

## КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА «РАУПОЛОГИЯ» НА БАЗЕ КОНХОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА Д. РАУПА

М.С. Бойко<sup>1</sup>, Э.В. Мычко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Палеонтологический институт РАН им. А.А. Борисяка  
boiko@paleo.ru

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова  
eduard.mychko@gmail.com

Геометрические и математические свойства спирали и их проявления в живой и неживой природе издавна привлекали внимание ученых. Крупнейшие математики прошлого, такие как Архимед, Фибоначчи, Ферма, Бернулли изучали спирали. Позднее к ним присоединились биологи, отметившие особую специфику и эстетику спиральных структур в живой природе. В целом список спиральных структур значительно шире типичных объектов конхиологии – раковин головоногих и брюхоногих моллюсков. К подобным биологическим объектам можно отнести раковины двустворчатых моллюсков, брахиопод, многих протистов (радиолярий, секретированных и агглютинированных фораминифер), скелеты некоторых ранних иглокожих, а также отдельные органы или их системы у различных растений (некоторые фруктификации, кора, закладка побегов и пр.) и позвоночных животных (кишечные клапаны акул, зубные системы и др.). Даже т.н. «симметрию скользящего отражения», присущую вендоэдиакарской биоте можно рассматривать как плоский срез турбоспирали.

Исследования спиральных раковин ископаемых головоногих моллюсков проводятся давно, первые работы такого рода начали появляться более 150 лет назад (Mosely, 1838; Neumann, 1846). Тогда были разработаны основные подходы конхометрии, которые успешно развивались последующими поколениями исследователей: механика/сопромат (Chamberlain, 1981; Illert, 1983 и др.); математические принципы формирования спирали и онтогенез раковинообразующей кривой (Ackerly, 1989; Кутыгин, 2009 и др.); гидродинамика и реактивное движение (Reyment, 1973; Chamberlain, 1976 и др.); моделирование раковины и экологическая интерпретация ее формы (Trueman, 1941; Raup, 1966; Барсков 1976, 1989 и др.).

Среди этого обширного списка методов мы выделили подход Д.М. Раупа, впервые, видимо, представленный научному сообществу в 1965 г. (Raup, Michelson, 1965). Это объясняется относительной простотой математического аппарата, наглядностью результатов, и широким применением специалистами, что важно для разного рода сравнений. Основное содержание метода Раупа заключается в том, что в общем случае, закрученные раковины завиваются по логарифмиче-

ской спирали. Необходимые параметры (a,b,c,d,e) могут быть измерены непосредственно на раковине или на её фотографическом изображении. Три отношения указанных параметров (W, D, S) адекватно описывают форму спирали и раковины.

1. Скорость расширения/прироста высоты оборотов  $W=de^2$ .
2. Форма образующей кривой  $D=cd$ .
3. Форма поперечного сечения оборота  $S=ba$ .

Далее Рауп статистически исследовал полученные результаты методом построения плотности морфологических позиций. На диаграмме W/D строятся изолинии равной плотности точек (морфологических позиций), что отражает общее морфополе исследуемого комплекса морфотипов, а также частоту их реализации. Наглядность такого графика позволяет оценить как все морфологическое разнообразие комплекса (конкретная координата – есть определенный морфотип), так и количество морфотипов (и их таксономическую принадлежность) в каждой подобласти.

Данные и выводы Раупа основанные на изменении 405 родов аммоноидей, могут быть сведены к следующему:

1. Раковины аммонитов по скорости расширения оборотов и степени их объемности занимают довольно обширную область, но почти не выходят за линию, отмечающую формы с не соприкасающимися оборотами ( $W=1/D$ ).
2. Общее распределение одномодальное: наибольшее число родов группируется вокруг одной модальной области ( $W \sim 2, D = 0,3-0,4$ ).
3. Отдельные таксоны (это было показано для палеозойских гониатитов и мезозойских литоцератин) занимают мало соприкасающиеся морфологические области. Такое положение связано, вероятно, с различиями в образе жизни и местобитании.

