

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ
МИКРОТОМОГРАФИИ
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОНОДОНТОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2013 г. А. В. Журавлев

ЗАО Поляргео
199026, г. Санкт-Петербург, 24-линия ВО, 7/9
E-mail: micropalaeontology@gmail.com

Поступила в редакцию 22.02.2012 г.

В работе рассмотрена возможность морфологических и гистологических исследований конодонтовых элементов с помощью промышленного микрогамматографа Skyscan 1174. В качестве объектов использованы позднедевонско-раннекаменноугольные конодонтовые элементы. Все ткани корональных частей конодонтовых элементов обладают высокой рентгеновской плотностью, превышающей таковую для твердых тканей зубов позвоночных. По повышенной рентгеновской плотности на фоне других тканей уверенно распознается параламеллярная ткань, распределение которой может использоваться как таксономический признак. Микрогамматография позволяет диагностировать конодонтовые элементы в массивных кремнистых породах с использованием морфологических и гистологических признаков.

Ключевые слова: конодонты, гистология, морфология, микрогамматография.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы область использования компьютерной микрофотографии, в частности гамматографии, в палеонтологии существенно расширилась [5, 8]. Кроме изучения внутренней структуры макропалеонтологических объектов, в основном, остатков позвоночных, томографические методы начали успешно применяться в исследовании микропалеонтологических объектов, в частности конодонтовых элементов [7]. Однако возможности микрогамматографии до сих пор используются не полностью. В частности, изучение внутренней структуры конодонтовых элементов с помощью этого метода пока не получило развития.

Цель данной работы – оценить возможность морфологических и гистологических исследований конодонтовых элементов с помощью промышленного микрогамматографа Skyscan 1174.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для томографического изучения были выбраны позднедевонско-раннекаменноугольные Ра элементы: *Mehlina fitzroyi* (Druce) и *Polygnathus lanei* Kuzmin из среднефранских отложений Главного Девонского Поля (разрез на оз. Ильмень, [11]); *Polygnathus parapetus* Druce из нижнетурнейских отложений Печорской гряды (разрез на р. Каменка [2]); *Polygnathus experplexus* Sandberg et Ziegler из фаменских отложений разреза на р. Талота [1];

Siphonodella quadruplicata (Branson et Mehl), *Siphonodella sandbergi belkai* Dzik, и *Siphonodella lobata* (Branson et Mehl) из верхнетурнейских отложений Приполярного Урала (бассейн р. Кожым, [3]). Конодонтовые элементы извлекались из карбонатных пород по стандартной методике с использованием 7% уксусной кислоты, а затем монтировались в матрицу из полиметилакрилата (рентгеновская плотность, в среднем, 1 000–1 500 единиц Хаунсфилда). Полученные образцы сканировались на микрогамматографе Skyscan 1174 (Горный Институт, Санкт-Петербург) с пространственным разрешением от 14 мкм до 6.5 мкм, шагом сканирования 0.7–0.8 градуса, при напряжении источника 50 КВ и токе 800 мкА. При данных параметрах съемки теоретическая разрешающая способность по рентгеновской плотности составляет от 300 до 120 единиц Хаунсфилда (HU).

Дальнейшая обработка полученных томограмм проводилась с помощью пакета программ фирмы Skyscan (NRecon, DataViewer, CTvox), оригинального программного обеспечения, разработанного в лаборатории микропалеонтологии ВНИГРИ, и программного комплекса для визуализации трехмерных изображений Voxler 2 (Golden Software).

Использование традиционных гистологических методов позволило ранее создать обобщенные гистологические модели для элементов различной морфологии, в том числе рассматриваемых таксонов [2]. Эти данные составили основу для гистологической интерпретации результатов изучения конодонтовых элементов на микрогамматографе.

Таблица 1. Основные параметры твердых тканей корональной части конодонтовых элементов

Тип ткани	Текстура	Упорядоченность кристаллитов	Содержание органич. вещества
“Белое вещество”	массивная	высокая, параллельно оси зубцов	низкое
Ламеллярная	слоистая	средняя, перпендикулярно границам ламелл	среднее
Параламеллярная	слоистая	низкая	среднее
Интерламеллярная	пузырьковая	низкая	высокое

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На полученных томограммах наблюдается слабая дифференцированность вещества конодонтовых элементов по коэффициенту поглощения гамма-

