

УДК 56:[56.088.5:552.54/.55](470.111+470.13)

**Журавлев А.В.<sup>1</sup>, Вевель Я.А.<sup>2</sup>**

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский нефтяной научно-исследовательский геологоразведочный институт» (ФГУП «ВНИГРИ»), Санкт-Петербург, Россия, <sup>1</sup>[micropalaeontology@gmail.com](mailto:micropalaeontology@gmail.com), <sup>2</sup>[Yadviga\\_Vevel@mail.ru](mailto:Yadviga_Vevel@mail.ru)

## **ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ В МИКРОПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИХ И ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

*Рассмотрены возможности использования рентгеновской и оптической томографии в микропалеонтологических и литологических исследованиях. Рентгеновская микротомография позволяет диагностировать фосфатные микрофоссилии (конодонты) без специальной пробоподготовки; проводить гранулометрический анализ обломочных карбонатов; оценивать общую пористость и содержание сульфидов. Использование оптической микротомографии перспективно для гистологического изучения конодонтовых элементов.*

**Ключевые слова:** *томография, микропалеонтология, конодонты, фораминиферы, литология, карбонаты, силициты.*

В последние десятилетия область использования вычислительной микротомографии (computed microtomography), в частности рентгеновской, в палеонтологии и литологии существенно расширилась [Withjack, 1988; Wellington, Vinegar, 1987; Peters, Afzal, 1992; Johns et al., 1993; Ketcham and Carlson, 2001; Arns et al., 2005; Tafforeau et al., 2006; Błażejowski et al., 2011; Zalewska, Kaczmarczyk, 2011]. Однако возможности микротомографии до сих пор используются не полностью. Цель данной работы – оценить возможность и целесообразность микропалеонтологических и литологических исследований с помощью томографических методов.

### **Рентгеновская микротомография**

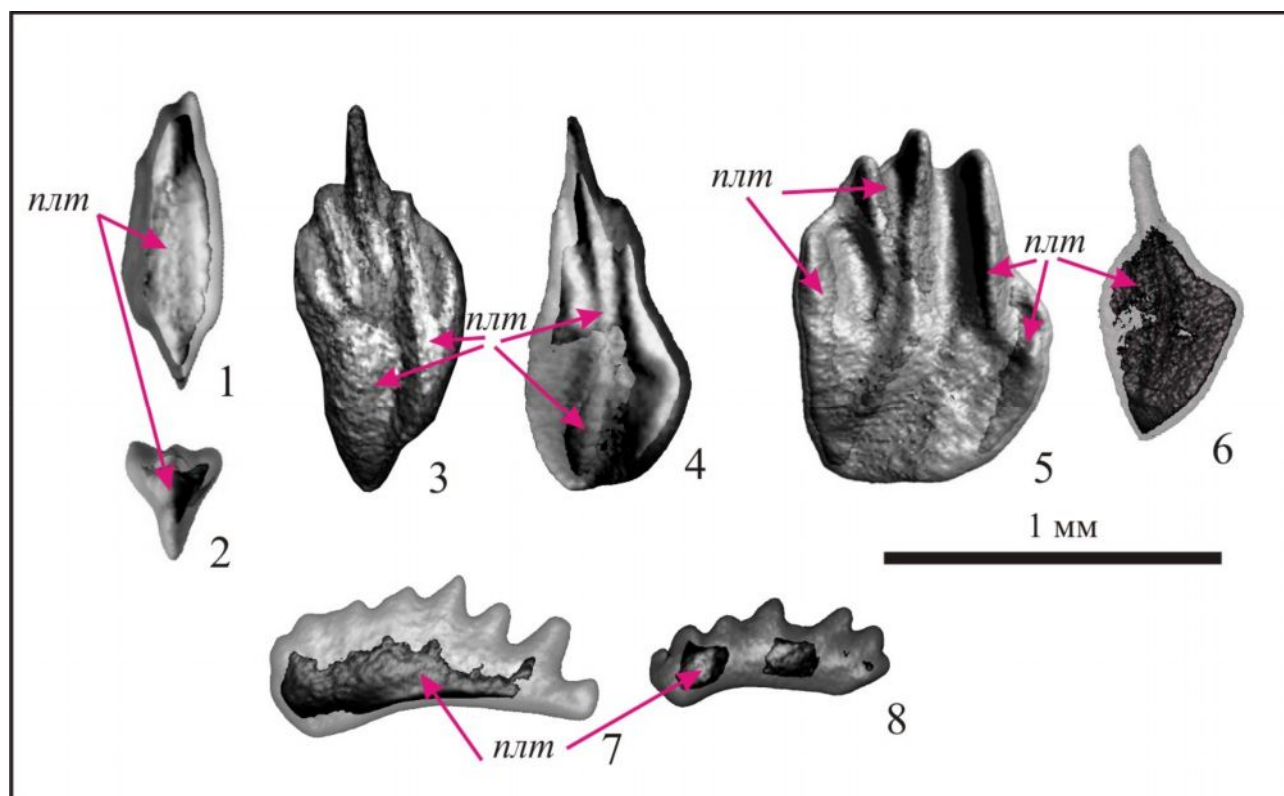
На рентгеновском микротомографе Skyscan 1174 (СПГГУ им. Г.В. Плеханова, Санкт-Петербург) с пространственным разрешением от 14 мкм до 6.5 мкм, шагом сканирования 0,7-0,8 градуса, при напряжении источника 50 КВ и токе 800 мкА была проведена съемка как литологических штуфов из кремнистых, глинистых и карбонатных пород, так и отдельных микропалеонтологических объектов (девонские и каменноугольные конодонты и фораминиферы), зафиксированных в полиметилакрилате. Полученные результаты сканирования обрабатывались с помощью пакета программ фирмы Skyscan (NRecon, DataViewer, CTvox), оригинального программного обеспечения, разработанного в лаборатории микропалеонтологии ВНИГРИ, программных комплексов Voxler 2 (Golden Software) и VolView 3 (Kitware Inc.).

