

О возможности внедрения рентгеновской компьютерной микротомографии в практику биостратиграфических исследований

А.М. Фазлиахметов^{1*}, О.В. Артюшкова¹, Е.О. Стаценко², Р.И. Кадыров²

¹Институт геологии УФИЦ РАН, Уфа, Россия

²Казанский федеральный университет, Казань, Россия

В настоящее время методы, применяемые для извлечения и изучения конодонтов, находящихся в кремнистых породах, сопряжены с рядом проблем. Это затрудняет решение многих задач в областях развития вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород, где кремни, яшмы и фтаниты являются единственными осадочными образованиями, по которым возможно определить возраст на основе биостратиграфического метода. Рентгеновская компьютерная микротомография позволяет избежать большинства проблем и получить превосходные изображения конодонтов в виде их объемных моделей, срезов в любом направлении, а также в формате видео, на котором конодонт вращается в разных плоскостях. Показано, что аналогичные материалы можно получать и по пустотам, оставшимся в породе после растворения конодонта.

Применение рентгеновской компьютерной микротомографии просто, когда конодонты уже найдены на поверхности образца, внутри него, или их содержание в породе заведомо велико и позволяет провести сканирование без предварительного поиска. Для тех случаев, когда конодонты редки, предлагается следующая методика их обнаружения. Порода распиливается на пластинки. На их поверхности, смоченной смесью глицерина и воды, под бинокулярным микроскопом ищутся конодонты. Результат при необходимости (если порода не прозрачная) проверяется химической реакцией – на поверхность образца наносится 5–10 % соляная кислота и 1–2 кристалла молибденовокислого аммония. Появление желтого осадка свидетельствует о наличии фосфора, соответственно вероятность того, что обнаруженный объект является конодонтом, увеличивается. Далее образец следует отмыть от кислоты, сократить в размере и провести собственно микротомографическое исследование.

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная микротомография, конодонты, биостратиграфия

Для цитирования: Фазлиахметов А.М., Артюшкова О.В., Стаценко Е.О., Кадыров Р.И. (2021). О возможности внедрения рентгеновской компьютерной микротомографии в практику биостратиграфических исследований. *Георесурсы*, 23(4), с. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.2>

Введение

Объектом наших исследований являются микропалеонтологические остатки – конодонты, захороненные в кремнистых породах. Конодонты являлись частью челюстного аппарата конодонтофорат, вымерших в конце триасового периода (200 млн лет назад). Они имеют размер до 1 мм, редко больше, и состоят из сложного фосфата кальция группы апатита, что обеспечивает их сохранность в породе даже при воздействии неблагоприятных факторов. Конодонты отличаются очень высокими темпами эволюции и успешно используются при детальном стратиграфическом расчленении и глобальной корреляции разрезов палеозоя и триаса (Clark, 1981; Маслакова и др., 1995). Детальная стратиграфическая основа, в свою очередь, позволяет решать многие как региональные, так и глобальные задачи геологии, в том числе восстанавливать историю геологического развития.

Для извлечения конодонтов из породы разработаны многочисленные методики, применение которых не всегда гарантирует получение положительных результатов. В последние годы в практику геологических исследований

начал внедряться метод рентгеновской компьютерной микротомографии (микроКТ). Он с разной степенью успеха применяется для визуализации и дальнейшего изучения органических остатков, структуры порового пространства коллекторов нефти и газа, структурных особенностей обломочных пород и т.д. (Tafforeau et al., 2006; Carlos, 2006; Корост и др., 2010; Якушина, 2012; Cnudde, Boone, 2013; Якушина, Хозяинов, 2014; Королев и др., 2014; Пономаренко и др., 2014; Якупов и др., 2014; Савицкий, 2015; Заватский и др., 2016).

Первыми наиболее полными публикациями, посвященными микротомографическому изучению конодонтов, являются, по всей видимости, работы А.В. Журавлева (Журавлев, Вевель, 2012; Журавлев, 2013). В этих и в последующих статьях А.В. Журавлев с соавторами показывают, что метод микроКТ применим для поиска и изучения конодонтов. Важно, что с его помощью возможно уточнение гистологической модели конодонтов, позволяющее диагностировать их на уровне рода, а в некоторых случаях и вида. Несомненным преимуществом микротомографического метода является оперативность и возможность получения положительного результата без разрушения образца.

В 2014–2015 годы авторами были предприняты попытки ввести микроКТ в методику поиска и изучения конодонтов в кремнях (Фазлиахметов и др., 2014, 2015, 2016).

* Ответственный автор: Александр Маратович Фазлиахметов
e-mail: famrb@mail.ru

© 2021 Коллектив авторов

Обзор методов извлечения конодонтов из пород

Методы, применяемые для выделения конодонтов, разнообразны (Collinson, 1963; Сергеева, 1966; Пучков, 1979; Иванов, 1987; Артюшкова, 2014). Их выбор зависит от состава осадочных пород и степени их литификации.

Традиционно конодонты извлекаются из карбонатных и карбонат-содержащих пород – известняков, мергелей, известковистых песчаников и др. Для этого применяются слабые (5–10 %) растворы метановой (муравьиной) или этановой (уксусной) кислот. Конодонты после промывки и просушки нерастворимого остатка выбираются под бинокулярным микроскопом.

Небольшое содержание карбонатного материала в породах, и тем более его отсутствие, сильно затрудняет дезинтеграцию пород, и вероятность получить пригодного для определения конодонта существенно снижается. В то же время ценность конодонтов, находящихся именно в кремнистых породах, во многих случаях крайне высокая, особенно при расчленении вулканогенно-осадочных комплексов в складчатых областях, где фтаниты, яшмы и кремнистые аргиллиты часто являются единственными осадочными образованиями, содержащими органические остатки, по которым можно установить возраст отложений, провести корреляцию разрезов и увязать их с региональной или общей стратиграфической шкалой. Отсутствие биостратиграфических данных оставляет без разрешения целый ряд проблем, в том числе прикладного характера, например, картирование вулканогенных и вулканогенно-обломочных комплексов, выделение и прослеживание рудоносных горизонтов.

Поиск конодонтов в кремнистых породах может осуществляться тремя способами. Во-первых, путем растворения кремней и кремнистых пород во фтористоводородной (плавиковой) кислоте с последующим просмотром нерастворенного остатка и отбором из него остатков микроорганизмов. При этом способе качество конодонтов существенно страдает, иногда они попросту растворяются (Иванов, 1987).

Вторым способом является поиск конодонтов на полированных срезах кремнистых пород или просмотр тонких сколов кремней на просвет. Недостатками данного способа является то, что он не позволяет получить полное представление о найденном конодонте. Кроме этого, не все кремнистые породы являются проницаемыми для света. Примесь углистого или глинистого материала лишает кремни прозрачности и, соответственно, не оставляет возможности не только определить конодонтов, но и найти их.

