

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ И ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ОБЛОМОЧНЫХ ПОРОД СЛОЖНОГО СОСТАВА

А. М. Фазлиахметов<sup>1</sup>, А. А. Пономарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН (ИГ УФИЦ РАН), 450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2, E-mail: famrb@mail.ru

<sup>2</sup> Тюменский индустриальный университет (ТИУ), 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38. E-mail: ponomarev94@mail.ru

В статье на примере двух образцов вулканомиктовых песчаников приведен сравнительный анализ двух методов исследований — микроскопии в проходящем поляризованном свете и рентгеновской компьютерной микротомографии. Показано, что микроскопия дает наиболее полные результаты — позволяет определить минералого-петрографический состав пород, их структурные и текстурные свойства. Рентгеновская компьютерная томография позволяет лишь судить о внутренней однородности образцов. Анализ опубликованных данных показал, что информативность результатов томографических исследований возрастает в песчаниках простого состава и состоящих из зерен с контрастно отличающимся коэффициентом линейного ослабления рентгеновских лучей.

*Ключевые слова:* рентгеновская микротомография, песчаники, ильтибановская толща, улутауская свита

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE APPLICATION OF X-RAY MICROTOMOGRAPHY AND OPTICAL MICROSCOPY METHODS IN THE STUDY OF COMPLEX CLASTIC ROCKS

A. M. Fazliakhmetov<sup>1</sup>, A. A. Ponomarev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geology of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRS), 450077, Russia, Ufa, K. Marks st., 16/2, E-mail: famrb@mail.ru

<sup>2</sup> Tyumen Industrial University (TIU). 625000, Russia, Tyumen, Volodarsky st., 38

Based on the example of two samples of volcanomictic sandstones, the article presents a comparative analysis of two research methods — microscopy in transmitted polarized light and X-ray computer microtomography. It is shown that microscopy gives the most complete results — it allows to determine the mineralogical and petrographic composition of rocks, their structural and textural properties. X-ray computed tomography can only judge the internal homogeneity of the samples. Analysis of the published data showed that the information content of the results of tomographic studies increases in sandstones of simple composition and consisting of grains with a contrastly different coefficient of linear attenuation of X-rays.

*Key words:* X-ray microtomography, sandstones, the Iltibanovo formation, the Ulutau formation

**Для цитирования:** Фазлиахметов А.М., Пономарев А.А. Сравнительный анализ применения методов рентгеновской микротомографии и оптической микроскопии при изучении обломочных пород сложного состава // Геологический вестник. 2020. № 3. С. 76–83. DOI: 10.31084/2619-0087/2020-3-6.

**For citation:** Fazliakhmetov A.M., Ponomarev A.A. (2020) Comparative analysis of the application of X-ray microtomography and optical microscopy methods in the study of complex clastic rocks. *Geologicheskii vestnik*. No. 3. P. 76–83. DOI: 10.31084/2619-0087/2020-3-6.

## Введение

В настоящее время изучение горных пород нельзя представить без применения точных химических или физических методов исследования. К их числу относятся рентгенофазовый анализ, электронная микроскопия, масс-спектрометрия и т. д. В последнее десятилетие к данному перечню добавилась рентгеновская компьютерная микротомография (РКТ), позволяющая без деструкции исследуемого образца визуализировать и описать его внутреннее строение. Особенно часто данный метод применяется при изучении пустотного пространства пород-коллекторов нефти и газа [Корост и др., 2010; Якушина, Хозяинов, 2014; Ефимов и др., 2016], тогда как при решении иных задач он используется реже [Фазлиахметов и др., 2012, 2015; Савельев и др., 2016; Якушина и др., 2018], что, по всей видимости, объясняется недостатком информации о РКТ в целом и, особенно, о «границах» применения данного метода.

Выходом в данной ситуации является наращивание наших знаний и навыков применения РКТ посредством изучения пород разного состава и анализа ценности полученных данных. Особенно эффективным такой подход представляется в комплексе с широко применяемыми методами исследования.

В данном сообщении приводятся сравнительный анализ результатов, полученных методом РКТ и посредством оптической микроскопии в проходящем поляризованном свете. В качестве объектов изучения выбраны породы сложного минералогопетрографического состава — тефрогенные и вулканотерригенные песчаники Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала (ЗМЗ).

## Объекты изучения и методика работ

Объектами изучения послужили два образца песчаников.