### **Микропалеонтологические объекты**

Изученные конодонты представлены Ра элементами *Mehlina fitzroyi* (Druce) и *Polygnathus lanei* Kuzmin из среднефранских отложений Главного девонского поля (Восточно-Европейская платформа); *Polygnathus parapetus* Druce из нижнетурнейских отложений Печорской гряды (разрез на р. Каменка); *Polygnathus experplexus* Sandberg et Ziegler из фаменских отложений разреза на р. Талота (Вашуткино-Талотинская зона надвигов Тимано-Печорского бассейна); *Siphonodella quadruplicata* (Branson et Mehl), *Siphonodella sandbergi belkai* Dzik, и *Siphonodella lobata* (Branson et Mehl) из турнейских отложений бассейна р. Кожым (Западный склон Урала), а также S элементом Polygnathida из среднефранских отложений Главного девонского поля (Восточно-Европейская платформа). Кроме того, конодонтовые элементы обнаружены на томограммах глинистого силицита из верхнетурнейских отложений бассейна р. Кожым и глинистого известняка из верхнефранских отложений западной части Косью-Роговской впадины Предуральского прогиба. На томограммах отдельных конодонтовых элементов по рентгеновской плотности выделяются области, сложенные различными твердыми тканями. Наиболее достоверно опознается параламеллярная ткань, имеющая повышенную рентгеновскую плотность. Распределение этой ткани в конодонтовых элементах является одним из диагностических гистологических признаков родового и, в ряде случаев, видового уровня [Журавлев, 2002]. Гистологические признаки используются при диагностике конодонтов в литологических шлифах [Журавлев, 2002]. Полученные данные позволили уточнить гистологические модели для перечисленных видов (рис. 1).

Конодонтовые элементы, благодаря их высокой рентгеновской плотности (более 20000 ед. Хаунсфилда) хорошо различаются на томограммах штуфов горных пород, а уточненные гистологические модели позволяют диагностировать по томограммам таксоны на уровне рода и вида. При этом не требуется проводить дорогостоящую и трудозатратную процедуру выделения конодонтовых элементов из породы. На рис. 2 приведены томограммы штуфов глинистого силицита и глинистого известняка, на которой опознаются конодонтовые элементы.

Томографическое изучение выделенной из глинистой породы раковины визейской эндотиридной фораминиферы с хорошо сохранившейся стенкой (разрез на р. Мста, Боровичский район, Восточно-Европейская платформа) показало низкий контраст по рентгеновской плотности карбоната раковины и заполняющего камеры глинистого вещества. В сочетании с относительно низким пространственным разрешением использованного рентгеновского микротомографа (6,6 мкм), это позволило различить лишь общие черты морфологии раковины (рис. 3).



**Рис. 1. Трехмерные гистологические модели конодонтовых элементов,**

**основанные на рентгеновских микрофотограммах (визуализация программой Voxler 2)**

1, 2. - *Polygnathus lanei* Kuzmin, Ра элемент, обр. 5102a-1; Главное Девонское Поле, оз. Ильмень; верхний девон, франкий ярус, зона *Polygnathus ilmenensis*.

3. - *Siphonodella sandbergi belkai* Dzik, Ра элемент, обр. Тп-19е; Приполярный Урал, руч. Константинов; нижний карбон, турнейский ярус, зона *Siphonodella quadruplicata*.

4. - *Siphonodella quadruplicata* (Branson et Mehl), Ра элемент, обр. Тп-19е; Приполярный Урал, руч. Константинов; нижний карбон, турнейский ярус, зона *Siphonodella quadruplicata*.

5. - *Polygnathus experplexus* Sandberg et Ziegler, Ра элемент, обр. 0806-53/2k; Тимано-Печорская плита, р. Талота; верхний девон, фаменский ярус, зона *Palmatolepis marginifera*.

6. - *Siphonodella lobata* (Branson et Mehl), Ра элемент, обр. Тп-19е; Приполярный Урал, руч. Константинов; нижний карбон, турнейский ярус, зона *Siphonodella quadruplicata*.

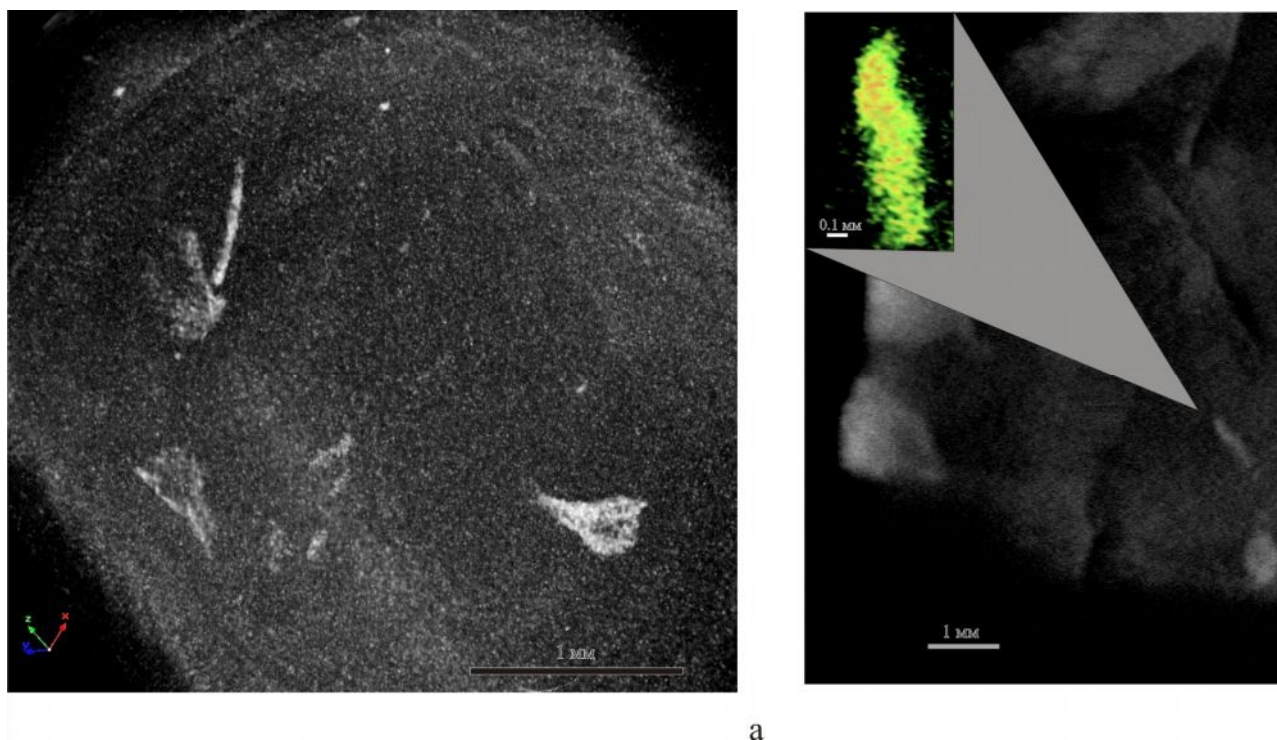
7. - *Mehlina fitzroyi* (Druse), Ра элемент, обр. 5102a-1; Главное Девонское Поле, оз. Ильмень; верхний девон, франкий ярус, зона *Polygnathus ilmenensis*.

