

СИММЕТРИЯ В СКЕЛЕТАХ РАДИОЛЯРИЙ: ПРАВИЛА И ИСКЛЮЧЕНИЯ

М.С. Афанасьева, Э.О. Амон

Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН
afanasieva@paleo.ru, amon@paleo.ru

История развития радиолярий с раннего кембрия до наших дней – это история выработки различных и самых разнообразных по геометрии скелетов, стремящихся к классической симметрии: сферы и сфероиды, конусы, цилиндры и многие другие причудливые формы, но с неперенными элементами смешанной симметрии. Скелеты со смешанной симметрией появились в самом начале эволюции радиолярий и доминировали на всех ее этапах. Но подобные фигуры с точки зрения классической симметрии являются асимметричными, лишенными какой-либо упорядоченности. Однако они не бесформенны, а, скорее, гармоничны в своем строении. Классическая симметрия никогда не реализуется в биологических и кристаллических объектах с математической точностью. Живые организмы и минералы являются композиционно-сложными и структурно-совершенными иерархически организованными системами вещественно-материального мира. Поэтому уподобление скелетов радиолярий кристаллическому телу с идеальной симметрией неправомерно.

Ключевые слова: Radiolaria, классическая симметрия, смешанная симметрия, типы симметрии, морфология, фанерозой.

Идеи связи симметрии с цитологией, физиологией, биологией, экологией и таксономией живых одноклеточных и многоклеточных организмов восходят к проморфологии Э. Геккеля (Haeckel, 1884) и весьма детально были проработаны В.Н. Беклемишевым (1964), по мнению которого эволюционное развитие Живого всегда и при всех условиях совершается направленным прогрессивным порядком:

- от простого к сложному и сверхсложному;
- от нерасчлененного, недифференцированного к расчлененному, дифференцированному;

- от олигомерного плана строения тела к полимерному и метамерному;
- от топически неопределенных структур к топически определенным;
- от отсутствия симметрии к симметрии;
- в отдельных случаях, в результате супердифференциации, к вырождению симметрии, к асимметрии неопределенности.

Беклемишев (1964) полагал, что тип симметрии какой-либо группы протист является показателем ее эволюционного совершенства и развитости и, следовательно, определяет ступень группы в систематике, ее место в системе естественной классификации организмов. При этом отсутствие симметрии указывает, на архаичность, примитивность, неразвитость группы; появление сложных и усложняющихся типов симметрии, свидетельствует о более высокой ступени эволюционного развития и более высоком месте в системе классификации организмов. Случаи же ярко выраженной билатеральной симметрии свойственны гиперспециализированным формам, обладающим сложнейшими планами строения и полной дифференцировкой частей.

В мире Живого немало симметричных форм, или, во всяком случае, таких, внешний облик которых позволяет говорить о симметричном (или приближенно симметричном) строении и устройстве тела организмов. Довольно много их среди протист, в том числе и радиолярий, однако у последних часто возникают формы скелетов, которые нельзя назвать строго симметричными.

Радиолярии – это одноклеточные морские (океанские) планктонные протисты, способные к экстракции растворенного кремнезема из морской воды и к постройке из него опалового внутреннего скелета. Они обладают одними из самых совершенных (с геометрической точки зрения) и крайне разнообразных форм скелета, являясь самым настоящим чудом природы. Многие исследователи полагали и полагают, что проявления различных видов симметрии в скелетах этих удивительных созданий являются нормой для группы и свойственны радиоляриям на протяжении всей истории их эволюционного развития.

Радиолярии подтипа *Polycystina* появились в биосфере весьма давно, на заре «кембрийского взрыва скелетной жизни». При этом на переходе от венда (эдиакария) к кембрию скелеты радиолярий предстают вполне сформированными, т.е. достигшими зрелой стадии эволюционного развития (Афанасьева, Амон, 2012а). В раннем кембрии, в самом начале эволюционного развития данной группы протистов, в геометрии скелетов радиолярий преобладающее значение имели симметричные тела вращения – шары (сферы), иногда эллипсоиды. В качестве дополнительных элементов скелетов (внешняя орнаментация, иглы, перекладины решетчатой ткани) были также использованы и другие геометрические тела вращения – конусы (иглы, шипы), пирамиды, как разновидность конусов (граненые иглы, шипы), цилиндры и призмы (перекладины скелетной ткани и граненые иглы).

КЛАССИЧЕСКАЯ СИММЕТРИЯ

Изучению симметрии радиолярий всегда придавалось большое значение (Naeskel, 1884; Мордухай-Болтовской, 1936; Хабаков и др., 1959; Жамойда, Козлова, 1971; Жамойда, 1981; Петрушевская, 1986; Afanasieva et al., 2005; Афанасьева, Амон, 2006 и др.). Еще три десятилетия тому назад А.И. Жамойда писал: «до сих пор недооценивается значение сравнительного изучения симметрии скелетов радиолярий с целью использования при разработке классификации подкласса и экологии его представителей. Здесь еще широкое поле деятельности для палеонтологов и неонтологов» (Жамойда, 1981, с. 9). И эти слова до сих пор остаются актуальной исследовательской программой.

В скелетах радиолярий мы различаем следующие типы симметрии согласно морфологическому ряду Беклемишева (1964).

Сферическая (гомаксонная) (рис. 1а). Симметричность относительно вращений в трехмерном пространстве на произвольные углы. Имеется центр симметрии, в котором пересекается бесконечное число осей симметрии бесконечно большого порядка. Скелеты имеют форму шара.

Правильная полиаксонная (рис. 1б). Строго определенное число осей симметрии определенного порядка. Если число осей сокращено до 20 или 4-6, то уменьшается и число радиусов симметрии. Чаще всего такие скелеты имеют форму близкую к шару или форму производную от сферы. Возможно, это оптимальное приспособление к планктонному образу жизни.