К настоящему времени на основе описанного метода проведены многочисленные исследования, посвященные выявлению разнообразия геометрии раковин цефалопод, ее историческим изменениям, функциональному и адаптивному значению (Барсков, 1976, 1989; Бойко, 2006; Chamberlain, 1976, 1981; Nikolaeva, Barskov, 1994; Saunders, Shapiro, 1986; Saunders, Work,

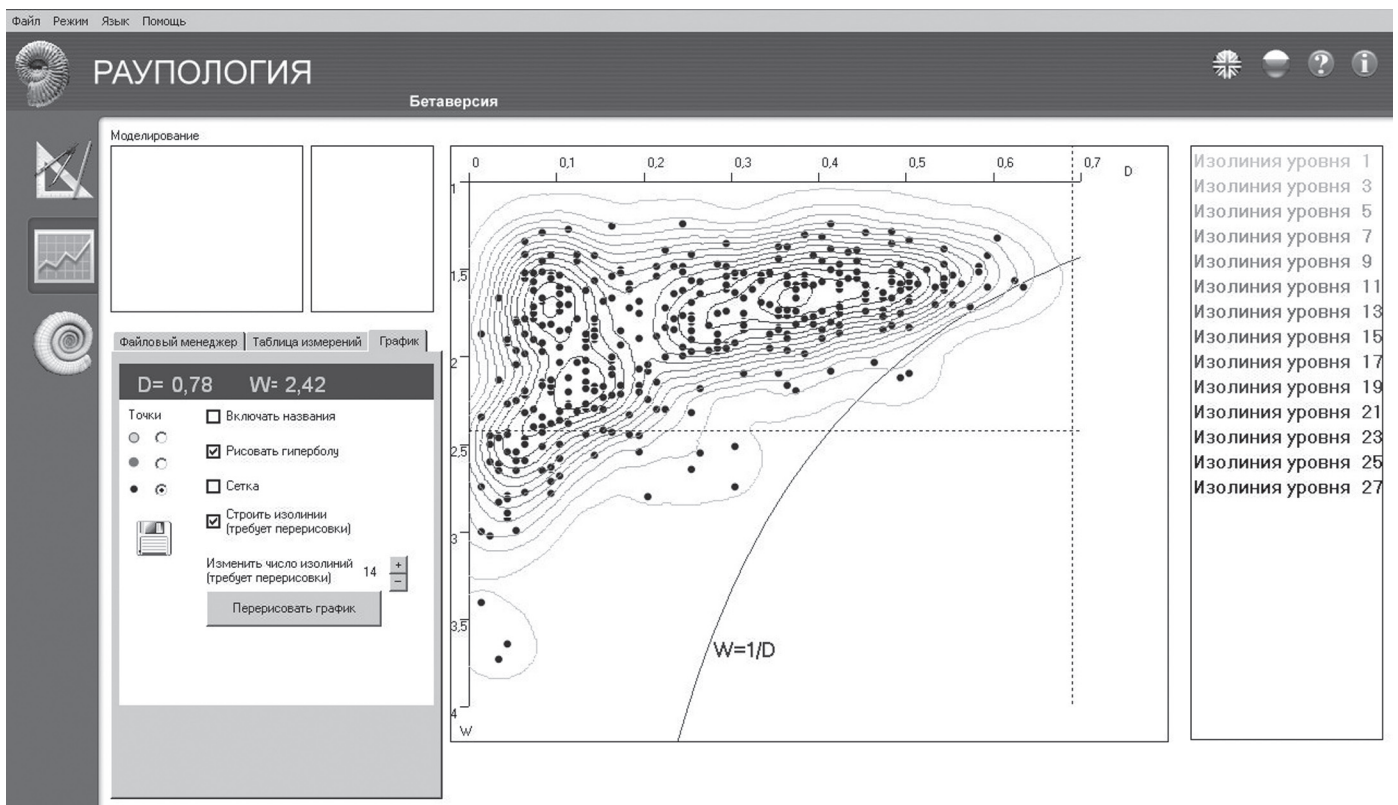


Рис. 1 Рауповская диаграмма по результатам обработки параметров 780 видов палеозойских аммоноидей Урала.

1996; Swan, Saunders, 1987; Saunders et al., 2004 и др.). Данные по 648 родам палеозойских аммоноидей (Varkov et al., 2008), дают исчерпывающую на настоящее время по полноте картину распределения морфологии планоспиральных раковин палеозойских аммоноидей. В ходе работы над последней монографией появилась идея компьютеризировать процесс сбора первичной информации, ее обработку и вывод результатов в виде, готовом для анализа. Значимость данной программы определяется возможностью быстро обрабатывать большие объемы данных, в том числе из цифровых публикаций.

В названии нашей программы мы постарались отразить вклад Д. Раупа в изучении ископаемых головоногих. Следует отметить, что научные заслуги Раупа, не ограничиваются описанными выше исследованиями. Достаточно вспомнить прекрасный учебник по теоретической палеонтологии (Рауп, Стэнли, 1974), или то, что Д. Сепкоски начал свои знаменитые исследования (Sepkoski, 1978 и позд.) с подачи Раупа, в свою бытность аспирантом последнего.