8. - Sc элемент *Polygnathidae*, обр. 5102a-1; Главное Девонское Поле, оз. Ильмень; верхний девон, франкий ярус, зона *Polygnathus ilmenensis*.

плт – параламеллярная ткань.

В частности, по томограмме определяется характер септ и форма камер последнего оборота и есть возможность измерить диаметр предпоследнего оборота (рис. 3). Морфологическое изучение осложнено еще тем, что данный экземпляр сдавлен параллельно плоскости навивания, вследствие чего камеры «схлопнуты» (рис. 3). Для получения более обширной морфологической информации (характер навивания и форма камер внутренних оборотов, строение септ и наличие дополнительных отложений в камерах) требуется большее разрешение, как пространственное (около 1 мкм), так и по рентгеновской плотности. Соответствующими техническими параметрами обладают как нанотомографы,

так и ряд образцов микротомографов (например, Skyscan 1172 с пространственным разрешением до 0,8 мкм).



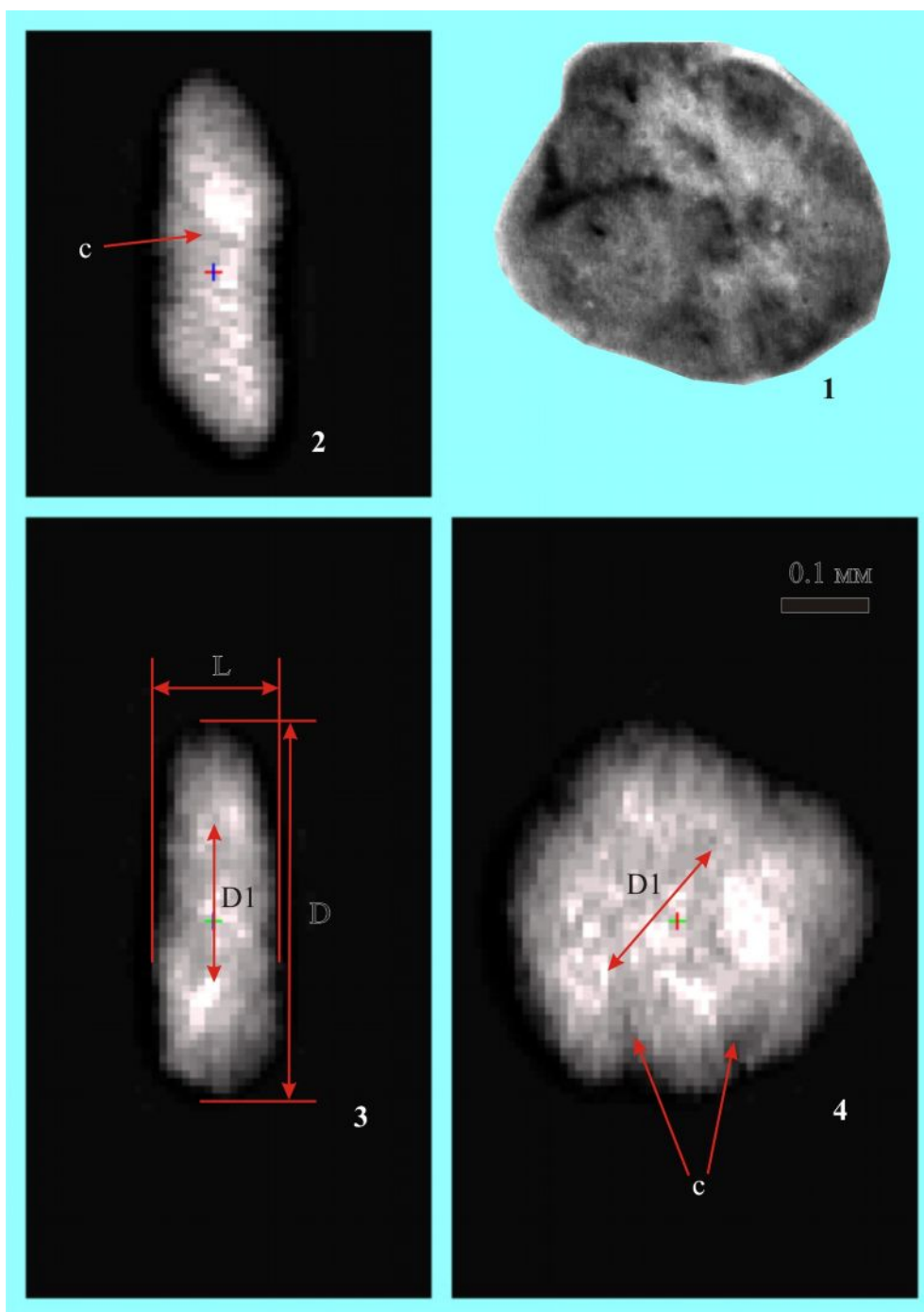
**Рис. 2. Рентгеновские микротомограммы шtuфов с конодонтовыми элементами**  
*а* - силицит с конодонтовыми элементами *Siphonodella*, обр. Тп-23; Приполярный Урал, руч. Константинов; нижний карбон, турнейский ярус, зона *Siphonodella quadruplicata*. Визуализация программой CTBox.  
*б* – глинистый известняк с конодонтовым элементом *Polygnathus*, обр. НМ-1-18; Тимано-Печорский бассейн, западная часть Косью-Роговской впадины, скв. 1-Харутамылькская, глубина 3367 м, верхний девон, франский ярус, евлановско-ливенский интервал.. Визуализация программой VolView 3.