Ставраксонная (монаксонная, гомополярная) (рис. 1в-е; рис. 2а-д; рис. 3а-в). Число осей сокращено до одной с равноценными полюсами, то есть пересекаемая в центре плоскостью симметрии, в которой лежат не менее двух дополнительных осей симметрии. Такие скелеты оказываются сплюснутым в направлении этой оси или, наоборот, вытянутым вдоль нее.

Радиально-лучевая (аксиальная) (рис. 1ж, з; рис. 2ж-и; рис. 3г). Симметричность относительно поворотов на произвольный угол вокруг какой-либо оси (симметрия вращения неопределенного порядка).

Монаксонная (гетерополярная) (рис. 1и, к). Полюсы единственной оси не равнозначны, а центр симметрии исчезает. Число радиусов симметрии неопределенно, может равняться 3 или 2. В последнем случае образуются две половины скелета, которые можно теоретически совместить, повернув вокруг оси. Исходно гетерополярные формы радиолярий (Pylomariata, мезозойско-кайнозойские Nassellaria и Phaeodaria) имеют более или менее удлиненные конические скелеты. Число радиусов симметрии 2-4, редко 5-6, наиболее обычное число внешних придатков – 3, так называемый треножник.

Билатеральная (рис. 1л; рис. 3д). Дифференцирование скелета в направлении одной морфологической оси (условно верх-низ) и в направлении переднезадней оси, которая лежит в плоскости симметрии: получают

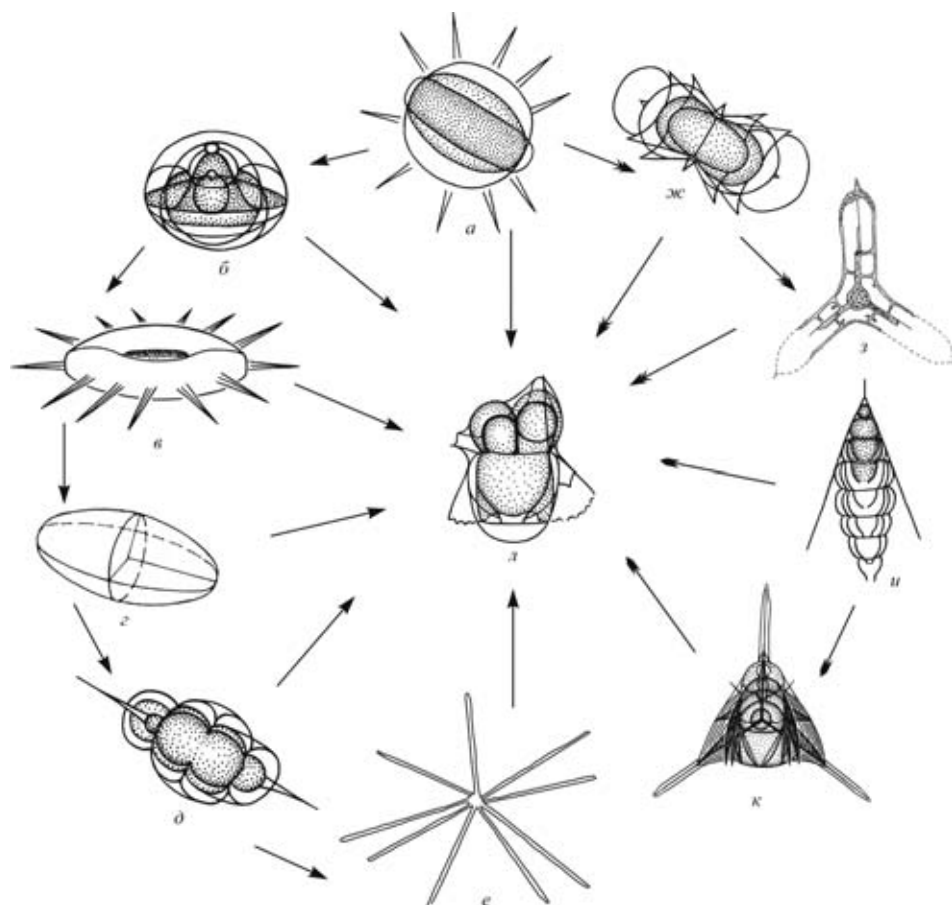


Рис. 1. Симметрия и возможные преобразования формы скелета в филогенезе радиолярий Polycystina (по Петрушевская, 1986 и Афанасьева, Амон, 2006 с изменениями и добавлениями): *а* – сферическая: гомаксонная; *б* – правильная полиаксонная: субсферическая; *в-е* – гомополярная (ставраксонная): *в* – дисковидная, *з* – эллипсоидальная, *д* – веретеновидная, *е* – п-лучевая; *ж* – гантелевидная, *з* – лучевая; *и, к* – монаксонная (гетерополярная): *и* – субконусовидная, *к* – форма треножника; *л* – билатеральная, разнообразной формы.

зеркальные половинки скелета. Билатеральная симметрия является завершающей ступенью специализации радиолярий, причем не только внутри скелета, но в наружном расположении камер и сегментов, например, Acanthodesmiidae, Cannobotryidae и Albaillellata. Например, нами (Афанасьева, Амон, 2003, 2006) предлагалась гипотетическая модель происхождения билатерально-симметричных псевдораковин Lapidopiscidae от гетерополярных скелетов Ceratoikiscidae, состоящих из трех игл, пересекающихся в форме треугольника (рис. 3 з).