*Образец 1* представляет собой вулканотерригенный песчаник. Он был отобран в стратотипическом разрезе ильтибановской толщи нижнего девона ЗМЗ у северной оконечности плотины Ильтибановского водохранилища в точке с координатами N 54° 20' 27.85", E 59° 14' 04.91".

*Образец 2* — тефрогенный песчаник из нижней части стратотипа улутауской свиты живетского–нижней части франского яруса ЗМЗ. Координаты точки опробования — N 52° 44' 28.72", E 58° 34' 12.47".

Подробная информация об изученных породах представлена в публикациях [Фазлиахметов, 2011; Зайнуллин, 2017, 2018].

Микроскопическое описание проведено на поляризационном микроскопе Amplival Carl Zeiss по стандартной методике. Суть ее заключается в следующем. Пластина горной породы толщиной 0.03 мм приклеена между предметным и покровным стеклами. Ее описание проводится в проходящем поляризованном свете. С этой целью под столиком микроскопа, между осветителем и препаратом, установлен поляризующий элемент (призма Николя или полароидная пластинка) — поляризатор. Для уточнения состава минералов между препаратом и окуляром вводится дополнительный поляризующий элемент — анализатор с плоскостью поляризации, перпендикулярной таковой у поляризатора.

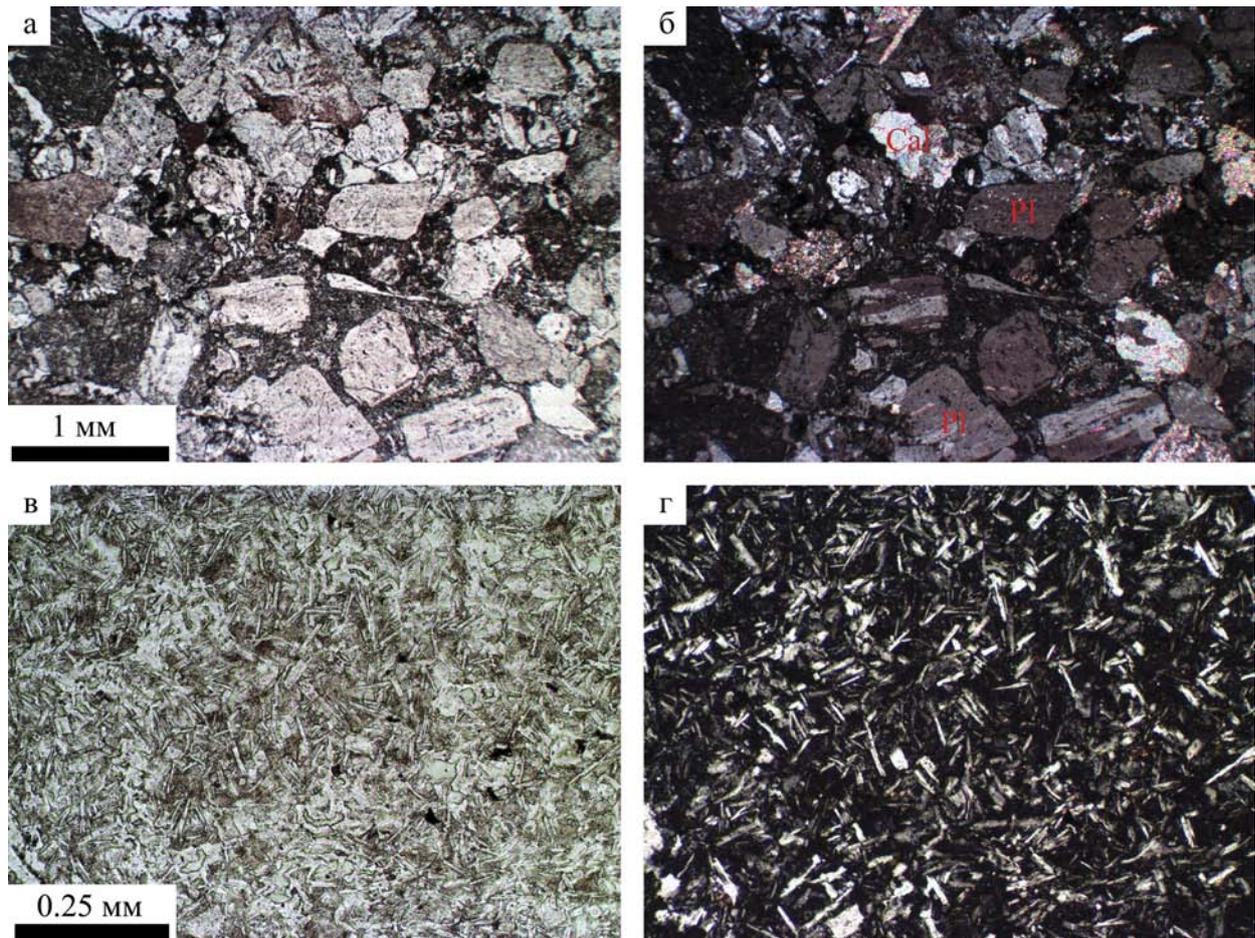
Съемка методом РКТ была проведена на рентгеновском компьютерном микротомографе SkyScan 1172 со следующими настройками сканирования: Image Pixel Size (um) = 16.34; Filter = Al+Cu; Rotation Step (deg) = 0.700; Frame Averaging = ON(5); Random Movement = ON(10); Use 360 Rotation = YES. Предварительно из образцов были выпилены цилиндры диаметром 7–9 мм и высотой 15–20 мм. Обработка изображений осуществлена в программном пакете NRecon со следующими параметрами реконструкции: Smoothing = 3; Smoothing kernel = 2 (Gaussian); Ring Artifact Correction = 20; Beam Hardening Correction = 48%; Minimum for CS to Image Conversion = 0.016289; Maximum for CS to Image Conversion = 0.241681.