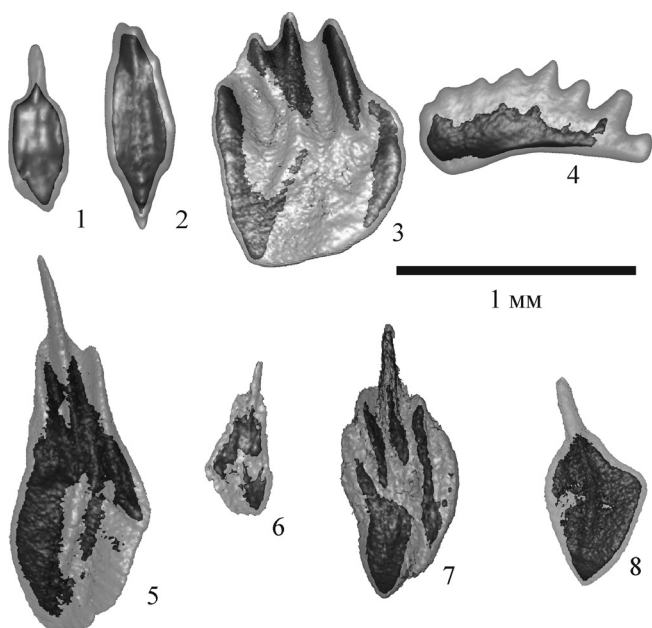


Рис. 1. Трехмерные модели, основанные на томограммах Ра элементов.

1 – *Polygnathus parapetus* Druce, обр. 121a-5/10; Печорская гряда, р. Каменка; нижний карбон, турнейский ярус, зона *Patrognathus crassus*; 2 – *Polygnathus lanei* Kuzmin, обр. 5102a-1; Главное Девонское Поле, оз. Ильмень; верхний девон, франкий ярус, зона *Polygnathus ilmenensis*; 3 – *Polygnathus exasperplexus* Sandberg et Ziegler, обр. 0806-53/2k; Тимано-Печорская плита, р. Талота; верхний девон, фаменский ярус, зона *Palmatolepis marginifera*; 4 – *Mehlnia fitzroyi* (Druce), обр. 5102a-1; Главное Девонское Поле, оз. Ильмень; верхний девон, франкий ярус, зона *Polygnathus ilmenensis*; 5 – *Siphonodella quadruplicata* (Branson et Mehl), обр. Tn-19e; Приполярный Урал, руч. Константинов; нижний карбон, турнейский ярус, зона *Siphonodella quadruplicata*; 6 – *Siphonodella quadruplicata* (Branson et Mehl), обр. 0-7K; Приполярный Урал, руч. Константинов; нижний карбон, турнейский ярус, зона *Siphonodella quadruplicata*; 7 – *Siphonodella sandbergi belkai* Dzik, обр. Tn-19e; Приполярный Урал, руч. Константинов; нижний карбон, турнейский ярус, зона *Siphonodella quadruplicata*; 8 – *Siphonodella lobata* (Branson et Mehl), обр. Tn-19e; Приполярный Урал, руч. Константинов; нижний карбон, турнейский ярус, зона *Siphonodella quadruplicata*. Темным тоном выделены области, сложенные параламеллярной тканью.

ма излучения, что обусловлено сходным минеральным составом различных твердых тканей. Все ткани, составляющие “верхнюю” (корональную) часть конодонтовых элементов представлены органо-минеральными наноккомпозитами на основе фосфата кальция [6]. Основные различия тканей проявляются в содержании органического вещества, размере и степени упорядоченности кристаллитов (табл. 1) [4].

Рентгеновская плотность твердых тканей изученных конодонтовых элементов варьирует, в среднем, от 20 до 60 тыс. единиц Хаунсфилда (НУ). Эти значения значительно превышают рентгеновскую плотность костной ткани и тканей зубов (дентина, эмали и энамелоида) позвоночных, что, наряду с текстурно-структурными характеристиками и особенностями роста и регенерации, не позволяет рассматривать твердые ткани конодонтов как гомологи костных тканей, дентина, эмали и энамелоида позвоночных [2, 4, 9].

Сравнение полученных томограмм конодонтовых элементов с гистологическими моделями позволило сделать следующие выводы. Выделяемые четыре типа твердых тканей корональной части конодонтовых элементов (ламеллярная, интерламеллярная, параламеллярная и “белое вещество”) слабо отличаются по коэффициенту поглощения гамма излучения. Наибольшие отличия демонстрирует параламеллярная ткань, для которой характерно наименее упорядоченное расположение кристаллитов в сочетании с невысоким содержанием органического вещества [6]. Этот тип ткани обладает наиболее высоким коэффициентом поглощения гамма излучения (более $0.6\text{--}0.7\text{ мм}^{-1}$, или 40–60 тыс. НУ при использованных параметрах съемки) и может быть отделен по этому параметру от других типов тканей. “Белое вещество”, интерламеллярная и ламеллярная ткани имеют близкие диапазоны рентгеновской плотности (20–40 тыс. НУ) и на полученных томограммах не разделяются.

