинами, из-за чего они были громоздкими и негнувшимися. Более того, хотя все птеригоподии хрящевых рыб снабжены чешуеподобными крючками, помогающими удерживать их на месте в процессе копуляции, крючки на птеригоподиях данной птиктодонтиды были столь значительного размера, что скорее мешали, чем помогали спариванию.

Последующие находки скелетов птиктодонтид не прояснили ситуацию, т.к. и в них присутствовали все те же загадочные органы, вызывавшие недоумение ученых. Действительно ли эти рыбы вводили свои причудливые птеригоподии в клоаку самки, или использовали их только для ее удержания? Или же это было лишь утыканное шипами украшение, способствовавшее привлечению женских особей? В то время палеонтологи не могли определенно сказать, спаривались ли птиктодонтиды как современные хрящевые, или же у них было наружное оплодотворение. Обнаруженная нами беременная самка с эмбрионами подтвердила на-

личие по крайней мере у некоторых панцирных рыб внутреннего оплодотворения и живорождения.

Открытие *Materpiscis* побудило нас перепроверить все ранее найденные в Гого окаменелые скелеты птиктодонтид, чтобы выяснить, не содержат ли и они остатки эмбрионов. Поиск привел нас к представителю другого рода птиктодонтид, *Austroptyctodus*, которого я препарировал 20 лет назад. Тщательно изучая образец под микроскопом при сильном увеличении и с использованием первых найденных эмбрионов в роли Розеттского камня, я понял, что структуры, которые ранее были интерпретированы как оторванные чешуйки, на самом деле были крошечными костями, принадлежавшими зародышам. Так была обнаружена еще одна доисторическая мать, погибшая в начале жизни вместе со своими детенышами, находившимися внутри ее тела.

После того как мы с коллегами узнали о существовании беременных птиктодонтид и в 2008 г. написали об этом статью в *Nature*, мы приступили к поиску других скелетов плакодерм в Гого. Наши исследования показали, что птиктодонтиды спаривались и производили на свет живую молодежь. Но они – лишь одна из семи групп панцирных рыб, нас же интересовало, как широко распространился новый способ размножения внутри класса. Особое внимание мы обратили на скелет плакодермы из рода *Incisoscutum*, который ранее был определен как имеющий «содержимое желудка» в виде костей более мелких рыб. Данный образец и еще один окаменелый скелет представителя того же рода, как оказалось, содержали эмбрионы.

Incisoscutum принадлежал к самому большому подклассу плакодерм – артродирам. Этот подкласс состоял из более чем 300 видов, включая самых крупных панцирных рыб из когда-либо живших, например устрашающего шестиметрового *Dunkleosteus*. Ранее не существовало свидетельств, по-

зволювших определить, какой вид оплодотворения был присущ артродирам, и был ли для них характерен половой диморфизм (т.е. внешние различия между самцами и самками). Найденные нами эмбрионы совершенно определенно показали, что *Incisoscuti* размножались с помощью внутреннего оплодотворения. В итоге на основании образцов из Гого и находок из других мест мы смогли доказать, что самцы артродир также имели птеригоподии, облегчающие этот вид размножения. Таким образом, два из семи основных подклассов плакодерм размножались с помощью внутреннего оплодотворения за 25 млн лет до того, как это сделали акулы и прочие хрящевые рыбы.

Сексуальная революция

В свете новых открытий стало ясно, что плакодермы были первыми позвоночными, открывшими для себя внутреннее оплодотворение. Также прояснилось их положение на филогенетическом древе позвоночных. Ранее считалось, что панцирные рыбы дали начало лишь одному из двух ныне живущих классов челюстноротых позвоночных, а именно акулам и их хрящевым родственникам. Но последние данные указывают на то, что плакодермы могут быть предками обоих классов: и древних хрящевых, и вымершего класса рыб, называемых акантодами. Считается, что какие-то из акантод могли быть предками первых костных рыб – ветви позвоночных, давшей начало всем тетраподам, включая человека.