Полученные изображения представлены в градиентах серого цвета в 8-битном формате .bmp. В ряду от черного цвета к белому линейный коэффициент ослабления рентгеновских лучей (ЛКО) возрастает.

## Результаты микроскопического изучения

*Образец 1.* Песчаник грубозернистый вулканотерригенный.

Зерна преимущественно представлены магматическими породами и кристаллами плагиоклаза (рис. 1). Среди магматических разновидностей встречены кварцевые порфиры и плагиоклазовые порфириты с микролитовой, микрофельзитовой, фельзитовой, интерсертальной, пилотакситовой структурами основной массы. Плагиоклазы представлены монокристаллами и полисинтетическими двойниками, часто они пелитизированы, серицитизированы и хлоритизированы.



**Рис. 1. Микрофотографии песчаников ильтибановской толщи — образец 1**

*Примечания:* а–б — структура и состав породы. Видны плагиоклазы (Pl), кальциты (Cal) зерна пород, их контакты и т.д.; в–г — интерсеральная структура одного из зерен; а, в — без анализатора; б, г — с анализатором.

**Fig. 1. Micrographs of sandstones of the Itibanovo formation — sample 1**

*Notes:* а–б — structure and composition of the rock. Plagioclases (Pl), calcite (Cal), rock grains, their contacts, etc.; в–г — intersertal structure of one of the grains; а, в — without an analyzer; б, г — with an analyzer.

В меньших количествах встречаются кристаллы кальцита, пелитоморфные и микрокристаллические известняки, аргиллиты, кварциты, пироксен-хлорит-кварцевые агрегаты.

Зерна прилегают друг к другу плотно. Сортировка хорошая. Характерны конформные, реже инкорпорационные контакты. Редкими участками встречается поровый халцедоновый цемент.

*Образец 2.* Песчаник крупно-грубозернистый тфрогенный.