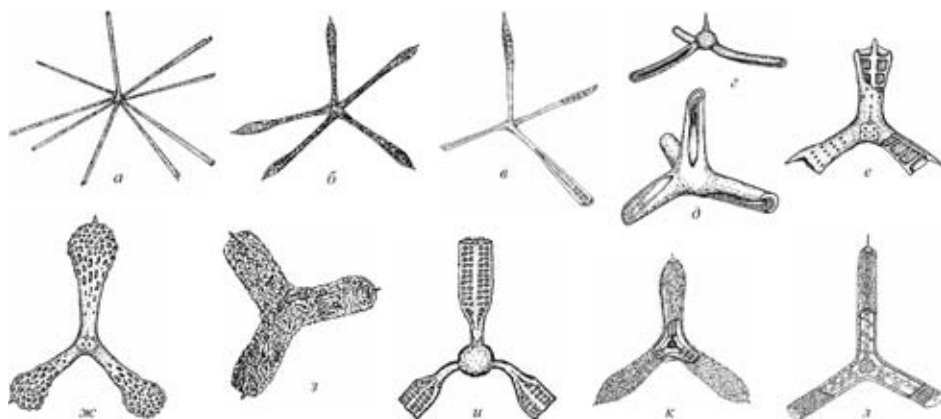


Рис. 2. Лучевые и лопастные скелеты ставраксонных радиолярий отряда Radiiiformata: *a* – Polyfistulidae: Polyfistula; *б, в* – Quadriremidae: *б* – Quinqueremis, *в* – Quadriremis; *з, д* – Ormistonellidae: *з* – Nazarovella, *д* – Ormistonella; *е* – Deflandrellidae: Deflandrella; *ж-л* – Latentifistulidae: *ж* – Ishigaum, *з* – Latentifistula, *и* – Pseudotormentus, *к* – Latentibifistula, *л* – Triactofenestrella.

Анализ геометрических форм скелетов радиолярий позволяет по-новому подойти к вопросу о возможном усложнении типов симметрии по четырем основным направлениям (Афанасьева, Амон, 2006, 2012в):

- (1) от почти идеальной сферы (рис. 1*а, б*) до дисковидных, эллипсоидальных, веретенovidных (рис. 1*в-д*) и п-лучевых скелетов (рис. 1*е*);
- (2) радиально-лучистые формы (рис. 1*ж, з*);
- (3) субконусовидные скелеты с пиломом (рис. 1*и, к*);
- (4) формирование иглистого скелета Aculearia (рис. 3*а-г*).

Билатеральная симметрия (рис. 1*л*; рис. 3*д*), как подчеркивал Беклемишев (1964), может возникать независимо самыми разными путями от каждой из перечисленных форм скелета.

М.Г. Петрушевская (1981, 1986) рассматривала последовательность усложнения симметрии скелетов в филогенезе радиолярий согласно морфологическому ряду Беклемишева (1964), как подтверждение идеи Геккеля

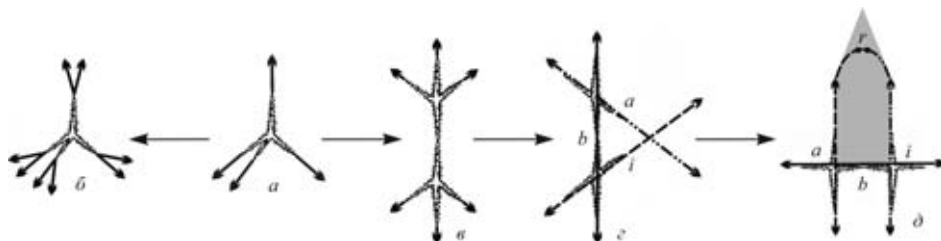


Рис. 3. Схема формирования иглистого скелета Aculearia (Афанасьева, Амон, 2006: *а* – Palacantholithidae, *б* – Palaeospiculinae, *в* – Xiphocladiellidae, *г* – Ceratoikiscidae, *д* – Albaillellata. Обозначения: *а, б, в* – основные иглы скелета.

(Naeskel, 1884) о происхождении гетерополярных *Nassellaria* от гомаксонных сферических предков. Однако это кажется нам не столь вероятным. Появление и развитие разнообразных субконусовидных форм с пиломом (рис. 1и, к) является самостоятельным направлением становления билатеральных скелетов радиолярий (Афанасьева, Амон, 2006).

Согласно представлениям, восходящим к «конструктивной морфологии» Д.Д. Мордухай-Болтовского (1936), сферическая и сфероидная формы скелета, обеспечивая высокие прочностные характеристики, одновременно являются весьма экономичными в плане расходования организмом вещества, энергии и информации для ее создания (принцип «минимакса» – достижение максимального результата при минимуме средств). Эти формы скелета являются идеальными для обеспечения планктонного образа жизни, присущего многим протистам (Петрушевская, 1986; Афанасьева, Амон, 2006; Войтеховский, 2002).

Показано, что в живой природе реализуется не все многообразие теоретически возможных полых полиэдров, предельным выражением которых являются сфера и сфероид, а только лишь весьма ограниченная часть. Это связано с программой «экономного расходования вещества и энергии» по Ю.Л. Войтеховскому (2002). Одним из важных выводов Войтеховского (2002, 2004а,б, 2012) является биоминеральная гомология между полиэдрами фуллеренов углерода, полиэдрами вирусов, скелетов радиолярий и колоний вольвоксов. Данная гомология предопределена не столько вещественным воплощением, сколько топологической оптимальностью формы, реализующей минимум энергетических и материальных затрат. Небезынтересно отметить, что потенциально стабильными являются фуллерены диапазона C₆₀-C₁₀₀, т. е. максимально симметричные, с минимальным числом контактирующих граней. Этим условиям отвечают икосаэдрическая и додекаэдрическая группа полиэдров, часто воплощающаяся в скелетах сферических радиолярий (Афанасьева, Амон, 2004).

При этом важно подчеркнуть, что сфероиды и полиэдры неоднократно появлялись в большом количестве на разных этапах эволюционного развития радиолярий, и не были отринуты как «пройденный примитивный» этап, а наоборот выбирались как наиболее оптимальные по расходованию строительного материала и идеальные для жизни в планктоне.