Третий способ является наиболее простым и эффективным, но требует иногда длительных экспедиционных работ. В его основе лежит визуальный поиск и идентификация элементов конодонтов, а чаще их отпечатков на плоскостях напластования в кремнистых и кремнисто-глинистых породах. Данный способ широко применяется на Южном Урале (Пучков, 1979; Иванов, 1987; Артюшкова, 2014). Он позволяет с большой детальностью

проводить стратиграфическое расчленение и корреляцию сложно-построенных и пестро меняющихся по простиранию вулканогенных разрезов Магнитогорской мегазоны (Маслов, Артюшкова, 2010).

Каждая из упомянутых методик по исследованию конодонтов в кремнистых породах имеет свои особенности. К недостаткам следует отнести увеличение затрат времени до получения результата и невозможность видеть объемное изображение микроостатков.

Изучение конодонтов посредством микротомографии

Микротомографическое изучение конодонтов впервые проведено нами в породах нязинской толщи, возраст которой имел принципиальное значение. Образцы были отобраны О.В. Артюшковой в районе г. Нязепетровск на правом берегу р. Ураим в 4,0 км выше устья (рис. 1). Обнаруженные визуально в кремнях два экземпляра конодонтов диагностировать без трудоемкого препарирования было невозможно, кроме того существовал риск уничтожить их при «вскрытии». Эти обстоятельства послужили поводом для обращения к методу микроКТ.

МикроКТ-исследование проводилось в Институте геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета при помощи нанофокусной трубки компьютерного рентгеновского томографа Phoenix V|tome|XS 240. Ускоряющее напряжение составило 80 кВ, ток – 130 мА, разрешение съемки (объем 1-го вокселя) – 2 мкм. Объемная модель образцов была получена при помощи пакета программ AvizoFire 7.1. Перед проведением съемки образцы с заключенными в них конодонтами обрезались до размеров 6×6×5 и 4×3×3 мм.

В результате получены изображения конодонтов трех типов – микротомографические срезы, объемные реконструкции (рис. 2, 3) и видео, на которых конодонт вращается в разных плоскостях. Качество всех материалов очень высокое. Все морфологические элементы конодонтов, необходимые для их диагноза, видны отчетливо. Это дало

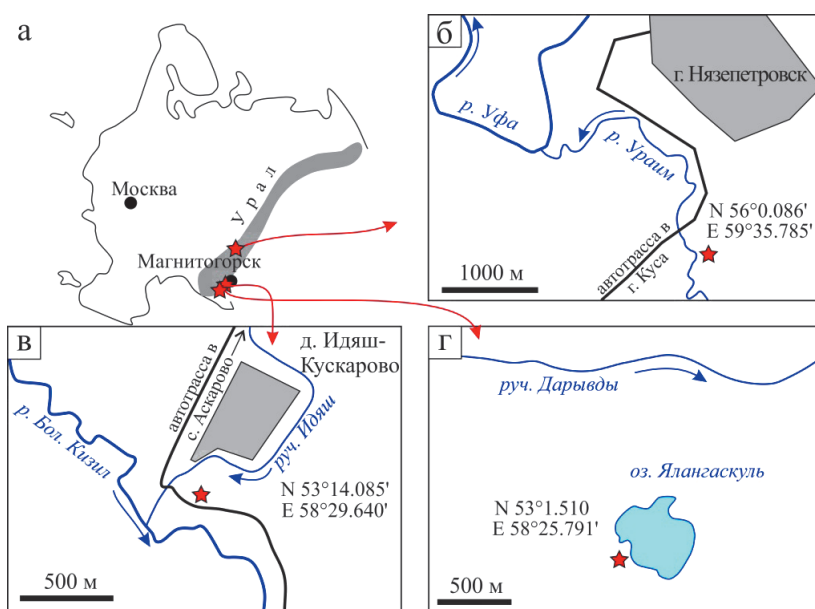


Рис. 1. Схемы расположения обнажений. а – обзорная карта-схема; б–г – схемы района г. Нязепетровск (б), у д. Идяш-Кускарово (в) и на южном берегу оз. Ялангаскуль (г).

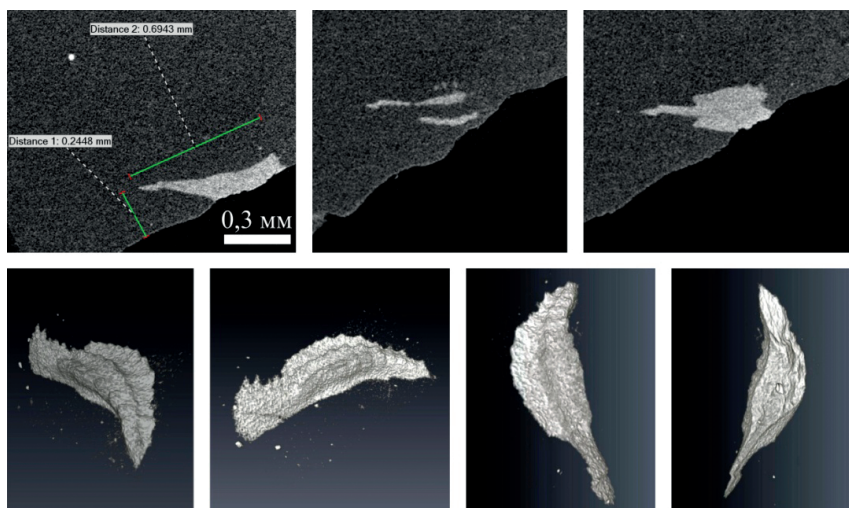


Рис. 2. Конодонт *Eocostapolygnathus excavatus* Carls et Gandle. Верхний ряд – микро-томографические срезы, нижний ряд – объемные реконструкции

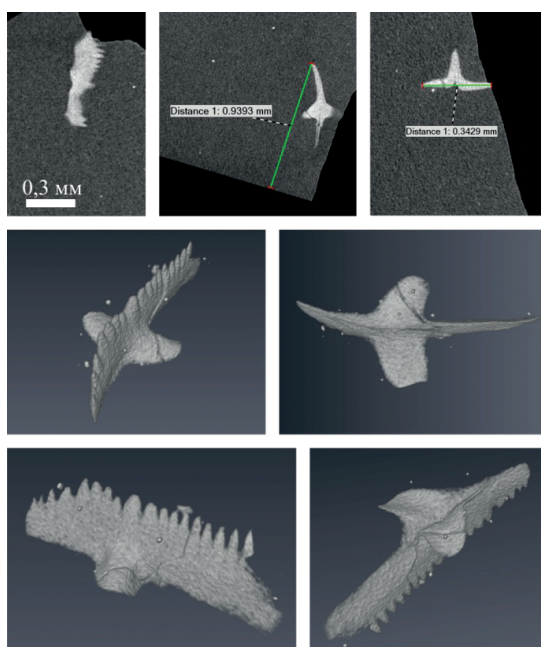


Рис. 3. Конодонт *Pandorinellina miae* (Bultynck). Верхний ряд – микро-томографические срезы, остальные – объемные реконструкции

возможность определить их до вида – *Pandorinellina miae* (Bultynck) и *Polygnathus excavatus* (Carls et Gandle), и тем самым понять их стратиграфическую принадлежность. Нязинская толща впервые получила палеонтологическое обоснование; возраст ее был пересмотрен.