Однако изменение наших представлений о возникновении полового акта вызвало новые вопросы. Мы с коллегами начали подробное исследование, позволяющее установить, каким образом появление копуляции как репродуктивной стратегии повлияло на последующую эволюцию позвоночных. На основании сравнения анатомии различных представителей мы заключили, что задние конечности и гениталии тетрапод развились

из брюшных плавников и птеригоподиев ранних рыб. Одним из наиболее веских свидетельств, подтверждающих такую точку зрения, были данные исследования Мартина Кона (Martin J. Cohn) из Университета Флориды, который в 2004 г. показал, что ген *Hoxd13*, участвующий в развитии грудных и брюшных плавников у современных челюстноротых рыб, также активируется в процессе развития конечностей и гениталий у млекопитающих, что говорит об общности происхождения этих органов.

Если, в соответствии с вышесказанным, мы произошли от плакодерм, то, соответственно, и данные структуры мы унаследовали от них. Возникает вопрос, какие еще анатомические черты мы могли получить в наследство от панцирных рыб. У некоторых современных акул спариванию предшествует ритуал ухаживания самца за самкой. У ряда видов, например у белоперой рифовой акулы, самец прикусывает самку за спину и шею, а затем хватает зубами за грудной плавник, благодаря чему удерживается рядом с ней в течение всего процесса копуляции. Такое наблюдение спровоцировало нас на рождение спекулятивной идеи, что, возможно, появление челюстей первоначально было связано не с переработкой пищи, как традиционно считалось среди ученых, а они развивались как орган, помогающий удерживать самку и повышающий продуктивность спаривания. И лишь потом такая инновация могла стать основой для формирования органов, приспособленных для захвата и жевания. Большинство видов костных рыб вернулись к икрометаению и перестали использовать челюсти при спаривании, зато теперь унаследованные от панцирных рыб челюсти могли послужить преадаптацией к появлению жевания. Данные о том, что внутреннее оплодотворение впервые появилось не у акул, а у плакодерм, и что костные рыбы – потомки панцирных, позволили нам

наметить гипотетическую связь между копуляцией и жеванием.

Если же посмотреть на эволюционную картину развития позвоночных в целом, то вновь полученная дата возникновения полового акта совпадает с взрывообразным ростом видового разнообразия среди рыб артродир, т.е. с первой крупной радиацией видов челюстноротых животных, зарегистрированной в археологических слоях. Могла ли смена репродуктивной стратегии, а именно переход от выметывания икры к внутреннему оплодотворению, послужить причиной такого важного эволюционного события? Нам кажется, что это не случайное совпадение. Поиск научной литературы дал интересный результат. Мы обнаружили, что в 2004 г. Шейн Уэбб (Shane Webb) из Сент-Андрусского университета в Шотландии и его коллеги опубликовали данные, что группа рыб (известных как гудиевые), населяющая сегодня пресноводные реки в Неваде, Западной и Центральной Мексике, около 16,8 млн лет назад разделилась на две ветви. Представители одной ветви продолжили метать икру в воду и дали начало всего четырем видам, а другие перешли на внутреннее оплодотворение и сейчас насчитывают около 36 видов. Еще одна группа рыб, известных как бититовидные, которая представлена тремя ветвями (семействами), иллюстрирует ту же закономерность. Одно из семейств перешло к внутреннему оплодотворению и насчитывает 107 видов. Два других, сохранивших предковую репродуктивную стратегию, состоят из 22 и трех видов соответственно. Тот факт, что в обеих группах ветви, перешедшие к внутреннему оплодотворению, претерпели гораздо более значительную диверсификацию, нежели икромечущие, может указывать на правильность нашей гипотезы.