Гетерополярная и другие типы так называемых «высших» симметрий более затратные и скорее отражают узкие приспособительные реакции. Среди радиолярий это наглядно проявляется у представителей класса *Stauraxonaria*.

Вместе с тем, «зависимость между формой симметрии простейших, с одной стороны, средой обитания и способом движения, с другой, – отнюдь не является однозначной и абсолютной» (Беклемишев, 1964, с. 33).

СМЕШАННАЯ СИММЕТРИЯ

Появившиеся в раннем кембрии радиолярии не «удовольствовались» только наиболее экономной сферической (сфероидной) формой, а начали создавать фигуры со смешанной симметрией, ведущей к дополнительным расходам вещества и энергии. Подобные траты оправданы тем, что разнообразная внешняя орнаментация на скелете существенно облегчает парение (флотирование) организма в толще воды в различных по физико-химическим параметрам (температура, плотность, вязкость, соленость, содержание газов и определенных растворенных минеральных веществ и др.) биотопах Мирового океана (Петрушевская, 1986; Афанасьева, Амон, 2006).

Вся постратанкембрийская история развития радиолярий вплоть до наших дней – это история выработки различных и самых разнообразных по геометрии скелетов, стремящихся к классической симметрии: сферы и сфероиды присутствуют во многих систематических группах; конусы широко представлены у населлярий; цилиндры, например, у представителей родов *Prunobrachium*, *Ommatogramma*; и многие другие причудливые формы, но с неизменными элементами смешанной симметрии.

Фигуры смешанной симметрии не могут быть разделены на равные части, следовательно, являются асимметричными с точки зрения классической симметрии. Огромное число морфотипов скелетов радиолярий образовано фигурами со смешанной симметрией, но такие фигуры никак нельзя назвать бесформенными, лишенными какой-либо упорядоченности, напротив, они гармоничны, соразмерны и конструктивны.

Комбинация различных геометрически-симметричных тел в одном скелете радиолярий приводит к вырождению симметрии. Так, если на правильной сфере появляется хотя бы одна цилиндрическая игла, то составная фигура будет иметь общими ось ∞ и плоскости симметрии, проходящие через эту ось (с исчезновением всех элементов симметрии цилиндра, перпендикулярных оси ∞ ; а у сферы – с возникновением выделенного диаметра и исчезновением перпендикулярных ему элементов). В общем случае сфера с «уложенным» на нее цилиндром, т. е. фигура со смешанной симметрией, сохранит лишь один элемент симметрии – плоскость, проходящую через ось цилиндра и центр сферы.

Классическая симметрия никогда не реализуется в биологических и кристаллических объектах с математической точностью. Живые организмы и минералы являются наиболее композиционно-сложными и структурно-совершенными иерархически организованными системами вещественно-материального мира. Конечная форма и структурированность скелета являются результирующим итогом действия и взаимодействия двух основных факторов: абиогенного и биогенного (Голубев, 1981; Афанасьева, 1990, 2000; Afanasieva, 1990, 2006; Юшкин, 1996; Афанасьева, Амон, 2004, 2006).

Процесс роста скелета в клетке радиолярий, равно как и других организмов, контролируется цитобioхимическими реакциями, управляемыми генетическим аппаратом, что не позволяет SiO_2 в полной мере кристаллизоваться так, как это присуще ему в неживой среде (Афанасьева, 1990, 2000; Afanasieva, 1990, 2006; Афанасьева, Амон, 2004, 2006).

В кристаллографии это привело к разделению понятий «реального кристалла» и «идеального кристалла». Кристаллографические исследования Р.В. Галиулина (1996а, б) показали, что если внутренняя геометрия зародыша кристалла совпадает с геометрией пространства, в котором он растет, то структура некоторое время продолжает расти. Однако пространство, в частности пространство органической матрицы скелетов, неоднородно, и для того, чтобы присоединить очередной атом, кристалл должен сначала подготовить для него место. В связи с этим в процессе роста кристалл меняет кривизну пространства. Для роста кристалла достаточно, чтобы его структура была комбинаторно правильной. И «если бы эта комбинаторная правильность могла сохраниться, то ничто бы не помешало собрать всю Вселенную в один кристалл. Однако комбинаторная правильность неустойчива, она всегда скатывается к метрической правильности, которая уже несовместима с меняющейся кривизной пространства (Кузьменков, 1977; Галиулин, 1994).

В противоположность кристаллам живые организмы не столь детерминированы. Эта недетерминированность проявляется в виде мутаций, которые снимают напряжения, возникающие между растущей структурой и пространством» (Галиулин, 1996б, с. 103-104).

АСИММЕТРИЯ

Классическая симметрия – это, хотя и важный, но не единственный способ проявления упорядоченности, регулярности и соразмерности строения организмов и их развития. Одним из проявлений упорядоченности биоструктур оказывается асимметрия, проявляющаяся во многих аспектах. Случаем отклонения от идеальной симметрии является смещение, соединение в предмете различных, иногда противоречивых симметрий. Такие фигуры, если брать их чисто геометрическую сущность, в целом представляются асимметричными, но составные части симметричны.