Выше уже отмечалось, что кремнистые породы иногда бывают единственными осадочными образованиями во многих палеозойских разрезах, сложенных преимущественно продуктами вулканизма. Представленные нами результаты не оставляют сомнения в том, что метод микроКТ имеет огромные перспективы для поиска, визуализации и определения конодонтов, заключенных в силицитах и в других кислотоупорных породах. А.В. Журавлев и А.И. Герасимова (Журавлев, Герасимова, 2016) утверждают, что данный метод целесообразен в том случае, если конодонты содержатся в количестве 2000 экземпляров на 1 кг породы или 5–6 экземпляров на кубический сантиметр, что на практике бывает крайне редко. В подобном случае

для получения положительного результата достаточно провести поиск в образце объемом 0,5–1,0 кубических сантиметров. На Южном Урале такому критерию могут близко соответствовать яшмы и кремни карамалыташской, ярлыкаповской, мукасовской и биягодинской свит.

Однако содержание микрофоссилий в кремнистых породах разных свит и толщ очень сильно варьирует. Например, в кремнях ильтибановской толщи (D_1) за более чем полувековую историю исследований визуально лоховские конодонты найдены только в одном обнажении. Соответственно, до настоящего момента вопрос о продолжительности формирования отложений ильтибановской толщи остается открытым, а раннедевонская история Магнитогорской островодужной системы

остается без желаемой детализации. Сохраняется актуальность поиска микрофоссилий в силурийско-нижнедевонской последовательности, обнаженной у д. Мансурово, в рыскужинской, ускульской толщах, в некоторых разрезах улутауской и биягодинской свит и т.д.

Большое количество примеров, показывающих необходимость обнаружения конодонтов в кремнях и иных кремнистых породах, обуславливает актуальность разработки методики, позволяющей увеличить количество и объем исследуемых образцов. Однако задействовать для этого рентгеновский томограф не всегда представляется возможным. Главных причин тому две. Первая субъективная – высокая стоимость микро-томографической съемки, препятствующая коллективам, не имеющим томограф в своем безвозмездном распоряжении, полноценно и масштабно использовать его для биостратиграфических исследований. Наш опыт показывает, что стоимость выполнения микроКТ по 4–5 образцам равнозначна проведению экспедиции длительностью 2–3 недели для отбора этих же образцов или выделению конодонтов из 30–40 кг известняка. Вторая причина объективная. Она обусловлена крайне малым содержанием конодонтов в породах. Кроме того, конодонты являются микроскопическими объектами, съемка которых требует большого разрешения, и следовательно, имеются ограничения в размере штучков (первые миллиметры в поперечнике), помещаемых в томограф.

Одним из наиболее простых решений, позволяющих применить микроКТ с гарантированно положительным результатом, является микроКТ-исследование конодонта, уже обнаруженного в породе, как это было в случае с кремнями нязинской толщи. Мы попытались найти и разработать более эффективный, по сравнению с вышеописанными, метод поиска конодонтов на сколах и спилах кремнистых пород.

Поиск конодонтов на поверхности кремнистых пород в лабораторных условиях

Поиск конодонтов на спилах и сколах кремнистых пород – задача, требующая существенных затрат времени. В прозрачных и полупрозрачных кремнях их поиск может осуществляться под бинокулярным микроскопом, но в

непрозрачных разностях он, по всей видимости, невозможен, так как опознать конодонта по его срезу (чаще это бесформенное пятнышко) на поверхности породы трудно. В данной ситуации представляется возможным применить метод химического окрашивания, позволяющий определять присутствие фосфатных включений. Для этого на поверхность образца наносится капля 10 % соляной кислоты, в которую помещаются 1–2 кристалла молибденовокислого аммония $((\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \times 4\text{H}_2\text{O})$. В результате реакции в течение нескольких секунд около фосфатной частицы появляется ярко-желтый осадок.

Соляная кислота, вступая в реакцию с фосфатами, вытравливает конодонты. Это может сделать напрасными все попытки поиска и последующих микроКТ-исследований. В связи с этим представляется важным выяснить, результативно ли проводить микротомографию не конодонта, а пустоты, оставшейся после его полного растворения. Для выяснения этого были проведены следующие два эксперимента.

Эксперимент 1. Объектом исследования послужили богатые конодонтами, светло-серые полупрозрачные кремни биягодинской свиты (пограничный фран-фаменский интервал) Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала, отобранные в разрезе у д. Идяш-Кускарово (рис. 1). Характеристика этого разреза изложена в публикациях (Маслов, Артюшкова, 2010; Фазлиахметов, 2020).

Задачи эксперимента состояли в следующем: а) сравнить объемные томографические изображения конодонтов, находящихся в кремнях, и полостей, оставшихся после их растворения; б) установить минимальный порог чувствительности метода, т.е. минимальный размер конодонта, которого можно визуализировать посредством микроКТ.

Образцы были распилены на пластинки толщиной 3–4 мм. Поскольку спил кремней представляет собой шероховатую матовую поверхность, на которой в большинстве случаев нельзя что-либо разглядеть, пластинки перед просмотром под бинокулярным микроскопом были смочены дистиллированной водой в смеси с глицерином в соотношении 1:1. Глицерин в данном случае препятствует испарению жидкой пленки и, таким образом, избавляет от необходимости постоянно смачивать образец.

Обнаруженные таким путем конодонты многочисленны. Из них были выбраны два наименьших экземпляра. Размер исходного образца был сокращен до цилиндра диаметром около 5 мм и высотой 6 мм.

Первоначально съемка образцов была проведена до реакции с соляной кислотой. По объемным изображениям были определены два экземпляра конодонтов: обломанный Ра-элемент *Palmatolepis* sp. (рис. 4) и рамиформный элемент с тонкими зубцами (рис. 5).

Далее образцы были помещены в 10 % соляную кислоту на несколько часов, промыты дистиллированной водой и высушены при комнатной температуре. После этого, для получения изображения пустотного пространства, оставшегося после растворения конодонтов, последовал новый сеанс съемки.