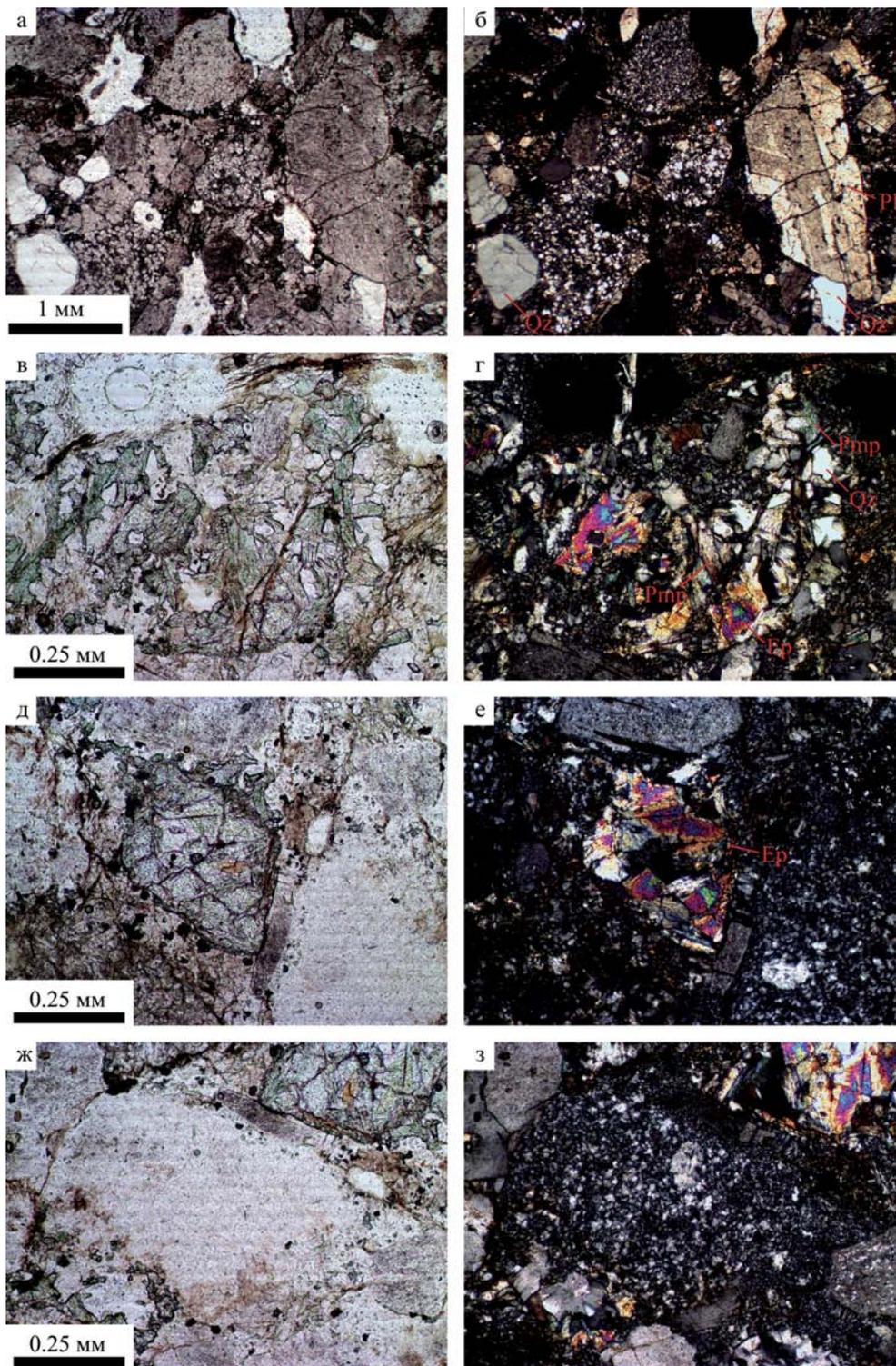
В составе преобладают кристаллы пелитизированного плагиоклаза, как монокристаллического, так и полисинтетических двойников (рис. 2). Приблизительно в тех же количествах встречаются зерна кварцевых порфиоров и кварц-плагиоклазовых порфиритов с микрофельзитовой и фельзитовой

основной массой. В подчиненных количествах присутствуют зерна субвулканических и вулканических пород среднего состава, пумпеллиит-эпидотовые, пумпеллиит-кварцевые, хлорит-пумпеллитовые породы и кварц.

Сортировка плохая, зерна плотно прилегают друг к другу. Их контакты конформные.

### Результаты анализа изображения РКТ

На РКТ-изображениях образца 1 (рис. 3) видны участки с разной ЛКО. Их размер меняется в пределах от 0.2 до 3.0 мм, преобладают участки размером 1.0–2.0 мм. Границы их нечеткие, расплывчатые. Форма разнообразна, преимущественно неправильная. Обломочная структура не распознается. Контуры



**Рис. 2. Микрофотографии песчаников улугауской свиты**

*Примечания:* а-б — структура и состав породы; в-г — зерно, сложенное кварцем (*Qz*), пумпеллитом (*Pmp*) и эпидотом (*Ep*); д-е — зерно эпидота; ж-з — зерно плагиоклазового порфирита с фельзитовой структурой основной массы. Левый столбец — без анализатора; правый — с анализатором.