Компьютерные программы такого рода уже создавались исследователями аммоноидей, однако имеют определенные недостатки: написаны давно, на неактуальных сегодня языках программирования, несовместимых с современными операционными системами и/или рассчитаны на решение одной частной задачи,

конкретного исследователя, и не включают весь комплекс необходимых процедур. Показательной в этом отношении является недавняя электронная публикация Modeling Seashell Morphology (Ashline et al., 2009). В этой работе подробно разобраны основные понятия, математический аппарат и приемы программирования, ориентированные в основном на создание 3D-моделей различных типов раковин и их скульптурных элементов. Там же приведен обширный список ссылок на on-line ресурсы, посвященные этому вопросу. Создавая нашу программу, мы стремились сделать ее максимально прикладной в смысле «рауповских» исследований, и доступной для всех заинтересованных специалистов. «Раупология» в тестовом режиме будет доступна на сервере ПИН РАН по адресу [http://www.paleo.ru/download/geom\\_evolution.zip](http://www.paleo.ru/download/geom_evolution.zip).

Языком программы был выбран Visual Basic 6.0, предоставляющий возможность использовать обширный набор стандартных библиотек Microsoft. В силу этого программа может работать исключительно на платформах операционных систем семейства Microsoft Windows, в частности поздних версий, начиная от Windows XP.

Структура программы состоит из трех основных модулей. Первый представляет аппарат для анализа параметров раковин аммоноидей по загруженным фотографиям. Пользователем на фотографии определенным

образом выставляются контрольные точки (рис. 3), являющиеся ключевыми для вычисления параметров раковины. Далее отношения этих параметров автоматически рассчитываются по формулам ( $W=de^2$ ,  $D=cd$ ,  $S=ba$ ) и вносятся в таблицу измерений. Второй модуль представляет собой графический интерфейс схематического моделирования раковины в двух положениях – сбоку и со стороны устья. Моделирование происходит автоматически после расчета параметров  $W$  и  $D$  и  $S$ . Третий модуль состоит из графического окна декартовой плоскости, на котором отображаются точки отношения  $W$  к  $D$ . Для исследования такого набора точек (особенно если работа ведется на больших выборках) помимо прямого анализа распределения таксонов по морфотипам, используется уже упомянутый анализ распределения точек/морфологических позиций, методом изолиний равной плотности. Изолиния уровня  $S$  – это геометрическое место точек всех точек карты, плотность в которых равна  $S$ , может быть представлена как замкнутой, так и незамкнутой кривой. Области на карте с наибольшими плотностями всегда окружены концентрическими замкнутыми изолиниями. На выходе, таким образом, мы имеем аналог гипсометрической карты, роль высот в которой выполняет число раковин, относящихся к тому или иному морфотипу. «Возвышенности» на такой карте отмечают, что значительная часть амmonoидей исследуемого комплекса стремилась реализовать именно этот морфотип, «низменности», напротив, означают, что подобный морфотип был мало реализован в данном сообществе. Снаружи от внешней изолинии полученного морфологического поля находятся морфотипы, реализованные лишь однажды, или нереализованные в данном комплексе вообще (хотя и теоретически возможные).

Поскольку полученное морфологическое поле наложено на график соотношения  $W$  и  $D$ , не представляет сложности визуально отобразить ключевые морфотипы исследованной ассоциации и провести экологический анализ их распределения (рис. 4).

В настоящее время определены следующие направления развития программы:

- реализация графического отображения параметра  $S$ , который сейчас только рассчитывается (по некоторым причинам, его отображение вызвало трудности);
- 3D-визуализация формы раковины конкретного типа;
- возможность работы непосредственно с файлами формата pdf и djvu – самыми распространенными для цифровых публикаций (определенные наработки уже имеются);
- создание англоязычной версии программы.

Работа поддержана федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. по лоту «Проведение научных исследований коллективами научно-

образовательных центров в области общей биологии и генетики» (тема: «Становление скелетных организмов и экологической структуры морских сообществ»).

#### Благодарности

Авторы желают отметить вклад профессора И.С. Барскова как идейного вдохновителя данной работы. Также мы признательны проф. Т.Б. Леоновой и проф. А.С. Алексееву за ценные замечания и дополнения. Аспирант ВЦ РАН О. В. Костюченко оказал помощь на отдельных этапах программирования.

Статья подготовлена при поддержке Программы фундаментальных исследований № 28 Президиума РАН «Проблемы происхождения жизни и становления биосферы».