Объемные изображения Ра-элемента до и после растворения практически идентичны (рис. 4). Отличия обусловлены лишь разными параметрами съемки, которые подбираются для каждого образца отдельно, непосредственно перед сеансом сканирования.

Изображения S-элемента (рис. 5), полученные до и после обработки соляной кислотой, отличаются друг от друга длиной зубчиков. На изображении, полученном непосредственно по конодону, длинных зубцов два, коротких три. Изображение отпечатка кажется более четким, но на нем пять зубцов средней величины. На микротомографических срезах полости видны пять длинных зубцов, два из них растворились не до конца.

Отличие изображений образца 2 до и после обработки кислотой вызваны не только неполным растворением конодонта, но и, вероятно, тем, что его тонкие элементы сливаются с кремнистой породой. Дело в том, что успех визуализации внутренней структуры любого объекта зависит от разности линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения слагающих его элементов (веществ). Чем она больше, тем более четким получается изображение, тем лучше видны мелкие детали. Разница линейного коэффициента ослабления кремней и фосфата меньше, чем кремней и воздуха, поэтому изображение отпечатка, оставшегося от конодонта, получается более отчетливым.

В задачи *эксперимента 2* входило выяснение того, как влияет реакция с соляной кислотой и молибденовокислым аммонием на конодонт.

Образцы кремней были отобраны из биягодинской свиты разреза на южном берегу оз. Ялангаскуль (рис. 1). Всего отсканировано шесть образцов, сгруппированных в две батареи по три образца в каждой (рис. 6). Таким образом, количество сеансов сканирования было уменьшено

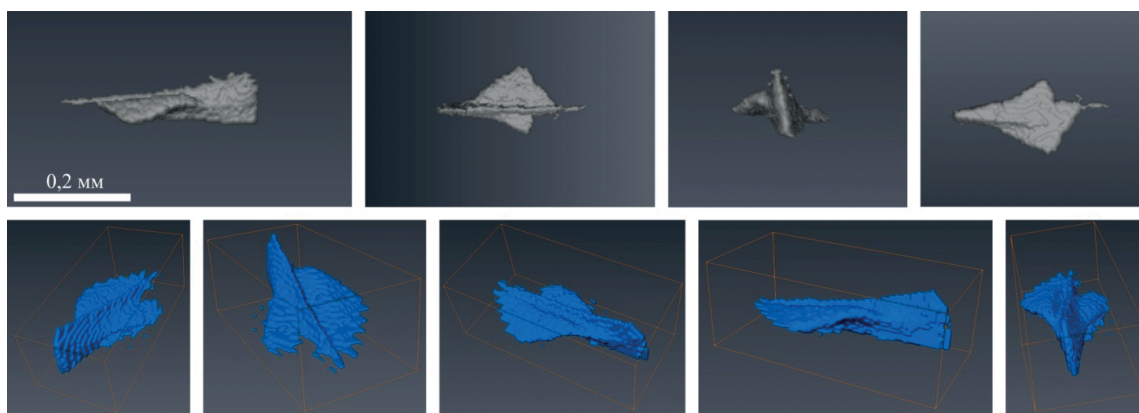


Рис. 4. Объемные микротомографические реконструкции фрагмента конодонта *Palmatolepis* sp. (верхний ряд) и вытравленного отпечатка после его растворения (нижний ряд)

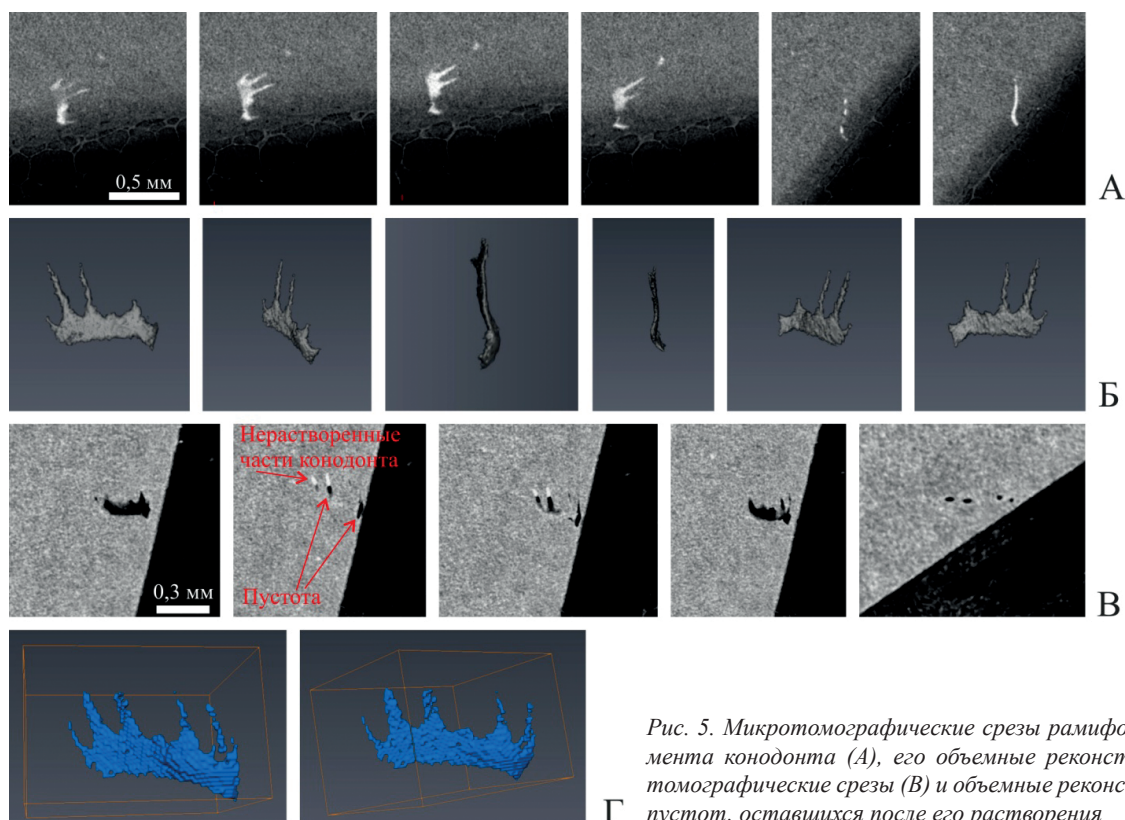


Рис. 5. Микротомографические срезы рамиформного элемента конодонта (А), его объемные реконструкции (Б), томмографические срезы (В) и объемные реконструкции (Г) пустот, оставшихся после его растворения