**Fig. 2. Micrographs of sandstones of the Ulutau formation**

*Notes:* а-б — texture and composition of the rock; в-г — grain composed of quartz (*Qz*), pumpellite (*Pmp*) and epidote (*Ep*); д-е — epidote grain; ж-з — grain of plagioclase porphyrite with felsic structure of the groundmass. Left column — no analyzer; right — with analyzer.

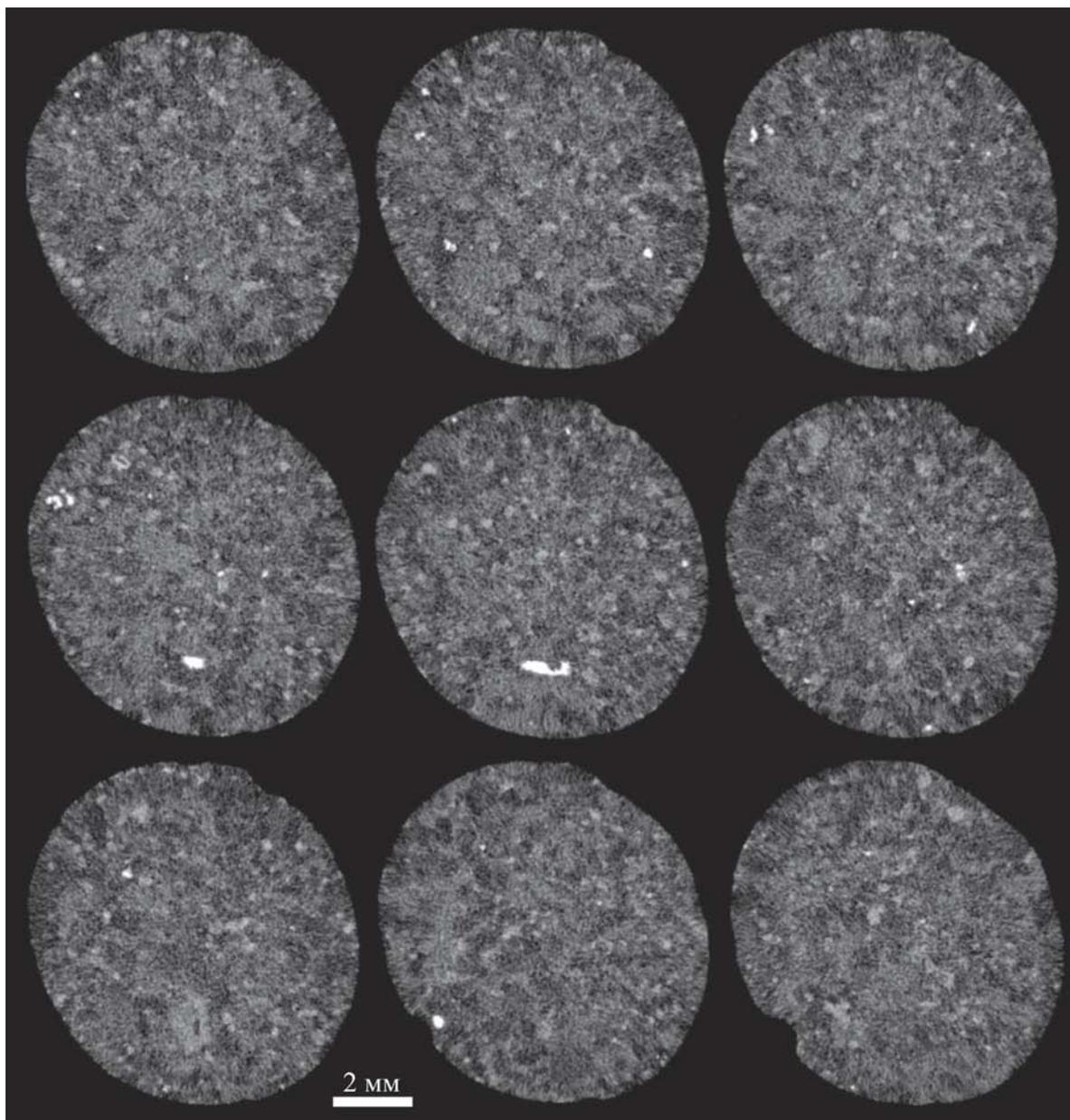


Рис. 3. Томографические срезы образца 1

Fig. 3. Tomographic slices of sample 1

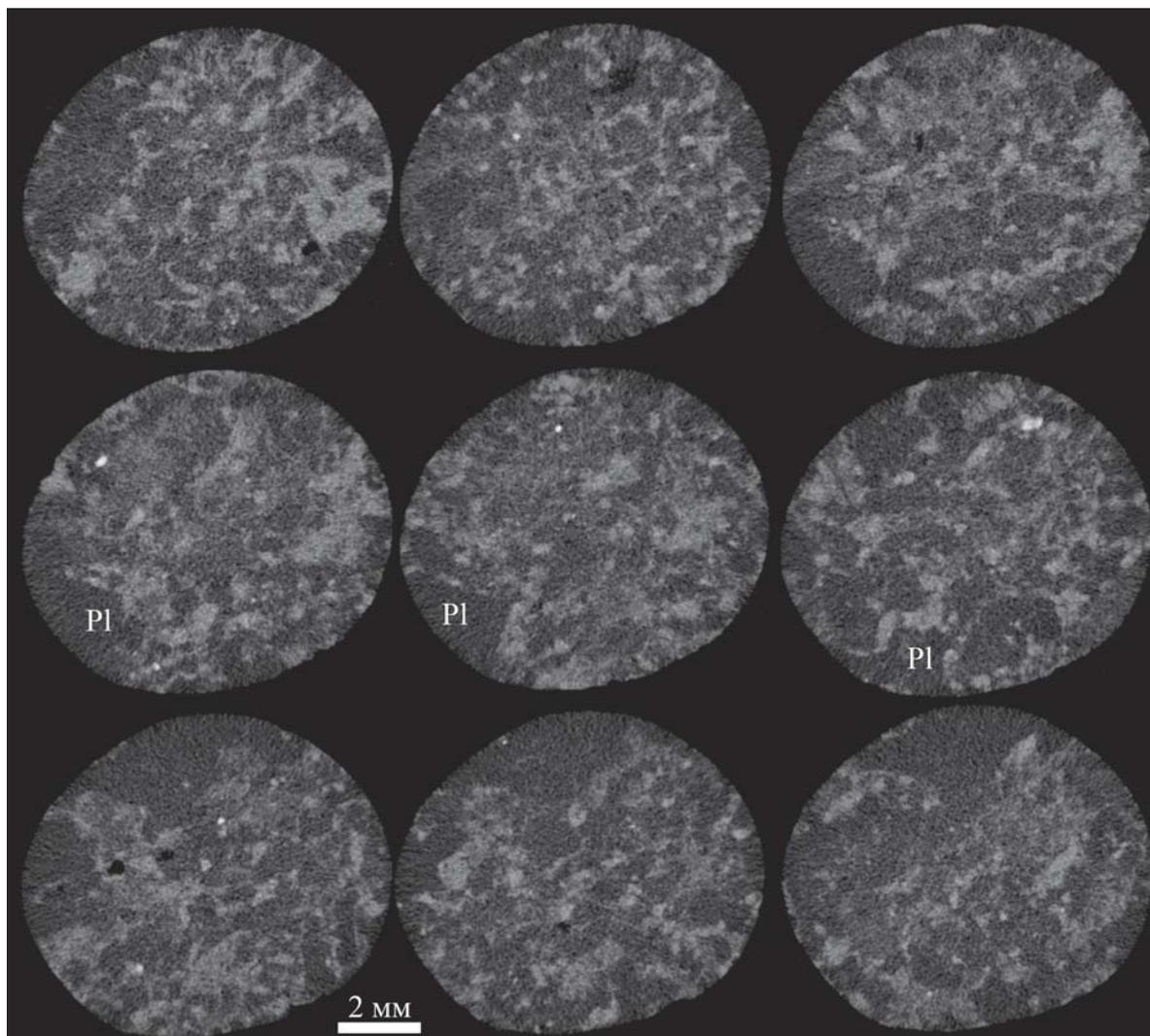
отдельных обломков видны в единичных случаях. Распределение участков разной плотности равномерное. Сравнительно редко встречаются включения с высоким ЛКО. Форма их неправильная. Размер 0.1–0.5 мм.

Съемка методом РКТ образца 2 дала близкий результат (рис. 4). Можно лишь добавить, что обломочная структура читается несколько лучше, преобладают участки с невысоким ЛКО. По форме распознаются крупные кристаллы плагиоклаза.

Включения с высокой способностью к поглощению рентгеновских лучей встречаются редко.