### **Литологические объекты**

Для рентгеновского томографического исследования были выбраны шtuфы осадочных пород разного состава: глинистый силицит с радиоляриями (нижний карбон, верхнее турне, бассейн р. Кожым, Западный склон Приполярного Урала), мелкодетритовый и тонкодетритовый известняки (нижний карбон, верхнее визе, р. Шарью, гряда Чернышева), глинистые известняки (верхний девон, верхний фран-нижний фамен, скв. Харутамылькская-1, гряда Чернышева), аргиллит (верхний девон, средний фран, р. Шарью, гряда Чернышева). На основе полученных томограмм по всем образцам проведена оценка общей пористости и реконструирована форма порового пространства (рис. 4). Поры, в том числе частично заполненные глинистым материалом, выделяются на томограммах по низкому значению рентгеновской плотности (в среднем, менее 5000 ед. Хаунсфилда на фоне 6000-20000 ед. Хаунсфилда для карбонатов).

Для детритовых известняков определен размер форменных элементов (табл. 1). Из-за низкого контраста по рентгеновской плотности карбонатных форменных элементов и

глинисто-карбонатного цемента, определение границ форменных элементов осуществлялось на основе результатов высокочастотной фильтрации томограмм. Измерение размера форменных элементов проводилось в программах Voxler 2 и DataViewer с точностью, определяемой пространственным разрешением томограмм (от 14 до 7 мкм).



**Рис. 3.** Рентгеновская микротомограмма раковины эндотиридной фораминиферы, обр. S-1-3/05; северо-запад Русской плиты, р. Мста, нижний карбон, визейский ярус

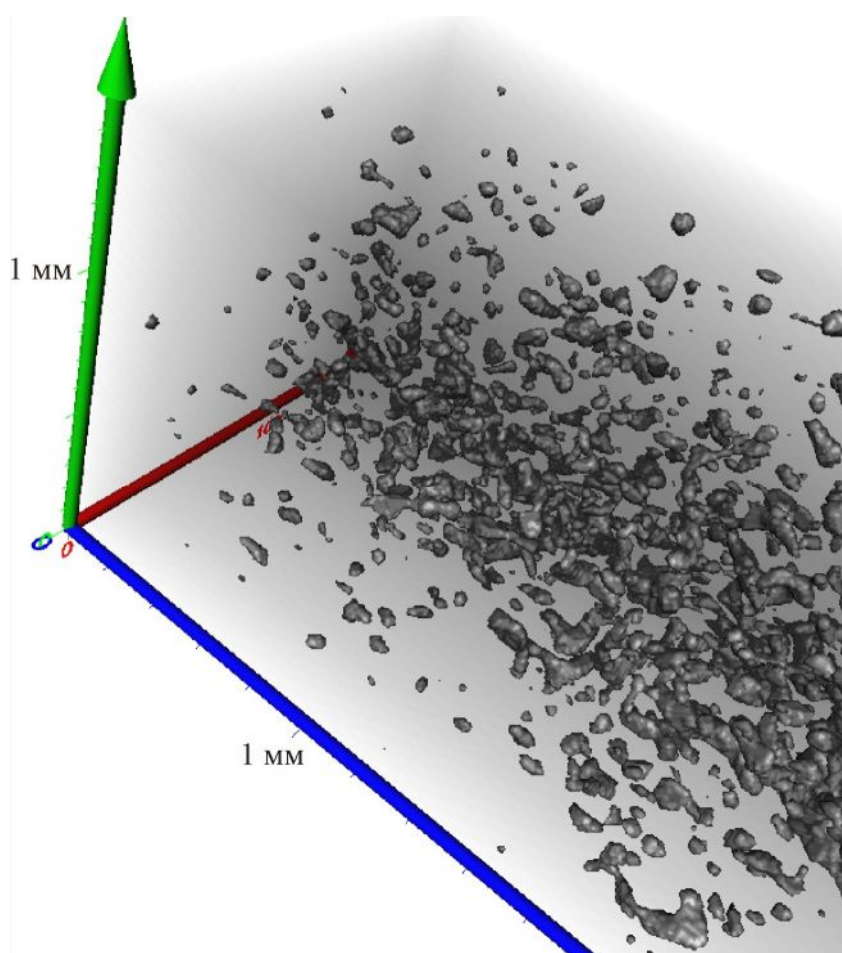
1. - Внешний вид раковины.

2, 3. - Аксиальные сечения раковины по томограмме.

4. - Медианное сечение раковины по томограмме.

*D* – диаметр последнего оборота; *D1* – диаметр предпоследнего оборота; *L* – толщина раковины; *C* – септы.

Визуализация программой *DataViewer*.



**Рис. 4. Форма порового пространства в штуфе мелкодетритового известняка, обр. 0806-208/1; север Тимано-Печорского бассейна, Вашуткино-Талотинская зона, р. Талота; нижний карбон, серпуховский ярус (визуализация программой Voxler 2)**

В глинистых известняках и аргиллитах по томограммам удалось определить содержание и распределение сульфидов (рис. 5), которые отличаются от окружающей породы высокими значениями рентгеновской плотности (более 50000 ед. Хаунсфилда).