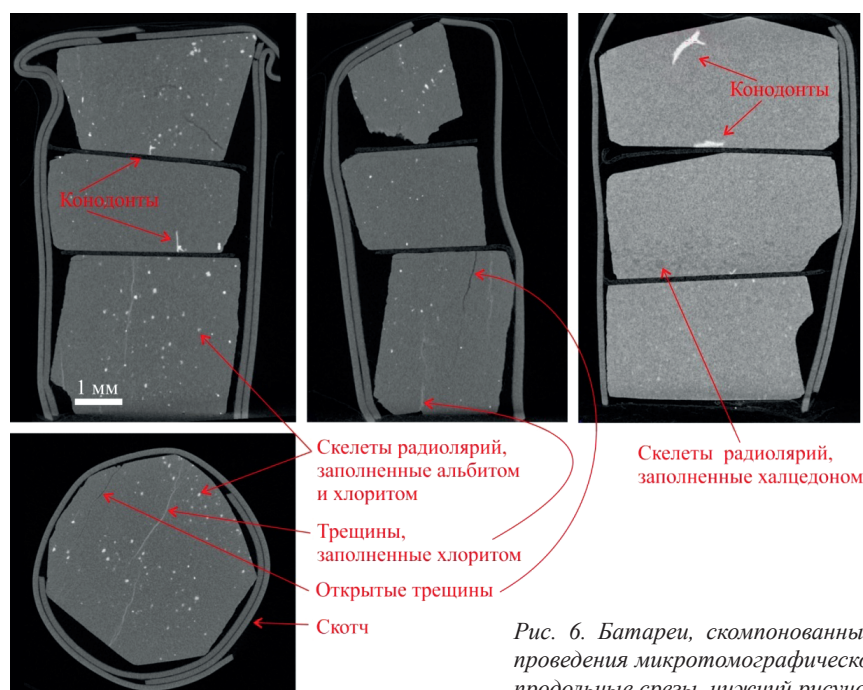


Рис. 6. Батарея, скомпонованные из трех образцов для проведения микротомографической съемки. Верхний ряд – продольные срезы, нижний рисунок – поперечный срез.

с шести до двух. Первоначально сканировались образцы с целыми, не тронутыми кислотой конодонтами. Все морфологические элементы конодентов наблюдались отчетливо (рис. 7–10). Далее была проведена реакция с соляной кислотой и молибденовокислым аммонием. После этого образцы промывались дистиллированной водой, просушивались при комнатной температуре и сканировались на томографе повторно. Полученные изображения (рис. 7–10) практически неотличимы от первоначальных, за исключением того, что поверхность, по которой прошла реакция, стала неровной, протравленной. Перед третьим сканированием образцы, как в эксперименте 1, были

помещены в 10 % соляную кислоту на несколько часов, что привело к полному растворению конодентов. Объемные томограммы пустот, оставшихся от конодентов, выглядят несколько хуже, но позволяют определить большинство морфологических элементов микрофоссилий.

Стоит отметить, что кроме конодентов, обнаруженных визуально на срезах, один экземпляр был найден внутри образца (рис. 9). Параллельно, микротомографические исследования позволили обратить внимание на некоторые особенности самих кремнистых пород, в частности, на присутствие открытых трещин, прожилков хлорита и раковин радиоларий, заполненных халцедоном

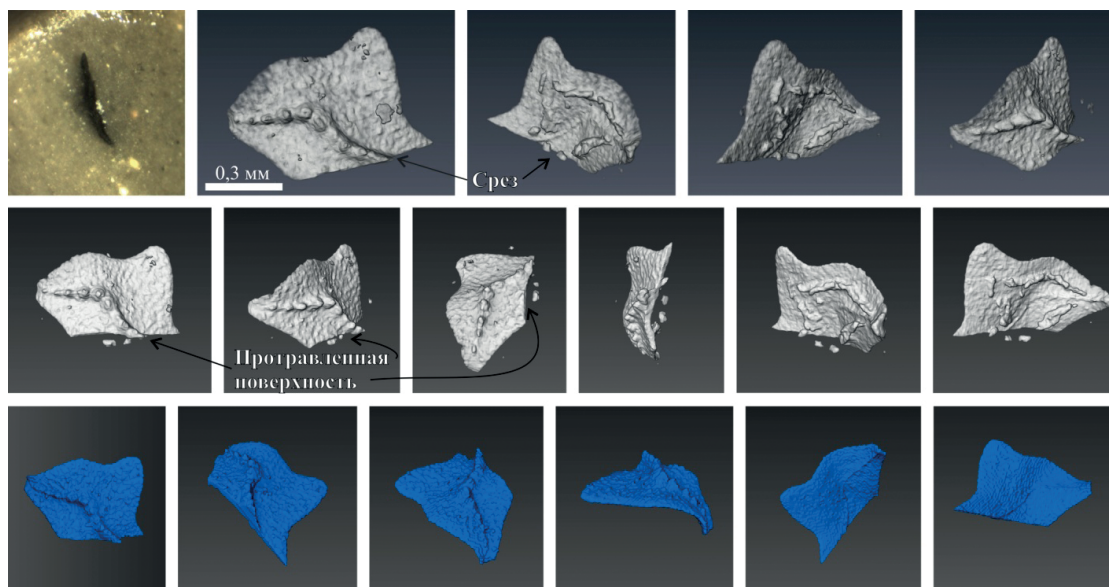


Рис. 7. Фотография среза (слева сверху) и объемные реконструкции конодонта *Palmatolepis* cf. *orlovi* Khrushcheva et Kuzmin до реакции (верхний ряд), после реакции (средний ряд) и пустоты, оставшейся после его растворения (нижний ряд)



Рис. 8. Фотография среза (слева сверху) и объемные реконструкции конодонта *Ancyrodella* sp. до реакции (верхний ряд), после реакции (средний ряд) и пустоты, оставшейся после его растворения (нижний ряд)

и альбитом (минералогический состав установлен по шлифам). Современное программное обеспечение позволяет в полной мере изучить их распределение в породе и произвести замеры, например, объемного содержания радиолярий или углов между трещинами и жилами разной ориентации.

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что реакция с молибдатом аммония и соляной кислотой не наносит существенного повреждения конодонтам, заключенным большей своей частью в кремнистых породах. Следовательно, данный метод может применяться для поиска и идентификации конодонтов. Однако нужно учитывать вероятность присутствия в исследуемых образцах иных фрагментов фосфатного состава.

Томограммы пустот, оставшихся после полного растворения конодонтов, являются также информативными

и могут в некоторых случаях способствовать идентификации конодонта или уточнению определения, сделанного по изображениям конодонта до обработки.

Неоспоримым преимуществом предложенной методики является то, что участие специалистов по микротомографии и конодонтам, необходимо лишь на финальных стадиях, связанных с изучением уже найденного конодонта. Выполнение предшествующих работ может быть обеспечено техническим персоналом.