#### Список литературы

- Барсков И. С.* Геометрия свернутых раковин цефалопод и ее биологическое значение // Основные направления применения математических методов в палеонтологии. Кишинев, 1976. С. 16–19.
- Барсков И. С.* Морфогенез и экогенез палеозойских цефалопод. Изд-во Московского ун-та, 1989. 160 с.
- Бойко М. С.* Морфометрические методы в изучении амmonoидей // Современные проблемы изучения головоногих моллюсков. Морфология, систематика, эволюция, биостратиграфия. Материалы всероссийского совещания. М.: ПИН РАН, 2006. С. 85–88.
- Кутыгин П.В.* Методы изучения формы медиальной спирали амmonoидей // Современные проблемы изучения головоногих моллюсков. Морфология, систематика, эволюция, биостратиграфия. Материалы всероссийского совещания. М.: ПИН РАН, 2009. С. 127–130.
- Паун Д., Стэнли С.* Основы палеонтологии. М.: Мир, 1974. 438 с.
- Ackerly S. C.* Kinematics of accretionary shell growth, with examples from brachiopods and mollusks // Paleobiology, 1989. V. 15 P. 147–164.
- Barskov I.S., Boiko M.S., Konvalova V.A., and all.* Cephalopods in the Marine Ecosystems of the Paleozoic // Paleontol. Journ. 2008. V. 42. № 11. P. 1167–1284.
- Chamberlain J. A. Jr.* Flow patterns and drag coefficients of cephalopod shells // Palaeontology. 1976. V. 19. P. 593–563.
- Chamberlain J. A. Jr.* Hydromechanical design of fossil cephalopod / The Ammonoidea. Syst. Assoc. Spec. V. 18. Academic press. London, 1981. P. 289–336.
- Illert C. R.* The mathematics of Gnomonic seashells // Mathem. Biosci. Amster. 1983. V. 63. №1. P. 21–56.
- Mosely H.* On the geometrical forms of turbinated and discoid shells // Philosoph. Transact. of the Royal Soc. of London., 1838. V. 128. P. 351–370.
- Naumann C. F.* Ueber die Spiralen der Conchylien // Abhand. der Sächs. Akad. der Wissensch. Math.-Natur. K. 1846. Leipzig. Weid. P. 151–196.

*Nikolaeva S. V., Barskov I. S.* Morphogenetic trends in the evolution of Carboniferous ammonoids // N. Jb. Geol. Paläont. Abh. 1994. B. 193. Fasc. 3. P. 401–418.

*Raup D. M.* Geometric analysis of shell coiling. General problems // J. Paleontol. 1966. V. 40. P. 1178–1190.

*Raup D.M., Michelson A.* Theoretical morphology of the coiled shell // Science, 1965. V. 147. P. 1294–1295.

*Reyment R. A.* Factors in the distribution of fossil cephalopods. Part 3. Experiments with exact models of certain shell types // Bull. Geol. Inst. Univer. Uppsala, 1973. N. s. V. 4. P. 7–41.

*Saunders W. B., Shapiro E. A.* Calculation and simulation of ammonoid hydrostatics // Paleobiology. 1986. V. 12 № 1. P. 64–79.

*Saunders W. B., Work D. M., Nikolaeva S. V.* The evolutionary history of shell geometry in Paleozoic ammonoids // Paleobiology. 2004. V. 30. № 1. P. 19–43.

*Sepkoski J.* A kinetic model of Phanerozoic taxonomic diversity. I. Analysis of marine orders. Paleobiology 1978. V.4. № 3. P. 223–251.

*Swan A. R. H., Saunders W. B.* Function and shape in late Paleozoic (Mid-Carboniferous) ammonoids // Paleobiology. 1987. V. 12. № 2. P. 297–311.

*Trueman A. E.* The ammonite body chamber, with special reference to buoyancy and mode of life of the living ammonite // Quart. J. Geol. Soc. London. 1941. Vol. 96. № 384. P. 26–32.

#### **Сетевые ресурсы**

*Ashline G. L., Ellis-Monaghan J. A., Kadas Zc. M., McCabe D. J.* Modeling Seashell Morphology 2009:<http://academics.smcvt.edu/jellis-monaghan/papers/papers/teaching%20papers/AE-MKMpre.pdf>

## **RAUPOLOGY: A COMPUTER PROGRAM BASED ON THE CONCHOMETRIC METHOD DEvised BY D.M. RAUP**

**M. S. Boiko and E. V. Mychko**

The paper gives a summary of morphometric studies of coiled cephalopod shells using the method devised by D.M. Raup. The computer program “Raupology” is a collection of tools for studying such shells, including measurements of morphological parameters from photographs, mathematical analysis, statistics and data storage.