### Обсуждение

Оптическая микроскопия позволила установить состав зерен, их форму, сортировку, структуру, взаимоотношения, состав и тип цемента, особенности вторичных изменений и т. д. Посредством РКТ уверенно диагностировано лишь однородное



**Рис. 4. Томографические срезы образца 2**

*Примечание:* Pl — предполагаемые кристаллы плагиоклаза.

**Fig. 4. Tomographic slices of sample 2**

*Note:* Pl — putative plagioclase crystals.

распределение в песчаниках участков с разным ЛКО.

Таким образом, при изучении песчаников сложного петрографического состава ценность результатов РКТ минимальна.

В целях совершенствования методики применения РКТ для изучения песчаников является важным сравнить полученные результаты с более успешными примерами.

В данном отношении представляется интересной публикация [Фазлиахметов и др., 2012]. В ней приведены результаты изучения двух образцов песчаников.

Первый образец — кварцевый песчаник зильмердакской свиты рифея с примесью зерен гематита и ксенотима. РКТ позволила выявить в исследованном препарате участки, обогащенные и обедненные гематитом, установить объемное содержание, форму, размер и характер срастания гематита, распределение в породе и объемное содержание полевых шпатов и ксенотима. Ценность этой информации может быть приравнена к ценности данных, полученных посредством оптической микроскопии. Очевидно, что столь хороший результат обусловлен, во-первых, простым составом песчаников — кварц, полевые шпаты,

гематит, ксенотим. Во-вторых, контрастом этих минералов по величине ЛКО.

Вторым образцом является тефрогенный песчаник ирендыкской свиты. Состав его более простой по сравнению с исследованными песчаниками ильтибановской толщи и улутауской свиты, структура сложнее, а контраст ЛКО породообразующих минералов меньше, чем в песчаниках зильмердакской свиты. Проведенные РКТ-исследования позволили установить обломочную структуру, визуализировать и изучить распределение в образце некоторых минералов, в частности, пироксенов, но полученные изображения не оказались столь четкими и полезными, как изображения песчаника зильмердакской свиты.

Из изложенного следует, что наилучшие результаты метод РКТ позволяет достичь при изучении обломочных пород простого состава и при нахождении в породах зерен, существенно отличающихся по величине линейного коэффициента ослабления рентгеновских лучей.

Усложнение состава пород и снижение контраста слагающих их зерен по величине ЛКО снижает ценность результатов РКТ-исследований.

### Заключение

Исследование двух образцов песчаников со сложным минералого-петрографическим составом методами рентгеновской компьютерной микротомографии и оптической микроскопии в проходящем поляризованном свете показало, что первый метод существенно уступает второму по информативности.

Рентгеновская компьютерная микротомография позволила визуализировать внутреннее строение исследованных образцов лишь в общих чертах, несопоставимых с изображением, наблюдаемым посредством поляризационного микроскопа.

Анализ полученных и опубликованных данных позволил прийти к выводу, что наилучшие результаты можно ожидать при изучении обломочных пород простого состава, при наличии в них минералов, существенно отличающихся по величине линейного коэффициента ослабления рентгеновских лучей.

*Исследования выполнены по теме государственного задания № 0246-2019-0118.*

### Список литературы:

Ефимов А.А., Савицкий Я.В., Галкин С.В., Шапиро С.А. Опыт исследования зерна карбонатных отложений методом рентгеновской томографии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2016. Т. 15, № 18. С. 23–32. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.18.3. (Англ.).

Зайнуллин Р.И. Состав и особенности формирования вулканокластических отложений нижнего девона Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // Литосфера. 2017. Т. 17, № 2. С. 78–94.

Зайнуллин Р.И. Обстановки седиментации локхов-нижеэмских вулканокластических отложений Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. № 12. С. 104–113.

Корост Д.В., Калмыков Г.А., Япаскурт В.О., Иванов М.К. Применение компьютерной микротомографии для изучения строения терригенных коллекторов // Геология нефти и газа. 2010. № 2. С. 36–42.

Савельев Д.Е., Кожеевников Д.А., Бажин Е.А. Применение рентгеновской томографии для изучения структуры хромовых руд (на примере Саксайского участка массива Средней Крака) // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: Материалы и доклады 11-й Межрегиональной научно-практической конференции. Уфа: ДизайнПресс, 2016. С. 266–269.

Фазлихметов А.М. Условия седиментации улутауской свиты Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // Литосфера. 2011. № 2. С. 42–52.

Фазлихметов А.М., Стаценко Е.О., Храмченков Э.М. О применении рентгеновской компьютерной томографии при изучении песчаников // Геологический сборник № 11 / ИГ УНЦ РАН. Уфа: ДизайнПресс, 2012. С. 92–95.