Распространено явление, когда геометрически возможными являются левые и правые зеркальные двойники в зеркальной симметрии, но в живой природе, наряду с существованием обеих зеркальных модификаций, существует и запрет на развитие какой-либо из модификаций. У радиолярий, например, направление ветвления апофизов на иглах и закручивание игл может быть либо только правым, либо только левым. Другим примером асимметрии у радиолярий и других живых биоструктур можно назвать расположение элементов морфологии по двум системам спиральных рядов на

поверхности более или менее вытянутого конуса. У радиолярий – это расположение камер у спирально свернутых *Porodiscidae*, у которых числа рядов, ориентированных противоположно, принимают не какие угодно значения, а только вполне определенные: 1/2, 2/3, 3/5, 8/13, 13/21..., пределом этого ряда является иррациональное число a (золотое сечение) (Амон, 2003):

$$a = 1/2 \cdot (\sqrt{5} - 1) \approx 0.61803...$$

Асимметрия не означает бесформенности, хаоса, и асимметрия у радиолярий – это гармония, которую мы всего лишь не можем описать языком классической теории симметрии из-за его недостаточности. Однако мы видим, понимаем и чувствуем эти гармонию. И здесь полезно напомнить, что эквивалентность высших порядков гармоний и хаоса проявляется в высшем равновесии. Гармонии должно быть в меру. Слишком много гармонии – это смерть. Слишком много хаоса – это распад (Мельников, Амон, 2001).

ДИССИММЕТРИЯ

Нелишне напомнить, что Беклемишев (1964), построив стройную восходящую систему усложнения симметрии, тем не менее, не считал ее идеальной и адекватно отражающей реалии мира протист. В частности он писал: «начав с полного, или почти полного отсутствия симметрии у амёб, в конце рядов развития, у наиболее дифференцированных инфузорий, динофлагеллят и пр., мы опять приходим к почти полному отсутствию симметрии» (Беклемишев, 1964, с. 28-29). Различая первичную асимметрию, т. е. асимметрию неопределенности, и вторичную, т. е. асимметрию гиперспециализации, Беклемишев (1964, с. 30) предложил обозначать вторую термин «диссимметрия», т. е. нарушенная симметрия.

С нашей точки зрения диссимметрия, иначе хиральность, есть уникальное свойство Живого реализовывать невозможные с точки зрения законов физики и химии процессы и явления, в том числе и в симметрии, и, как полагают, фундаментально отличающее Живое от Косного (Кизель, 1980). Считается, что о диссимметрии впервые писал Л. Пастер в 1848 г. и осознал ее как космическое явление жизни. Изучение диссимметрии продолжил П. Кюри, сформулировавший теорему в 1884 г., впоследствии названной его именем – «принцип Кюри». Позднее, в 1930-50х гг. проблеме диссимметрии придавал большое значение В.И. Вернадский, откуда термин и понятие получили распространение в отечественной литературе. На самом деле, Пастер в своих трудах, в том числе незадолго до своей кончины в 1883 г., говорил только об асимметрии: «Жизнь, открытая нам, есть порождение асимметрии мира и ее следствий... Я даже думаю, что все виды жизни в изначальной своей структуре, в своих внутренних формах являются порождением космической асимметрии» (Гарднер, 2007, с. 148).

Таким образом, как нам кажется, термин и понятие «диссимметрия», являющаяся частным случаем общей асимметрии (Шафрановский, 1968; Шубников, Копчик, 1972; Амон, 2003; Гаднер, 2007), мало пригодны для раскрытия проблемы симметрии тела у радиолярий и лучше пользоваться более нейтральным термином «асимметрия» или «нарушенная симметрия», «вырожденная симметрия», «недостаточная симметрия».

СТАВРАКСОННЫЕ РАДИОЛЯРИИ

Главной особенностью представителей класса *Stauraxonaria* Afanasieva et Amon, 2005, принципиально отличающей их от всех других радиолярий, является своеобразная форма скелета: от уплощенной дискоидальной и субтреугольной до веретеновидной, от пирамидальной до лопастной с тремя, пятью и более лопастями. Данный класс радиолярий характеризуется перекрестными осями симметрии, лежащими в плоскости, перпендикулярной главной оси: ставраксонные (монаксонные, гомополярные) (рис. 1*в-е*; рис. 2*а-д*) и радиально-лучевые (рис. 1*ж, з*; рис. 2*е-л*) типы симметрии. Представители класса *Stauraxonaria* распространены с позднего кембрия до наших дней.

Радиоляриям в целом присущ эволюционный тренд прогрессивного развития с усложнением структур скелета во времени (Петрушевская, 1986; Афанасьева, 2000; Амон, 2000; Афанасьева, Амон, 2006). Однако стараксонии в отдельных филах демонстрируют регрессивное развитие, чем-то напоминающее катаморфоз. Это наблюдается, например, по сокращению скелетных структур в линии развития (рис. 2*а-е*): от представителей рода *Polyfistula* (Южный Урал, артинский ярус; США, Невада и Техас, леонардский ярус) с семью и более лучами-лопастями к формам с пятью (*Quinqueremis*, средняя пермь США, Техас), четырьмя (*Nazarovella*, *Ormistonella*, верхняя пермь, Япония) и тремя лучами (*Defladrella*, верхняя пермь, Япония) (Афанасьева, 2000; Амон, 2000; Афанасьева, Амон, 2006).

Разумеется, это не есть истинный катаморфоз в том смысле, который в него обычно вкладывается в эволюционной биологии, т.е. регрессивные преобразования организмов при переходе их к более простым условиям существования, лежащие в основе регрессивной эволюции – катагенеза по И.И. Шмальгаузену (Биологический..., 1986). Катаморфоз часто связан с потерей организмами в процессе эволюции некоторых приспособлений к частным условиям существования (деспециализация), например, у усоногих раков, оболочников и др. В случае ставраксоний верхней перми Японии имеет место не деспециализация, а наоборот, приспособление к каким-то особым условиям существования, возможно, к активной вулканической деятельности, свойственной региону (подушечные лавы), частым подвижкам блоков земной коры (олистостромы и олистолиты, конгломераты) (De Wever, Caridroit, 1984; Caridroit, De Wever, 1986), и, соответственно,

к очень активной гидродинамике (волнение, течения, включая турбидные потоки). В таких условиях избыточное количество лучей-лопастей в скелете может стать не только избыточным, но и опасным.