Таким образом, на гамма-томограммах конодонтовых элементов возможно лишь уверенное выделение областей, сложенных параламеллярной тканью (рис. 1). Следует отметить, что этот тип твердой ткани с трудом диагностируется оптическими методами, так как в иммерсионных препаратах и на шлифовках сходен с “белым веществом”, а в шлифах сходен с ламеллярной тканью [4, 10]. Микрогамматография представляется одним из наиболее надежных методов достовер-

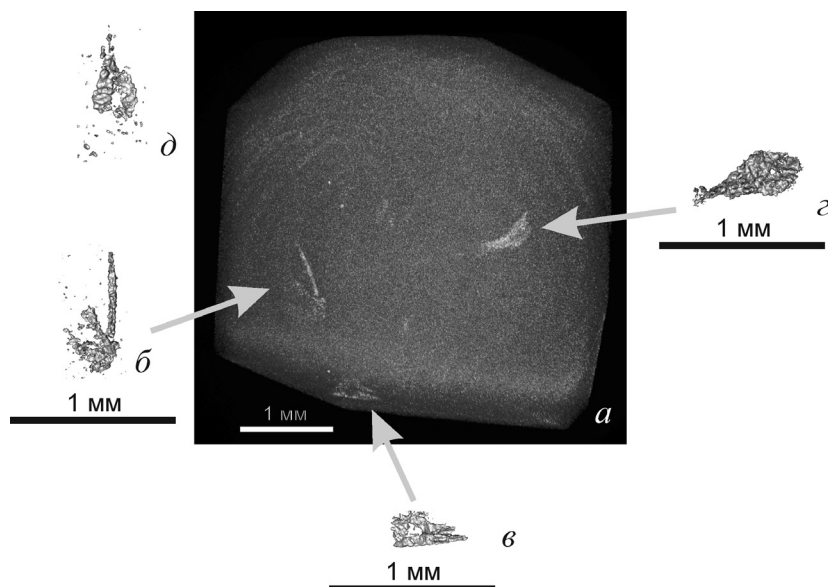


Рис. 2. Томограмма штуфа радиоларита с конодонтовыми элементами.

a – Общий вид штуфа на томограмме; *б* – S-элемент (?); *в*, *г* – *Siphonodella quadruplicata* (Branson et Mehl), Pa элемент; *д* – *Siphonodella* sp., Pa элемент. Образец Тп-23, Приполярный Урал, руч. Константинов, нижний карбон, турнейский ярус, зона *Siphonodella quadruplicata*. На врезках – увеличенные изображения конодонтовых элементов.

ной диагностики параламеллярной ткани, преимуществ которого заключаются в отсутствии необходимости разрушать образец, а также в получении данных о распределении этой ткани в объеме конодонтового элемента. Информация о пространственном распределении типов твердых тканей, в том числе и параламеллярной, может иметь и таксономическое значение [2].

Данные о распределении параламеллярной ткани в Pa элементах представляются важными для интерпретации гамма-томограмм штуфов горных пород с конодонтовыми элементами внутри. Особенно актуальным может быть изучение конодонтов в штуфах для кремнистых и глинисто-кремнистых отложений. Плотные кремнистые и глинисто-кремнистые плохо дезинтегрируются даже в растворе плавиковой кислоты, поэтому извлечение из них конодонтовых элементов очень затруднено, а иногда – невозможно. В отличие от кремнисто-глинистых отложений, которые часто обладают хорошо выраженной слоистостью и легко раскалываются по поверхностям напластования, массивные кремни (фтаниты и радиолариты) раскалываются незакономерно, и поиск в них конодонтов на поверхностях сколов мало эффективен. При этом различий в рентгеновской плотности вещества конодонтовых элементов и кремней достаточно для получения отчетливого изображения конодонтов на томограммах (рис. 2). Эти изображения позволяют проводить уверенную родовую и, в ряде случаев, видовую диагностику. В отличие от обычной радиографии, томограммы содержат более полную информацию о морфологии (трехмерные изображения), а также некоторые гистологи-

ческие характеристики (распределение параламеллярной ткани). На томограмме кремнистой породы позднетурнейского возраста (фаза *Siphonodella quadruplicata*) выделены трехмерные изображения четырех конодонтовых элементов (рис. 2). Три Pa элемента по морфологии и особенностям распределения параламеллярной ткани отнесены к роду *Siphonodella*, а для двух из них по форме платформы и расположению ростральных гребней возможна видовая диагностика (*Siphonodella quadruplicata* (Branson et Mehl)). При растворении других фрагментов этого образца в плавиковой кислоте удалось выделить только Pa элемент *Pseudoploygnathus fusiformis* Branson et Mehl и Pb элемент рода *Siphonodella*, а в аншлифах дополнительно были диагностированы Pa элементы рода *Siphonodella*. Таким образом, данные микротомографии позволили расширить список таксонов конодонтов для исследованного образца.