На первый взгляд предположение, что адаптивную радиацию у артродир вызвало именно появление внутреннего оплодотворения, кажется парадоксальным. Выметывание

нескольких тысяч икринок приводит к появлению гораздо большего количества потомков, нежели размножение с помощью внутреннего оплодотворения и живорождения, при котором появляется небольшое количество мальков, т.к. мать тратит много энергии на их вынашивание. А чем больше количество рожденных потомков, тем, теоретически, выше шансы, что хотя бы один из них унаследует сочетание генов, которое приведет к запуску процесса видообразования. Но в девонский период большая часть рыб питалась своими сородичами, и крошечные, слабые, только что вылупившиеся из икры мальки становились слишком легкой добычей. Репродуктивная стратегия, при которой мать производит на свет небольшое число потомков с гораздо большими размерами тела (благодаря чему шансы мальков выжить и достичь репродуктивного возраста заметно повышались), могла дать артродирам значительное эволюционное преимущество.

От птеригоподий – к мозгу

Многие вопросы по поводу происхождения и эволюции внутреннего оплодотворения у позвоночных остались без ответа. Например, ученые до сих пор не знают точно, каким образом плакодермы перешли от метания неоплодотворенной икры к внутреннему оплодотворению. Отсутствие возможности пронаблюдать за процессом позволяет лишь строить предположения о природе такого изменения. С механистической точки зрения все могло начаться со сближения самца с самкой в момент выметывания икры и оплодотворения ее молоками, что привело к более эффективному оплодотворению. С другой стороны, эволюция могла идти через промежуточную стадию, когда самцы или самки вместо того, чтобы оставить икру без присмотра, носили на себе отложенные яйца – как это делают некоторые рыбы вроде морских коньков, вынашивающих свою икру

в специальных сумках. Возможно, использование хорошо развитых брюшных плавников для более точного переноса спермы на оплодотворяемую икру привело к сближению самца и самки, а давление естественного отбора – к появлению более крупных и длинных плавников, со временем превратившихся в птеригоподии. Что касается нейробиологических факторов, вызвавших у самцов стремление при спаривании вводить часть своего брюшного плавника внутрь тела самки, то, возможно, такое желание возникло как побочный продукт естественного отбора, действующий в направлении увеличения числа икринок, оплодотворенных до того, как самка их выметет, что снижало шансы оплодотворения икры другими самцами. Более полную информацию о том, каков был первый шаг к появлению полового акта, может дать последующая работа по изучению химических и нейронных сигналов, которые регулируют копулятивное поведение акул и других рыб. ■

Перевод: Т.А. Митина



ОБ АВТОРЕ

Джон Лонг (John A. Long) специализируется на изучении ранней эволюции рыб. В настоящее время он занимает должность вице-президента по вопросам исследований и коллекций в Музее естественной истории округа Лос-Анджелес. Недавно он переехал в США из Австралии, где возглавлял научный отдел в Музее Виктории в Мельбурне. Лонг – автор 18 книг, в том числе монографии *The Rise of Fishes* («Расцвет рыб»), второе издание которой вышло в издательстве Университета Джона Хопкинса.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- *Developmental Genetics of the External Genitalia*. Martin J. Cohn in *Advances in Experimental Medicine and Biology*, Vol. 545, pages 149–157; March 31, 2004.
- *Swimming in Stone*. John Long. Fremantle Press, 2006.
- *Live Birth in the Devonian Period*. John A. Long, Kate Trinajstic, Gavin C. Young and Tim Senden in *Nature*, Vol. 453, pages 650–652; May 29, 2008.
- *Devonian Arthrodire Embryos and the Origin of Internal Fertilization in Vertebrates*. John A. Long, Kate Trinajstic and Zerina Johanson in *Nature*, Vol. 457, pages 1124–1127; February 26, 2009.
- *Pelvic Claspers Confirm Chondrichthyan-like Internal Fertilization in Arthrodires*. Per Ahlberg, Kate Trinajstic, Zerina Johanson and John Long in *Nature*, Vol. 460, pages 888–889; August 13, 2009.