Предложенный метод позволяет сократить длительность иногда многодневных поисков конодонтов в экспедициях, непосредственно в обнажениях, самим специалистом-конодонтологом и перевести их частично или практически полностью на камеральную стадию исследований.

Важным для палеонтолога-определителя является получение объемного изображения исследуемого объекта.

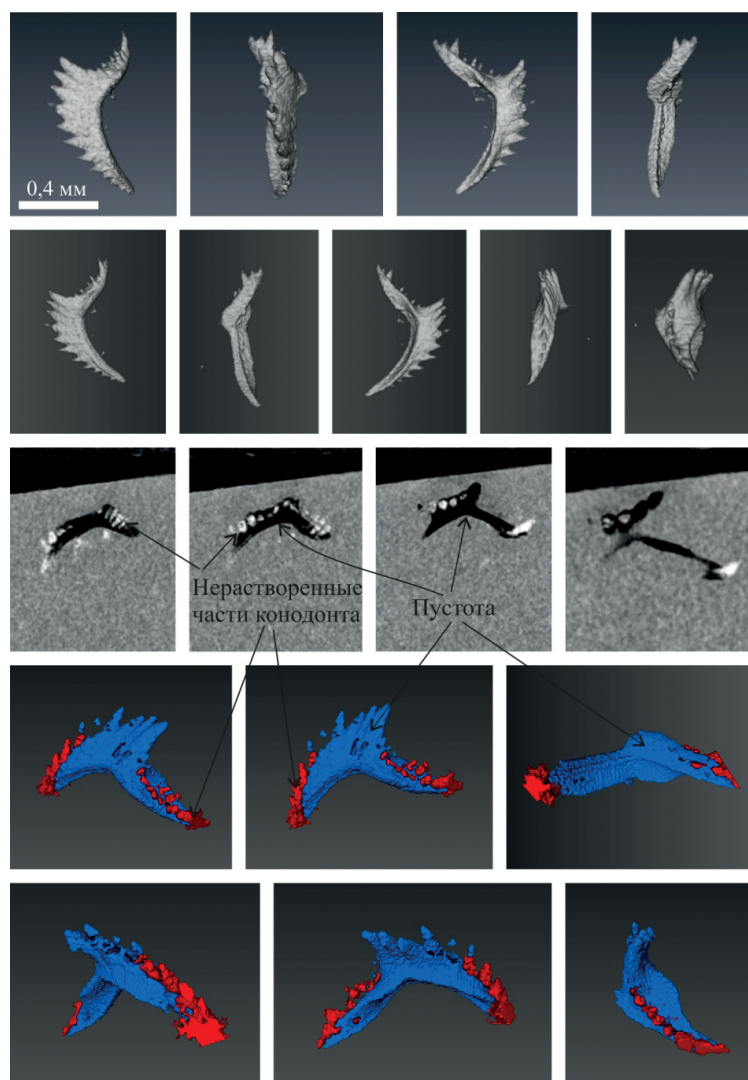


Рис. 9. Объемные реконструкции конодонта *Nothognathella* sp. до реакции (верхний ряд), после нее (второй сверху ряд), микротомографические срезы (средний ряд) и объемные реконструкции (два нижних ряда) пустоты, оставшейся после растворения конодонта

Несомненным достоинством метода микроКТ служит и то, что полученные изображения хранятся в электронном виде и могут быть в считанные секунды, посредством электронной почты, отправлены (например, для консультации) в любую точку мира. Помимо этого, электронная документация, в отличие от образцов горных пород, не требует для своего хранения многочисленных шкафов и складских помещений.

Изложенные данные позволяют сделать вывод об эффективности предложенной методики, но в виду ее высокой цены на настоящий момент в биостратиграфии она может применяться лишь при решении наиболее важных и принципиальных задач.

Финансирование

Работа выполнена по теме государственного задания № 0246-2019-0118 и за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета.

Литература

- Артюшкова О.В. (2014). Девонские конодонты из вулканогенно-кремнистых отложений Магнитогорской мегазоны Южного Урала. Уфа: ДизайнПресс, 152 с.
- Журавлев А.В. (2013). Возможности использования компьютерной микротомографии для изучения конодонтовых элементов. *Литосфера*, 2, с. 163–166.
- Журавлев А.В., Вевель Я.А. (2012). Возможности использования вычислительной микротомографии в микропалеонтологических и литологических исследованиях. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, 7(2). http://www.ngtp.ru/rub/2/21_2012.pdf.
- Журавлев А.В., Герасимова А.И. (2016). Рентгеномтографический метод микропалеонтологического изучения кремнистых пород. *Вестник ИГ КНЦ УрО РАН*, 3, с. 26–32.
- Заватский М.Д., Пономарев А.А., Попов И.П., Леонтьев Д.С. (2016). Перспективы повышения обоснованности проведения гидроразрыва пласта с использованием результатов комплексной компьютерной томографии и наземных геохимических исследований. *Нефтегазовое дело*, 2, с. 9–15.



Рис. 10. Фотография среза (слева сверху) и объемные реконструкции конодонта *Ancyrodella nodosa* Ulrich et Bassler до реакции (верхний ряд), после реакции (средний ряд) и пустоты, оставшейся после его растворения (нижний ряд)