ВЫВОДЫ

Микрогамматомография является еще одним методом достоверной диагностики параламеллярной ткани, преимущества которого заключается в отсутствии необходимости разрушать образец, а также в получении данных о распределении этой ткани в объеме конодонтового элемента.

Основанные на результатах микрогамматомографии трехмерные гистологические модели конодонтовых элементов позволяют получать картину распределения твердых тканей в различно ориентированных сечениях как основу для более досто-

верной таксономической диагностики конодонтов в шлифах и на томограммах штудов горных пород.

Представляется перспективным изучение конодонтов в массивных кремнистых породах с помощью микрогамматографа. Получаемые при этом изображения конодонтовых элементов позволяют диагностировать роды и виды как по общей морфологии, так и по особенностям распределения параламеллярной ткани.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еременко Н.М., Журавлев А.В., Иосифиди А.Г. и др. Разрез верхнего девона–нижнего карбона на р. Талота (Тимано-Печорская провинция) – результаты литологических, биостратиграфических и палеомагнитных исследований (с приложением) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2009 (4). http://www.ngtp.ru/4/45_2009.pdf; http://www.ngtp.ru/4/45prilojenie_2009.pdf.
2. Журавлев А.В. Гистология и микроскульптура позднепалеозойских конодонтовых элементов. СПб: Геосервис Плюс, 2002. 94 с.
3. Журавлев А.В. Следы среднетурнейского биотического события на севере Урала // Бюлл. МОИП. Отд. Геол. 2003. Т. 78, № 1. С. 26–32.
4. Журавлев А.В. Особенности твердых тканей позднепалеозойских конодонтовых элементов // Палеонтологический журнал. 2005. № 3. С. 63–68.
5. Błażejowski B., Binkowski M., Bitner M. A., Gieszc P. X-ray microtomography (XMT) of fossil brachiopod shell interiors for taxonomy // Acta Palaeontologica Polonica. 2011. 56(2). P. 439–440.
6. Frank-Kamenetskaya O.V., Rosseeva E.V., Zhuravlev A.V. et al. Hard tissues of S-elements of late Paleozoic conodont: microstructural and crystallographic aspects // Fedorov Session 2008. Abstracts. RMS DPI 2008-2-72-1. P. 229–231.
7. Goudemanda N., Orchard M. J., Urdy S. et al. Synchrotron-aided reconstruction of the conodont feeding apparatus and implications for the mouth of the first vertebrates // PNAS Early Edition. 2011. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1101754108.
8. Tafforeau P., Boistel R., Boller E. et al. Applications of X-ray synchrotron microtomography for non-destructive 3D studies of paleontological specimens // Applied Physics A. 2006. 83. P. 195–202.
9. Turner S., Burrow C. J., Schultze H.-P. et al. False teeth: conodont-vertebrate phylogenetic relationships revisited // Geodiversitas. 2010. V. 32, № 4. P. 545–594.
10. Zhuravlev A.V. A new type of conodont hard tissue // Lethaia. 2002. V. 35. P. 275–276.
11. Zhuravlev A.V., Evdokimova I.O., Sokiran E.V. New data on conodonts, brachiopods and ostracodes from the stratotypes of the Ilmen and Buregi beds (Frasnian, Main Devonian Field) // Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology. 1997. 46(4). P. 169–186.

Рецензент В.В. Черных

Potentialities of computed microtomography for conodont elements study

A. V. Zhuravlev

All Russia Petroleum Research Exploration Institute (VNIGRI)

Application of the Skyscan 1174 micro-CT in the morphological and histological investigation of the conodont elements is considered. The Late Devonian–Early Carboniferous conodont elements were studied. All the tissues of the coronal part of the conodont elements demonstrate high radiodensity that exceeds radiodensity of hard tissues of the vertebrate teeth. The paralamellar tissue can be distinguished by higher radiodensity. Distribution of the tissue is considered as of possible taxonomic significance. X-ray microtomography allows distinguishing conodont elements in the cherty rocks and making up taxonomic diagnostics based on morphological and histological features.

Key words: *conodonts, histology, morphology, micro-CT.*