Карбонатно-глинистые породы (доманикоиды) характеризуются значимым контрастом по рентгеновской плотности глинистого цемента и карбонатных форменных элементов. Это позволяет наблюдать на томограммах микротекстурные особенности породы (рис. 5).

Основные результаты анализа рентгеновских томограмм приведены в табл. 1.

#### **Оптическая томография**

Оптические томограммы снимались на экспериментальных образцах оптических микротомографов с пространственным разрешением 16 мкм и 1,9 мкм. Шаг сканирования составлял 5 градусов. Источником излучения служила лампа накаливания. 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 VolView 3 (Kitware Inc.).

Таблица 1

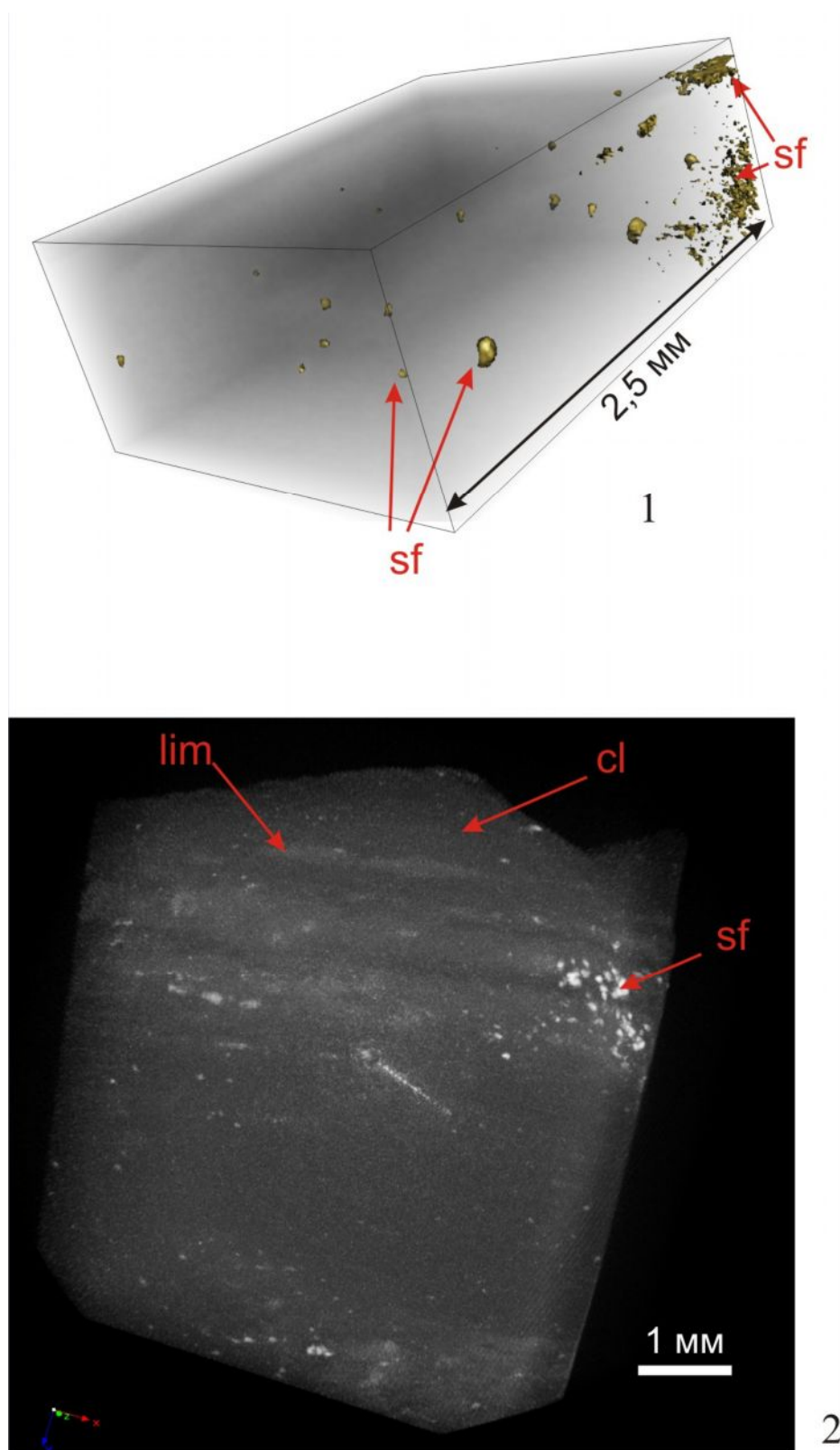
## Характеристики изученных образцов

Образец	Геологическая привязка и возраст	Литологическая характеристика по макроописанию	Пористость %	Содержание сульфидов %	Размер форменных элементов (мм)
Z226-21/11	Р. Шарью, Средние ворота, D <sub>3</sub> f <sub>2</sub> dm	Аргиллит	0,7	0,3	Менее 0,07
Z227-5/11	Р. Шарью, Средние ворота, D <sub>3</sub> fm <sub>1</sub>	Известняк тонко-мелкодетритовый	20	0,03	0,4-0,6
Z237-1/11	Р. Шарью, Средние ворота, C <sub>1</sub> v <sub>2</sub>	Известняк пелитоморфно-тонкодетритовый	23	1,3	0,1-0,2
Z237-8/11	Р. Шарью, Средние ворота, C <sub>1</sub> v <sub>2</sub>	Известняк мелкодетритовый	15	0	0,2-0,4
Z237-9/11	Р. Шарью, Средние ворота, C <sub>1</sub> v <sub>2</sub>	Известняк тонкодетритовый	6	0	0,2-0,3
НМ-1-18	Скв. 1-Харутамыльская, гл. 3367 м, D <sub>3</sub> f <sub>3</sub>	Известняк пелитоморфный, глинистый	0,01	0,3	Менее 0,08
НМ-1-21	Скв. 1-Харутамыльская, гл. 3359 м, D <sub>3</sub> fm <sub>1</sub>	Известняк пелитоморфный, глинистый	1	1,5	0,1-0,2
0806/208-1	Р. Талота, C <sub>1</sub> s	Известняк мелкодетритовый	37	0	0,3-0,4
Тп-201С	Руч. Константинов, C <sub>1</sub> t <sub>2</sub>	Известняк кремнистый, мелкодетритовый	13	0	0,4-0,6
Тп-201С	Руч. Константинов, C <sub>1</sub> t <sub>2</sub>	Известняк мелкодетритовый	9	0,01	0,3-0,5