- Иванов К.С. (1987). Методы поисков и выделения конодонтов: Методические рекомендации. Свердловск: УНЦ АН СССР, 118 с.
- Королев Э.А., Ескин А.А., Стаценко Е.О., Плотникова И.Н. (2014). Флюидодинамические каналы восходящей миграции глубинных растворов в плотных карбонатах башкирского яруса. *Нефтяное хозяйство*, 10, с. 6–8.
- Корост Д.В., Калмыков Г.А., Япаскерт В.О., Иванов М.К. (2010). Применение компьютерной микротомографии для изучения строения терригенных коллекторов. *Геология нефти и газа*, 2, с. 36–42.
- Маслакова Н.И., Горбачик Т.Н., Алексеев А.С., Барсков И.С., Голубев С.Н., Назаров Б.Б., Петрушевская М.Г. (1995). Микрорепалеонтология: учебник. М.: изд. МГУ, 256 с.
- Маслов В.А., Артюшкова О.В. (2010). Стратиграфия и корреляция девонских отложений Магнитогорской мегазоны Южного Урала. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 288 с.
- Пономаренко Е.С., Стаценко Е.О., Уразаева М.Н. (2014). Гидрозойная интерпретация Palaeoplesina (проблематика) на основе строения системы каналов. *Палеонтологический журнал*, 2, с. 20–25.
- Пучков В.Н. (1979). Рекомендации по поискам и обработке конодонтов на поверхностях слоистости бескарбонатных пород. *Конодонты Урала и их стратиграфическое значение*. Свердловск: УНЦ АН СССР, с. 132–140.
- Савицкий Я.В. (2015). Современные возможности метода рентгеновской томографии при исследовании керны нефтяных и газовых месторождений. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*, 15, с. 28–37.
- Сергеева С.П. (1966). О методике извлечения конодонтов из пород. *Ученые записки Ленинградского государственного педагогического института*, с. 360–363.
- Фазлиахметов А.М., Стаценко Е.О., Храмченков Э.М. (2014). О применении рентгеновской компьютерной томографии при изучении конодонтов. *Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий: Мат. Всеросс. молодежной геологической конф.* Уфа: ДизайнПолиграфСервис, с. 174–177.
- Фазлиахметов А.М. (2020). Франские граувакки Худолозовской мульды. Сообщение 1. Краткая характеристика отложений. *Геологический вестник*, 2, с. 3–23. <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2020-2-1>
- Фазлиахметов А.М., Стаценко Е.О., Храмченков Э.М. (2016). Новый подход к изучению конодонтов с применением рентгеновской компьютерной микротомографии. *100-летие Палеонтологического общества России. Проблемы и перспективы палеонтологических исследований. Мат. LXII сессии Палеонтологического общества при РАН*. СПб: ВСЕГЕИ, с. 185–186.
- Фазлиахметов А.М., Стаценко Е.О., Храмченков Э.М., Тагариева Р.Ч. (2015). К методике изучения конодонтов, заключенных в кремнистых породах. *Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов*, 21, с. 113–115.
- Якупов Р.Р., Стаценко Е.О., Фазлиахметов А.М. (2014). О применении рентгеновской компьютерной томографии для исследования хитиновых. *Геологический сборник № 11*, с. 37–40.
- Якушина О.А. (2012). Методика и технология изучения природного и техногенного минерального сырья методом рентгеновской томографии.

Автореф. дис. докт. техн. наук. Дубна: Государственный университет «Дубна», 50 с.

Якушина О.А., Хозяинов М.С. (2014). Анализ возможностей томографии для петрофизических исследований керны нефтегазовых скважин. *Каротажник*, 2(236), с. 107–121.

Carlos W.D. (2006). Three-dimensional imaging of earth and planetary materials. *Earth and Planetary Science Letters*, 249, pp. 133–147. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.06.020>

Clark D.L. (1981). Introduction to the Conodonta. General aspects. Treatise on invertebrate Paleontology, pt. W, Minecellanea. *Geol. Soc. Amer.*, pp. 3–4.

Collinson C.W. (1963). Collection and preparation of conodonts through mass production techniques. *Illinois Geological Survey*, 343, pp. 1–16.

Cnudde V., Boone M.N. (2013). High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. *Earth-Science Reviews*, 123, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.003>

Tafforeau P., Boistel R., Boller E., Bravin A., Brunet M., Chaimanee Y., Cloetens P., Feist M., Hoszowska J., Jaeger J.-J., Kay R.F., Lazzari V., Marivaux L., Nel A., Nemoz C., Thibault X., Vignaud P., Zabler S. (2006). Applications of X-ray synchrotron microtomography for non-destructive 3D studies of paleontological specimen. *Applied Physics*, A 83, pp. 195–202. <https://doi.org/10.1007/s00339-006-3507-2>

Сведения об авторах

Александр Маратович Фазлиахметов – кандидат геол.-мин. наук, старший научный сотрудник лаборатории стратиграфии палеозоя, Институт геологии УФИЦ РАН Россия, 450077, Уфа, ул. Карла Маркса, д. 16/2

Ольга Викторовна Артюшкова – доктор геол.-мин. наук, главный научный сотрудник лаборатории стратиграфии палеозоя, Институт геологии УФИЦ РАН Россия, 450077, Уфа, ул. Карла Маркса, д. 16/2

Евгений Олегович Стаценко – заведующий лабораторией рентгеновской компьютерной томографии Института геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет Россия, 420111, Казань, ул. Кремлёвская, д. 4/5

Раиль Илгизарович Кадыров – научный сотрудник Института геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет Россия, 420111, Казань, ул. Кремлёвская, д. 4/5

Статья поступила в редакцию 20.08.2020;

Принята к публикации 28.04.2021; Опубликована 30.11.2021

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

On the possibility of introducing X-ray computed microtomography into the practice of biostratigraphic research

A.M. Fazliakhmetov^{1*}, O.V. Artyushkova¹, E.O. Statsenko², R.I. Kadyrov²

¹Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

²Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

*Corresponding author: Alexander M. Fazliakhmetov, e-mail: famrb@mail.ru

Abstract. Currently, the techniques applied for extraction and study of conodonts from siliceous rocks are associated with a number of problems. This makes it difficult to solve many problems in the areas of development of the volcanic and volcanic-sedimentary rocks, where cherts, jaspers, and phtanites are the only sedimentary formations for dating these deposits.

On X-ray computed microtomography it is possible to avoid some problems to obtain not only excellent 3-D images of conodonts, but sections in any direction too, as well as in video formats. It is shown that similar results are successful under the hollows after the dissolution of the conodonts.

There is no problem in application of X-ray microcomputed tomography when conodonts have been already found on

the surface or inside of the sample, or if the content of conodonts in the rock is obviously high. In such a case the scanning without preliminary search is ensured. In cases when conodonts are rare and not obvious, it is proposed the following technique of their discovery.

The rock sample is cut into plates. The conodonts are search for on the surface of the plates, moistened with a mixture of glycerin and water under a binocular microscope. If it is necessary (when the rock is opaque), the result is checked by a chemical reaction: 5–10 % hydrochloric acid plus 1–2 crystals of ammonium molybdate are put on the surface of the sample. The appearance of a yellow sediment means the presence of phosphorus, to indicate the probability the detected object to be a conodont. Next, the sample should be washed from acid, its size should be decreased. Then the microtomographic study should be performed.

Keywords: X-ray computed tomography, μ CT, conodonts, biostratigraphy

Acknowledgements

The work was carried out on the topic of state assignment No. 0246-2019-0118 and at the expense of the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program.