Интересно отметить, что при уменьшении (редукции) числа лучей статус симметрии скелета возрастает. Это относится к ставраксонариям с тремя лопастями, которые могут быть названы вполне симметричными: *Ishigaum*, *Latentifistula*, *Pseudotormetus*, *Latentibifistula*, *Triactofenestrella* (рис. 2ж-л). Представители данных родов отличаются развитием радиально-лучевых форм с одной неопределенной плоскостью симметрии, относительно которой две половины объекта зеркально симметричны. Но даже в этом случае, как, впрочем, и у истинно билатерально-симметричных животных (венец эволюции, по В.Н. Беклемишеву), зеркальная симметрия проявляется не в абсолютной аутентичности левой и правой половинок тела, а лишь в схожести или сравнительно полной идентичности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Восприятие красоты у человека чаще всего связано с симметрией: «Симметрия отражения – один из древнейших и самых простых способов создавать изображения, радующие глаз» (Гарднер, 2007, с. 37). Неудивительно поэтому, что специалисты-протистологи, начиная с Геккеля (Haeckel, 1884), столько внимания уделяли симметрии, находя ее в одноклеточных микроорганизмах.

Радиолярии – редкая и своеобразная группа протист, использующая для построения внутреннего скелета полимер ортокремниевой кислоты и обладающая совершенным с геометрической точки зрения скелетом. Их скелеты не только фантастически разнообразны, но красивы и весьма привлекательны с эстетической точки зрения. Более того, известны попытки, уподобляя скелеты радиолярий кристаллам, создавать стройные классификационные схемы (Haeckel, 1884, 1887; Мордухай-Болтовской, 1936; Хабаров и др., 1959; Жамойда, Козлова, 1971; Точилина, 1989, 1997), подобно системе Федорова-Шенфлиса в кристаллографии, в которых вывод и объяснение наблюдаемых форм симметрии у живых тел представляли бы собой задачу геометрии и топологии, а не биологии.

Вместе с тем, классическая симметрия никогда не реализуется в биологических и кристаллических объектах с математической точностью. Живые организмы и минералы являются наиболее композиционно-сложными и структурно-совершенными иерархически организованными системами вещественно-материального мира. Поэтому уподобление скелетов радиолярий кристаллическому телу с идеальной симметрией неправомерно (Афанасьева, 1990, 2000; Afanasieva, 1990, 2006; Афанасьева, Амон, 2004, 2006, 2012в):

(1) опаловая скелетная ткань радиолярий в прижизненном состоянии не является кристаллоидом, а проявляет себя как очень сложный по струк-

туре и свойствам биогенный агломерат кристаллических и органических компонентов;

(2) рост и развитие скелета не подчиняется законам симметрии, властвующих в мире кристаллов, включая сюда и принцип Кюри (наложение симметрии среды обитания на симметрию тела).

В действительности у радиолярий господствует не классическая симметрия кристаллов, а биосимметрия организмов. Более того, строго симметричные формы среди радиолярий достаточно редки. Морфологическое многообразие их скелетов образовано фигурами со смешанной симметрией. Но подобные конфигурации никак нельзя назвать бесформенными, лишенными какой-либо упорядоченности, хотя с точки зрения классической симметрии формы со смешанной симметрией являются асимметричными. Однако они не бесформенны, а, скорее, гармоничны в своем строении. Более того, формы со смешанной симметрией появились в самом начале эволюции радиолярий и доминировали на всех ее этапах.

Заметим также, что возникновение и существование новых структур скелета определяется исключительно активным взаимодействием с внешней средой и состоит в стремлении организмов адаптироваться к новым условиям с помощью более совершенных морфотипов. Такая адаптация сопровождается изменением (понижением) типа симметрии при переходе от прежнего более простого к будущему более сложному состоянию с возникновением принципиально новых качеств и свойств скелетов (Горяинов, Иванюк, 2001; Горяинов и др., 2012). Иными словами, в процессы экспансии радиолярий, особенно при освоении новых биотопов и обретении ими новых адаптивных реакций, периоды начальных стадий инвазии должны сопровождаться понижением типа симметрии, т.е. усилением асимметрии. Конечным стадиям экспансии будет свойственно повышение типа симметрии.

Таким образом, реальная смешанная симметрия в скелетах радиолярий является правилом, а не исключением. Поэтому можно вполне согласиться с выводом Войтеховского: «По-видимому, должен иметь место принцип: чем активнее движение биологической формы, чем динамичнее ее морфогенез, тем ниже ее результирующая симметрия. Ее абсолют – комбинаторно асимметричная форма» (Войтеховский, 2012, с. 9).