**Микропалеонтологические объекты**

На оптическом томографе в видимом свете изучены конодонты: S элементы полигнатид, Pa элементы *Mehlina fitzroyi* (Druce) и ювенильный Pa элемент *Siphonodella quadruplicata* (Branson et Mehl) (рис. 6).

Томограммы, полученные в оптическом диапазоне, демонстрируют лучшую дифференциацию твердых тканей конодонтовых элементов по сравнению с рентгеновскими томограммами. Недостатком оптической томографии является высокий уровень «шума» и пригодность только для тонких конодонтовых элементов, полупрозрачных в проходящем свете.

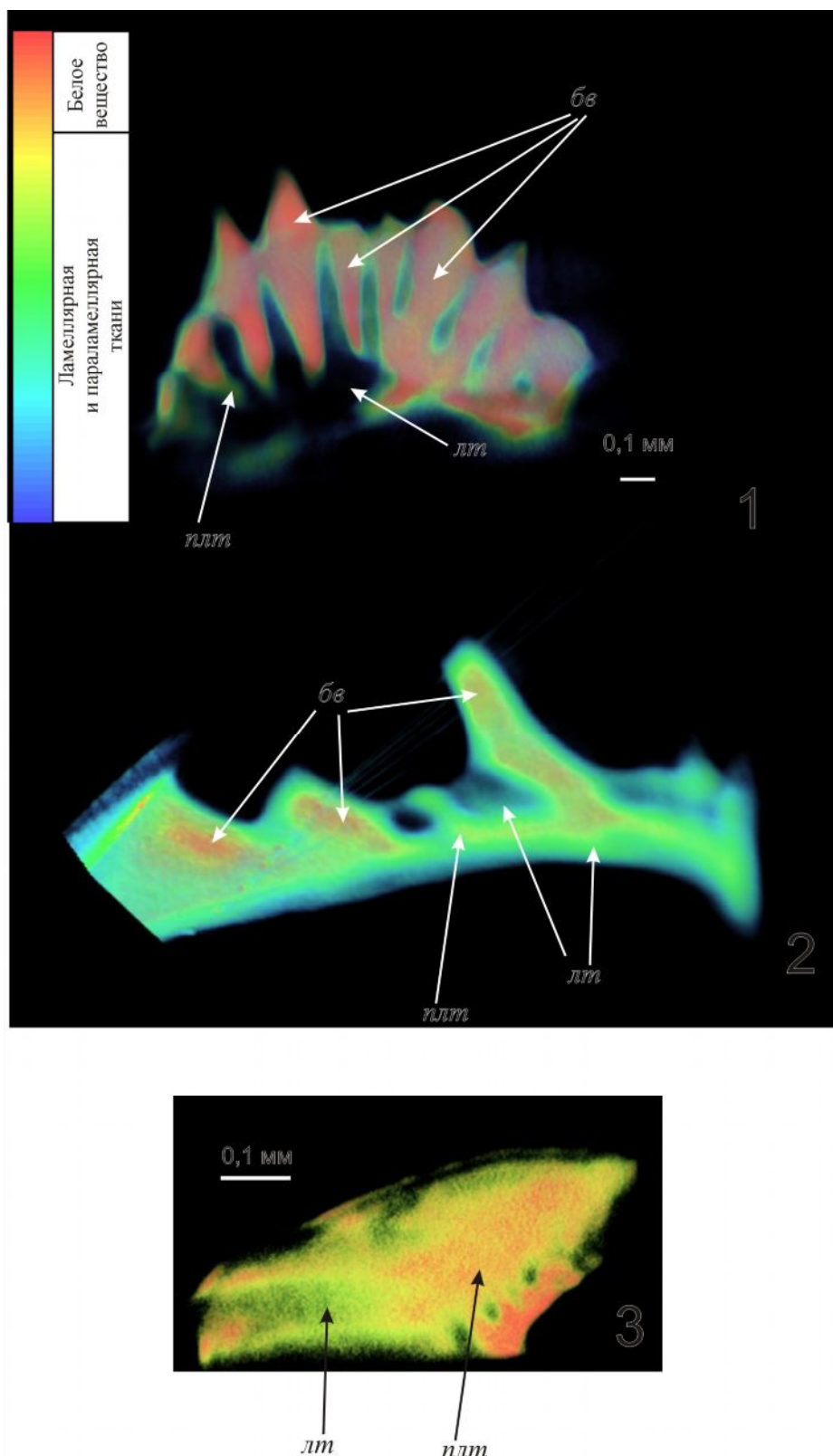


**Рис. 5. Литологические характеристики штуфов на томограммах**

*1 - распределение сульфидов (sf) в штуфе глинистого известняка, обр. НМ-1-18; Тимано-Печорский бассейн, западная часть Косью-Роговской впадины, скв. 1-Харутамылькская, глубина 3367 м, верхний девон, франский ярус, евлановско-ливенский интервал. Визуализация программой Voxler 2.*

*2 - микротекстурные особенности штуфа доманикоида: cl – глинистый матрикс; lim – карбонатные слои; sf – включения сульфидов; обр. НМ-1-14; Тимано-Печорский бассейн, западная часть Косью-Роговской впадины, скв. 1-Харутамылькская, глубина 3402 м, верхний девон, франский ярус, ветлосянский горизонт. Визуализация программой CTVox.*





**Рис. 6. Трехмерные гистологические модели конодонтовых элементов, основанные на оптических томограммах (визуализация программой VolView 3)**

1 - *Mehlina fitzroyi* (Druce), Pa элемент, обр. 5102a-1; Главное Девонское Поле, оз. Ильмень; верхний девон, франкий ярус, зона *Polygnathus ilmenensis*.