Recommended citation: Fazliakhmetov A.M., Artyushkova O.V., Statsenko E.O., Kadyrov R.I. (2021). On the possibility of introducing X-ray computed microtomography into the practice of biostratigraphic research. *Georesursy = Georesources*, 23(4), pp. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.2>

References

- Artyushkova O.V. (2014). Devonian conodonts from volcanic-siliceous deposits of the Magnitogorsk megazone of the South Urals. Ufa: DizaynPress, 152 p. (In Russ.)
- Carlos W.D. (2006). Three-dimensional imaging of earth and planetary materials. *Earth and Planetary Science Letters*, 249, pp. 133–147. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.06.020>
- Clark D.L. (1981). Introduction to the Conodonts. General aspects. Treatise on invertebrate Paleontology, pt. W, Minecellanea. *Geol. Soc. Amer.*, pp. 3–4.
- Collinson C.W. (1963). Collection and preparation of conodonts through mass production techniques. *Illinois Geological Survey*, 343, pp. 1–16.
- Cnudde V., Boone M.N. (2013). High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. *Earth-Science Reviews*, 123, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.003>
- Fazliakhmetov A.M. (2020). Frasnian greywackes of the Khudolaz syncline. Message 1. Brief description of deposits. *Geologicheskii vestnik*, 2, pp. 3–23. (In Russ.). <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2020-2-1>
- Fazliakhmetov A.M., Statsenko E.O., Khrumchenkov E.M. (2016). A new approach to studying conodonts using X-ray computed microtomography. *Proc. LXII session of the Paleontological Society: 100th anniversary of the Russian Paleontological Society. Problems and prospects of paleontological research*. St.Petersburg: VSEGEI, pp. 185–186. (In Russ.)
- Fazliakhmetov A.M., Statsenko E.O., Khrumchenkov E.M. (2014). On the application of X-ray computed tomography to the study of chitinoses. *Proc. All-Russ. youth geological conf.: Geology, geoecology and resource potential of the Urals and adjacent territories*. Ufa: DizaynPoligrafServis, pp. 174–177. (In Russ.)
- Fazliakhmetov A.M., Statsenko E.O., Khrumchenkov E.M., Tagarieva R.Ch. (2015). Towards a methodology for studying conodonts embedded in siliceous rocks. *Geologiya. Izvestiya Otdeleniya nauk o Zemle i prirodnykh resursov*, 21, pp. 113–115. (In Russ.)
- Ivanov K.S. (1987). Methods of search and selection of conodonts: Methodical recommendations. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, 118 p. (In Russ.)
- Korolev E.A., Eskin A.A., Statsenko E.O., Plotnikova I.N. (2014). Fluid channels of upward deep solutions migration in dense carbonate rocks of Bashkirian stage. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil industry*, 10, pp. 6–8. (In Russ.)
- Korost D.V., Kalmykov G.A., Yapaskurt V.O., Ivanov M.K. (2010). Application of computed microtomography to study the structure of terrigenous reservoirs. *Geologiya nefi i gaza = Russian oil and gas geology*, 2, pp. 36–42. (In Russ.)
- Maslakova N.I., Gorbachik T.N., Alekseev A.S., Barskov I.S., Golubev S.N., Nazarov B.B., Petrushevskaya M.G. (1995). *Micropaleontology*. Moscow: MSU publ., 256 p. (In Russ.)
- Maslov V.A., Artyushkova O.V. (2010). Stratigraphy and correlation of the Devonian deposits of the Magnitogorsk megazone of the South Urals. Ufa: DizaynPoligrafServis, 288 p. (In Russ.)
- Ponomarenko E.S., Statsenko E.O., Urazaeva M.N. (2014). A hydrozoan interpretation of Palaeoaplysina (enigmatic organisms) based on the canal arrangement and structure. *Paleontological Journal*, 48(2), pp. 118–123. <http://dx.doi.org/10.1134/S0031030114020117>
- Puchkov V.N. (1979). Recommendations for the search and processing of conodonts on the layered surfaces of carbonate-free rocks. *Conodonts of the Urals and their stratigraphic significance*. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, pp. 132–140. (In Russ.)
- Savitskiy Ya.V. (2015). Current features of x-ray tomography in examination of core samples from oil and gas deposits. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 15, pp. 28–37. (In Russ.)
- Sergeeva S.P. (1966). On the method of extracting conodonts from rocks. *Uchenye zapiski Leningradskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo instituta*, pp. 360–363. (In Russ.)
- Tafforeau P., Boistel R., Boller E., Bravin A., Brunet M., Chaimanee Y., Cloetens P., Feist M., Hoszowska J., Jaeger J.-J., Kay R.F., Lazzari V., Marivaux L., Nel A., Nemoz C., Thibault X., Vignaud P., Zabler S. (2006). Applications of X-ray synchrotron microtomography for non-destructive 3D studies of paleontological specimen. *Applied Physics*, A 83, pp. 195–202. <https://doi.org/10.1007/s00339-006-3507-2>
- Yakupov R.R., Statsenko E.O., Fazliakhmetov A.M. (2014). On the application of X-ray computed tomography for the study of chitinoses. *Geologicheskii sbornik No. 11*, pp. 37–40. (In Russ.)
- Yakushina O.A. (2012). Methodology and technology for studying natural and technogenic mineral raw materials by X-ray tomography. Abstract Dr. engin. sci. diss. Dubna: State University “Dubna”, 50 p. (In Russ.)
- Yakushina O.A., Khozyainov M.S. (2014). Analysis of tomography capabilities for petrophysical core studies of oil and gas wells. *Karotazhnik*, 2(236), pp. 107–121. (In Russ.)
- Zavatskiy M.D., Ponomarev A.A., Popov I.P., Leont'ev D.S. (2016). Prospects for improving the validity of hydraulic fracturing using integrated computed tomography and surface geochemical survey results. *Neftegazovoe delo*, 2, pp. 9–15. (In Russ.)
- Zhuravlev A.V. (2013). Potentialities of computed microtomography for conodont elements study. *Litosfera*, 2, pp. 163–166. (In Russ.)
- Zhuravlev A.V., Gerasimova A.I. (2016). X-ray tomographic method for the micropaleontological study of siliceous rocks. *Vestnik IG KNTs UrO RAN*, 3, pp. 26–32. (In Russ.)
- Zhuravlev A.V., Vevel' Ya.A. (2012). Possibilities of computed microtomography application in micropaleontological and lithological studies. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 7(2). (In Russ.). http://www.ngtp.ru/rub/2/21_2012.pdf

About the Authors

Alexander M. Fazliakhmetov – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences
16/2 Karl Marx st., Ufa, 450077, Russian Federation

Olga V. Artyushkova – DSc (Geology and Mineralogy), Chief Researcher, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences
16/2 Karl Marx st., Ufa, 450077, Russian Federation

Evgeny O. Statsenko – Junior Researcher, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies, Kazan Federal University
4/5 Kremlevskaya st., Kazan, 420111, Russian Federation

Rail I. Kadyrov – PhD (Geology and Mineralogy), Institute of Geology and Oil and Gas Technologies, Kazan Federal University
4/5 Kremlevskaya st., Kazan, 420111, Russian Federation

Manuscript received 20 August 2020;

Accepted 28 April 2021; Published 30 November 2021