Фазлихметов А.М., Стаценко Е.О., Храмченков Э.М., Тагариева Р.Ч. К методике изучения конодонтов, заключенных в кремнистых породах // Геология. Известия наук о Земле и природных ресурсов АН РБ. 2015. № 21. С. 113–115.

Якушина О.А., Хозяинов М.С. Анализ возможностей рентгеновской томографии для петрофизических исследований зерна нефтяных скважин // Каротажник. 2014. № 2(236). С. 107–121.

Якушина О.А., Ожогина Е.Г., Хозяинов М.С. Морфо-структурный анализ минерального вещества: метод рентгеновской томографии // Разведка и охрана недр. 2018. № 10. С. 66–69.

### References:

Fazliakhmetov A.M. (2011) Sedimentation conditions of the Ulutau suite of the West Magnitogorsk zone of the Southern Urals. *Litosfera*, (2), 42-52. (In Russian).

Fazliakhmetov A.M., Statsenko Ye.O., Khranchenkov E.M. (2012) On the use of X-ray computed tomography in the study of sandstones. *Geologicheskii sbornik № 11 – Geological collection № 11*. Ufa: DesignPress, 92-95. (In Russian).

Fazliakhmetov A.M., Statsenko Ye.O., Khranchenkov E.M., Tagariyeva R.Ch. (2015) On the method of studying conodonts enclosed in siliceous rocks. *Geologiya. Izvestiya nauk o Zemle i prirodnikh resursov AN RB – Geology. Bulletin of Earth Sciences and Natural Resources of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*. Ufa, (21), 113-115. (In Russian).

Korost D.V., Kalmykov G.A., Yapaskurt V.O., Ivanov M.K. (2010) Application of computer microtomography to study the structure of terrigenous reservoirs. *Geologiya nefii i gaza*, (2), 36-42. (In Russian).

Savel'yev D.Ye., Kozhevnikov D.A., Bazhin Ye.A. (2016) Application of X-ray tomography to study the structure of chromium ores (on the example of the Saksay site of the Sredny Kraka massif). *Materialy i doklady 11-i Mezhhregional'noi nauchno-prakticheskoy konferentsii "Geologiya, poleznye iskopayemyye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredel'nykh territoriy"* [Materials and reports of the 11th Interregional Scientific and Practical Conference "Geology, mineral resources and problems of geocology of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories"]. Ufa, DesignPress, 266-269. (In Russian).

Yakushina O.A., Khozyainov M.S. (2014) Analysis of the possibilities of X-ray tomography for petrophysical studies of oil well cores. *Karotazhnik – Well Logger*, 2(236), 107-121. (In Russian).

Yakushina O.A., Ozhogina Ye.G., Khozyainov M.S. (2018) Morphostructural analysis of mineral matter: X-ray tomography method. *Razvedka i okhrana nedr – Exploration and protection of mineral resources*. (10), 66-69. (In Russian).

Yefimov A.A., Savitskiy Ya.V., Galkin S.V., Shapiro S.A. (2016) Experience of study of core from carbonate deposits by X-ray tomography. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas engineering & Mining*, 15(18), 23-32. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.18.3.

Zaynullin R.I. (2017) Composition and features of the formation of volcanoclastic deposits of the Lower Devonian of the West Magnitogorsk zone of the South Urals. *Litosfera*, 17(2), 78-94. (In Russian).

Zaynullin R.I. (2018) Sedimentation conditions of the Lokhkov-Lower Emsian volcanoclastic deposits of the West Magnitogorsk zone of the Southern Urals. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*, (12), 104-113. (In Russian).

#### *Сведения об авторах:*

**Фазлиахметов Александр Маратович**, кандидат геолого-минералогических наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук ИГ УФИЦ РАН (ИГ УФИЦ РАН), Россия, г. Уфа. E-mail: famrb@mail.ru

**Пономарев Андрей Александрович**, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (ТИУ), Россия, г. Тюмень. E-mail: pomomarev94@mail.ru

#### *About the authors:*

*Fazliakhmetov Aleksandr Maratovich*, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRS RAS), Russia, Ufa. E-mail: famrb@mail.ru

*Ponomarev Andrey Alexandrovich*, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Industrial University of Tyumen" (IUT), Russia, Tyumen. E-mail: pomomarev94@mail.ru