2 – Sc элемент *Polygnathidae*, обр. 5102a-1; Главное Девонское Поле, оз. Ильмень; верхний девон, франкий ярус, зона *Polygnathus ilmenensis*.

3 - *Siphonodella quadruplicata* (Branson et Mehl), Pa элемент, обр. 0-7K; Приполярный Урал, руч. Константинов; нижний карбон, турнейский ярус, зона *Siphonodella quadruplicata*.

плт – параламеллярная ткань; лт – ламеллярная ткань; бв – белое вещество.

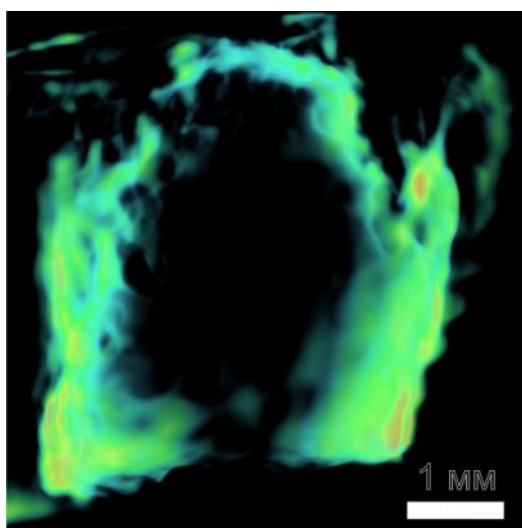
Сравнение томограмм с гистологическими моделями [Журавлев, 2002] позволило сделать следующие выводы. На оптических томограммах хорошо различимы массивы белого вещества, ламеллярной и параламеллярной тканей. Коэффициенты поглощения видимого света веществом конодонтовых элементов составляют от 0,02 до 0,25 мм<sup>-1</sup>. Наибольшей оптической плотностью обладают структуры, сложенные белым веществом, несколько меньшей – параламеллярной и ламеллярной тканями (см. рис. 6).

Попытки получения оптических томограмм для выделенных из породы мезозойских фораминифер не увенчались успехом из-за высокой оптической плотности объектов.

Таким образом, использование оптической микротомографии в микропалеонтологии ограничивается в настоящее время гистологическим изучением конодонтовых элементов. Практическое приложение получаемых результатов заключается в получении точных гистологических моделей, применяемых для диагностики конодонтов в шлифах [Журавлев, 2002].

#### *Литологические объекты*

Из-за высокого коэффициента поглощения видимого света большинства горных пород, их изучение с помощью оптического томографа возможно только в тонких (полупрозрачных) пластинах. На оптическом микротомографе была получена томограмма пластины глинистого силицита с радиоляриями. Толщина пластины составляла около 0,4 мм. Томограмма характеризуется высокой «зашумленностью», однако на ней в краевых частях пластины прослеживается общая микросгустковая структура силицита (рис. 7). К сожалению, более оптически плотные карбонатные и глинистые породы даже в тонких пластинах не позволяют зафиксировать отчетливое томографическое изображение на имеющемся оборудовании.



**Рис. 7. Оптическая томограмма пластинки силицита**

(обр. Тп-16-1/99; Приполярный Урал, руч. Константинов, нижний карбон, турнейский ярус)

Визуализация программой VolView 3.

### Выводы

Из проведенных исследований возможностей рентгеновской и оптической микротомографии можно сделать следующие выводы:

1. Несомненным плюсом томографических методов является оперативность получения результатов и возможность пространственного анализа исследуемых объектов. Последнее выгодно отличает томографические методы от традиционно используемых шлифов и пришлифовок, позволяющих изучать только отдельные сечения.

2. Рентгеновская микротомография, даже при использовании промышленных гамматомографов, позволяет проводить оперативную диагностику фосфатных микрофоссилий (конодонты) без извлечения из породы и специальной пробоподготовки; гранулометрический анализ обломочных карбонатов; оперативную оценку общей пористости в штуфах; оценку содержания минералов с высокой рентгеновской плотностью (сульфиды, фосфаты). Благодаря тому, что данный метод не требует разрушения образцов, исследованию могут подвергаться штуфы из эталонных коллекций.

3. Оптическая микротомография дает возможность уточнять гистологические модели конодонтовых элементов, и получать предварительные данные по структурным особенностям кремнистых пород без изготовления шлифов.

### Литература

*Журавлев А.В.* Гистология и микроскульптура позднепалеозойских конодонтовых элементов. – СПб.: Геосервис Плюс, 2002. - 94 с.

*Arns C.H., Bauget F., Limaye A., Sakellariou A., Senden T.J., Sheppard A.P., Sok R.M., Pinczewski W.V., Bakke S., Berge L.I., Oren P.-E., and Knackstedt M.A.* Pore-Scale Characterization of Carbonates Using X-Ray Microtomography // Society of Petroleum Engineers Journal. Volume 10, Number 4. 2005. P. 475-484.

*Błażejowski, B., Binkowski, M., Bitner, M. A., and Gieszc, P.* X-ray microtomography (XMT) of fossil brachiopod shell interiors for taxonomy // Acta Palaeontologica Polonica. 56(2). 2011. P. 439-440.

*Frank-Kamenetskaya O.V., Rosseeva E.V., Zhuravlev A.V., Rozhdestvenskaya I.V., Banova I.I., Simon P., Buder J. Carrillo-Cabrera W., Kniep R.* Hard tissues of S-elements of late Paleozoic conodont: microstructural and crystallographic aspects // Fedorov Session 2008. Abstracts. RMS DPI 2008-2-72-1. 2008. P.229-231.