Но главное, чем симметрия живых организмов отличаются от идеальной симметрии кристаллов – это непредсказуемость и обязательное присутствие элементов нерациональности (Галиулин, 1996б). Гармонии должно быть в меру. Абсолютно симметричный мир – безжизненный.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Проблемы происхождения жизни и становления биосферы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Амон Э.О.* 2000. Система высших таксонов ставраконных радиолярий палеозоя // Ежегодник-1999 Института геологии и геохимии УрО РАН. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН. С. 3–11.
- Амон Э.О.* 2003. К вопросу об ограниченности использования элементов теории симметрии в классифицировании ископаемых радиолярий // Ежегодник-2002 Института геологии и геохимии УрО РАН. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН. С. 3–13.
- Амон Э.О.* 2005. Роль и значение симметрологии в классифицировании и описании радиолярий // Микропалеонтология в России на рубеже веков. Мат-лы 13 Всерос. микропалеонтол. совещ. (Москва, ГИН РАН, 21–23 ноября 2005). М.: Геос. С. 69–70.
- Амон Э.О.* 2011. Палеонтология микрофоссилий (микропалеонтология): учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского гос. горного ун-та. 520 с.
- Афанасьева М.С.* 1990. Ультраструктура и вторичные изменения раковин радиолярий // Палеонтол. журн. № 1. С. 28–38.
- Афанасьева М.С.* 2000. Атлас радиолярий палеозоя Русской платформы. М.: Научный Мир. 480 с.
- Афанасьева М.С., Амон Э.О.* 2003. Новая классификация радиолярий // Палеонтол. журн. № 6. С. 72–86.
- Афанасьева М.С., Амон Э.О.* 2004. Синергетика пространственно-структурных взаимосвязей в биоминерализации скелетов радиолярий // Биниология, симметрология и синергетика в естественных науках. Тр. 4 Междунар. конф. Тюмень: ТюмГНГУ. С. 167–172.
- Афанасьева М.С., Амон Э.О.* 2006. Радиолярии. М.: ПИН РАН. 320 с.
- Афанасьева М.С., Амон Э.О.* 2012а. Кембрийский этап эволюции радиолярий и его особенности // Современная микропалеонтология. Тр. 15 Всерос. микропалеонтол. совещ. (12–16 сентября 2012 г., Геленджик). М.: ГИН РАН. С. 261–264.
- Афанасьева М.С., Амон Э.О.* 2012б. Симметрия в скелетах ставраконных радиолярий // Современная микропалеонтология. Тр. 15 Всерос. микропалеонтол. совещ. (12–16 сентября 2012 г., Геленджик). М.: ГИН РАН. С. 265–268.
- Афанасьева М.С., Амон Э.О.* 2012в. К вопросу о симметрии и асимметрии в скелетах радиолярий // Морфогенез в индивидуальном и историческом развитии: симметрия и асимметрия. Тез. докл. конф., Москва, 14–16 ноября 2012 г. М.: ПИН РАН. С. 2–3.
- Афанасьева М.С., Амон Э.О.* 2012г. Полые структуры в скелетах радиолярий и их функциональное значение // Литосфера. № 6. С. 34–54.
- Беклемишев В.Н.* 1964. Основы сравнительной анатомии беспозвоночных. Т. 1. Проморфология. М.: Наука. 324 с.
- Биологический энциклопедический словарь. 1986 / Ред. М.С. Гиляров. М.: Сов. Энциклопедия. 565 с.

- Войтеховский Ю.Л. 2002. Биоминеральные гомологии: фуллерены, радиолярии, вольвоксы // Биниология, связь с другими парадигмами естествознания. Межвузовский сб. научн. тр. Тюмень: ТюмГНГУ. С. 112–118.
- Войтеховский Ю.Л. 2004а. Примеры биоминеральной гомологии: I. Фуллерены и радиолярии // Биниология, симметрология и синергетика в естественных науках. Тр. 4 Междунар. конф. Тюмень: ТюмГНГУ. С. 59–62.
- Войтеховский Ю.Л. 2004б. Примеры биоминеральной гомологии: II. Вольвоксы и вирусы // Биниология, симметрология и синергетика в естественных науках. Тр. 4 Междунар. конф. Тюмень: ТюмГНГУ. С. 62–65.
- Войтеховский Ю.Л. 2012. Симметрия, диссимметрия и асимметрия полиэдрических форм: определения, становление, функции // Морфогенез в индивидуальном и историческом развитии: симметрия и асимметрия. Тез. докл. конф., Москва, 14–16 ноября 2012 г. М.: ПИН РАН. С. 8–9.
- Галиулин Р.В. 1994. Идеальные кристаллы в пространствах постоянной кривизны // Кристаллография. Т. 39. № 4. С. 581–585.
- Галиулин Р.В. 1996а. Принципиальное различие между органическими и неорганическими структурами // Минералогия и жизнь: биоминеральные взаимодействия. Тез. докл. 2 Междунар. семинара. Сыктывкар: Геопринт. С. 9–10.
- Галиулин Р.В. 1996б. Как жизнь спасает Вселенную от минерализации // Минералогия и жизнь: биоминеральные взаимодействия. Тез. докл. 2 Междунар. семинара. Сыктывкар: Геопринт. С. 103–104.
- Гарднер М. 2007. Этот правый, левый мир: пер. с англ. Изд. 2-е, стереотипное. М.: Ком Книга, 272 с.
- Голубев С.Н. 1981. Реальные кристаллы в скелетах кокколитофорид. М.: Наука. 164 с.
- Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. 2001. Самоорганизация минеральных систем. М.: Геос. 212 с.
- Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю., Калашиников А.О. 2012. Самоорганизация структур литосферы – характерные признаки и практические следствия // Козволюция геосфер: от ядра до Космоса. Мат-лы Всерос. конф., Саратов, 17–20 апреля 2012 г. Саратов: Сарат. гос. тех. ун-т. С. 106–110.
- Жамойда А.И. 1981. Некоторые проблемы изучения радиолярий (этапность развития, зональная стратиграфия, наименование подкласса) // Систематика, эволюция и стратиграфическое значение радиолярий. М.: Наука. С. 5–9 (Тр. ВСЕГЕИ. Нов. сер. Т. 226).
- Жамойда А.И., Козлова Г.Э. 1971. Соотношение подотрядов и семейств в отряде Spumellaria // Новое в систематике микрофауны. Л.: ВСЕГЕИ. С. 76–82.
- Кизель В.А. 1980. Оптическая активность и диссимметрия живых систем // Успехи физических наук. Т. 131. Вып. 2. С. 209–238.
- Кузьменков Л.С. 1977. Рост структур с сохранением их подобия. Теория А.А. Власова. Процессы реального кристаллообразования. М.: Наука. С. 227.