*Goudemanda N., Orchard M. J., Urdy S., Bucher H., and Tafforeau P.* (2011). Synchrotron-aided reconstruction of the conodont feeding apparatus and implications for the mouth of the first vertebrates // PNAS Early Edition. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1101754108](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1101754108)

*Johns, R. A., Steude, J.D., Castanier, L.M., Roberts, P.V.* Non destructive measurements of fracture aperture in crystalline rock cores using X-ray computed tomography // *J. Geophys. Res.* 98, 1993. P. 1889–1900.

*Ketcham, R.A., and Carlson, W.D.* Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences // *Computers & Geosciences*, v. 27, 2001. P. 381–400.

*Peters, E.J., Afzal, N.* Characterization of heterogeneities in permeable media with computed tomography imaging // *J. Pet. Sci. Eng.* 7.1992. P. 283–296.

*Tafforeau P., Boistel R., Boller E., Bravin A., Brunet M., Chaimanee Y., Cloetens P., Feist M., Hozowska J., Jaeger J.-J., Kay R.F., Lazzari V., Marivaux L., Nel A., Nemoz C., Thibault X., Vignaud P., Zabler S.* Applications of X-ray synchrotron microtomography for non-destructive 3D studies of paleontological specimens // *Applied Physics A.* 83. 2006. P. 195–202.

*Wellington, S.L., Vinegar, H.J.* X-ray computerized tomography // *Journal of Petroleum Technology* 39, 1987. P. 885–898.

*Withjack, E.M.* Computed tomography for rock property determination and fluid flow visualization // *SPE Formation Evaluation*, vol. 3, no. 4. 1988. P. 696-704.

*Zalewska J., Kaczmarczyk J.* Analysis of rock samples' internal pore structure based on X-ray computed microtomography data. Part I // *NAFTA-GAZ.* LXVII. 2011. P. 533-544.

**Zhuravlev A.V., Vevel' Ya.A.**

All-Russia Petroleum Research Exploration Institute (VNIGRI), Saint Petersburg, Russia, micropalaeontology@gmail.com, Yadviga\_Vevel@mail.ru

## POSSIBILITIES OF COMPUTED MICROTOMOGRAPHY APPLICATION IN MICROPALAEONTOLOGICAL AND LITHOLOGICAL STUDIES

*Possibilities of the computed X-ray and optic tomography in the micropalaeontological and lithological studies are considered. X-ray microtomography allows determining phosphate microfossils (conodonts) avoiding special sample preparation; evaluate the total porosity and concentration of sulfides. The optic microtomography promises results in histological study of conodont elements.*

**Key words:** tomography, micropalaeontology, conodonts, foraminifers, lithology, carbonates, silicites.

### References

Zhuravlev A.V. *Gistologiya i mikroskul'ptura pozdnepaleozoyskikh konodontovykh elementov* [Late Palaeozoic conodont element histology and micro-ornamentation]. Saint Petersburg.: Geoservis Plyus, 2002, 94 p.

Arns C.H., Bauget F., Limaye A., Sakellariou A., Senden T.J., Sheppard A.P., Sok R.M., Pinczewski W.V., Bakke S., Berge L.I., Oren P.-E., and Knackstedt M.A. Pore-Scale Characterization of Carbonates Using X-Ray Microtomography. *Society of Petroleum Engineers Journal*. Volume 10, Number 4. 2005. P. 475-484.

Błażejowski, B., Binkowski, M., Bitner, M. A., and Gieszcz, P. X-ray microtomography (XMT) of fossil brachiopod shell interiors for taxonomy. *Acta Palaeontologica Polonica*. 56(2). 2011. P. 439-440.

Frank-Kamenetskaya O.V., Rosseeva E.V., Zhuravlev A.V., Rozhdestvenskaya I.V., Banova I.I., Simon P., Buder J. Carrillo-Cabrera W., Kniep R. Hard tissues of S-elements of late Paleozoic conodont: microstructural and crystallographic aspects. *Fedorov Session 2008. Abstracts. RMS DPI 2008-2-72-1*. 2008. P.229-231.

Goudemanda N., Orchard M. J., Urdy S., Bucher H., and Tafforeau P. (2011). Synchrotron-aided reconstruction of the conodont feeding apparatus and implications for the mouth of the first vertebrates // *PNAS Early Edition*. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1101754108](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1101754108)

Johns, R. A., Steude, J.D., Castanier, L.M., Roberts, P.V. Non destructive measurements of fracture aperture in crystalline rock cores using X-ray computed tomography. *J. Geophys. Res.* 98, 1993. P. 1889–1900.

Ketcham, R.A., and Carlson, W.D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences. *Computers & Geosciences*, v. 27, 2001. P. 381–400.

Peters, E.J., Afzal, N. Characterization of heterogeneities in permeable media with computed tomography imaging. *J. Pet. Sci. Eng.* 7.1992. P. 283–296.

Tafforeau P., Boistel R., Boller E., Bravin A., Brunet M., Chaimanee Y., Cloetens P., Feist M., Hozzowska J., Jaeger J.-J., Kay R.F., Lazzari V., Marivaux L., Nel A., Nemoz C., Thibault X., Vignaud P., Zabler S. Applications of X-ray synchrotron microtomography for non-destructive 3D studies of paleontological specimens. *Applied Physics A*. 83. 2006. P. 195–202.

Wellington, S.L., Vinegar, H.J. X-ray computerized tomography. *Journal of Petroleum Technology* 39, 1987. P. 885–898.

Withjack, E.M. Computed tomography for rock property determination and fluid flow visualization. *SPE Formation Evaluation*, vol. 3, no. 4. 1988. P. 696-704.

Zalewska J., Kaczmarczyk J. Analysis of rock samples' internal pore structure based on X-ray computed microtomography data. Part I. *NAFTA-GAZ*. LXVII. 2011. P. 533-544.