- Мельников Б.Н., Амон Э.О. 2001. О соотношении гармоний и хаоса (несколько дефиниций) // Биниология, симметрология и синергетика в естественных науках. Мат-лы междунар. конф. Тюмень: ТюмГНГУ. С. 15–18.
- Мордохай-Болтовской Д.Д. 1936. Геометрия радиоларий // Уч. зап. Ростов. ун-та. Вып. 8. С. 1–91.
- Назаров Б.Б. 1988. Радиоларии палеозоя. Л.: Недра. 231 с. (Практическое руководство по микрофауне СССР. Справочник для палеонтологов и геологов. Т. 2).
- Петрушевская М.Г. 1981. Радиоларии отряда Nassellaria Мирового океана. Л.: Наука. 406 с.
- Петрушевская М.Г. 1986. Радиолариевый анализ. Л.: Наука. 200 с.
- Точилина С.В. 1989. К систематике Nassellaria (класс Radiolaria). Палеонтолого-стратиграфические исследования фанерозоя Дальнего Востока. Владивосток: ДВО АН СССР. С. 58–63.
- Точилина С.В. 1997. Проблемы систематики Nassellaria. Биохимические особенности эволюции. Владивосток: ДВО РАН. 71 с.
- Хабаков А.В., Стрелков А.А., Липман Р.Х. 1959. Подкласс Radiolaria // Основы палеонтологии. Т. 1. Общая часть. Простейшие. М.: Изд-во АН СССР. С. 369–467.
- Шафрановский И.И. 1968. Симметрия в природе. Л.: Недра. 184 с.
- Шубников А.В., Копчик В.А. 1972. Симметрия в науке и искусстве. М.: Наука. 340 с.
- Юшкин Н.П. 1996. Биоминеральные взаимодействия. От биоминералогии к витаминералогии // Минералогия и жизнь: биоминеральные взаимодействия. Тез. докл. 2 Междунар. семинара. Сыктывкар: Геопринт. С. 7.
- Afanasieva M.S. 1990. Experimental evidence for changes during fossilization of Radiolarian tests and emlications for a model of biomineralizations // Marine micropaleontol. № 15. P. 233–248.
- Afanasieva M.S. 2006. Biomineralization and development of radiolarian skeletons // Environ. Micropaleontol., Microbiol. Meiobenthol. V. 3. P. 1–30.
- Afanasieva M.S., Amon E.O., Agarkov Yu.V., Boltovskoy D.S. 2005. Radiolarians in the geological record // Paleontol. J. V. 39. Suppl. 3. P. S135–S392.
- Amon E.O., Braun A., Chuvashov B.I. 1990. Lower Permian (Artinskian) Radiolaria from the Sim type section, southern Urals // Geol. Palaeontol. № 24. P. 115–137.
- Blome Ch.D., Reed K.M. 1995. Radiolarian biostratigraphy of the Queen River formation, Black Rock Terrane, north-central Nevada – correlation with eastern Klamath Terrane geology // Micropaleontol. V. 41. № 1. P. 49–68.
- Caridroit M., De Wever P. 1986. Some Late Permian radiolarians from pelitic rocks of the Tatsuno formation (Hyogo Prefecture), southwest Japan // Mar. Micropaleontol. V. 11. P. 55–90.
- De Wever P., Caridroit M. 1984. Description de quelques nouveaux Latentifistulidea (radiolaires polycystines) Paleozoiques du Japon // Rev. Micropaleontol. V. 27. № 2. P. 98–106.

- Haeckel E.* 1884. Die Geometrie der Radiolarien // Sitzungsber. Med.-Nat. Gesellsch. Jena. Bd 17. S. 104–108.
- Haeckel E.* 1887. Report on the Radiolaria collected by H.M.S. “Challenger” during the years 1873–1876 // Rep. sci. res. voy. H.M.S. Challenger. Zoology. Edinburgh. V. 18. 1803 p.
- Nazarov B.B., Ormiston A.R.* 1985. Evolution of Radiolaria in the Paleozoic and its correlation with the development of other marine fossil groups // Senckenberg. Leth. Bd 66. № 3/5. S. 203–215.
- Nazarov B.B., Ormiston A.R.* 1993. New biostratigraphically important Paleozoic Radiolaria of Eurasia and North America // Micropaleontol. Spec. publ. 6: Radiolaria of Giant and Subgiant Fields in Asia. P. 22–60.
- Retallack G.J.* 2005. Permian greenhouse crises. The Nonmarine Permian / Eds S.G. Lucas, K.E. Zeigler. New Mexico Mus. Nat. Hist. Sci. Bull. № 30. P. 256–269.
- Sosson M., De Wever P., Vrielijnck B.* 1983. Datation et analyse structurale de l’unité ophiolitique du Hot Springs Range (NW du Nevada, Etats Unis): conséquences sur l’âge de mise en place de ce domaine océanique sur le craton nord américain // C.R. acad. sci. Paris. V. 298. № 6. P. 235–240.

SYMMETRY IN THE RADIOLARIAN SKELETONS

M.S. Afanasieva, E.O. Amon

The history of Radiolarian evolution from the earliest Cambrian to present days – is a history of the making of very varied and divers geometry of the skeletons, tending to the forms of classical symmetry: spheres and spheroids, cones, cylinders and many other shapes, but with indispensable participation of the elements of mixed-symmetry. Skeletons with mixed-symmetry appeared in the early evolution of radiolarians and dominated during all periods. These figures from the point of view of classical symmetry are the asymmetric, lacking any order. However, they are not formless, but rather harmonious in its structure. The classical symmetry is never realized in the biological and crystalline objects with mathematical accuracy. Living organisms and minerals are compositionally complicated and structurally perfect hierarchically organized systems of real material world. Therefore, the assimilation of radiolarian skeletons to crystalline body with ideal symmetry is incorrect.

Key words: Radiolaria, classical symmetry, mixed-symmetry, types of symmetry, morphology, Phanerozoic.