

УДК 550.8.012+552.514(470.5)

А. М. Фазлиахметов, Е. О. Стаценко, Э. М. Храмченков

О ПРИМЕНЕНИИ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПЕСЧАНИКОВ

Аннотация. Три образца песчаников исследованы методом компьютерной рентгеновской томографии. Образец 1 представлен кварцевым среднезернистым песчаником с прослоями, обогащенными зернами гематита. На томограммах зерна кварца не видны. Обломки гематита и слюдяных микрокварцитов отчетливо опознаются, их форма, распределение в породе и содержание могут быть определены. Образец 2 отобран из подошвы тефротурбидита (грубозернистый песчаник), образец 3 — из его кровли (крупнозернистый песчаник). Сложный состав песчаников (кристаллы основного плагиоклаза, пироксена, обломки пород, хлорит, пренит и др.) не дает возможности точно идентифицировать минералы и обломки пород на томограммах. В связи с этим съемка проведена по двум образцам одновременно. Во время съемки к ним был прикреплен кусочек алюминия в качестве маркера плотности. В результате обработки данных удалось вычислить объемные содержания фракции легче алюминия (кристаллы плагиоклаза), равной по плотности алюминию (обломки пород, вторично измененные кристаллы пироксена и плагиоклаза) и тяжелее алюминия (кристаллы пироксена). На приведенных примерах показано, как рентгеновская компьютерная томография может быть использована при изучении песчаников.

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная томография, песчаники, методика, минеральный состав, Южный Урал.

Рентгеновская компьютерная томография (РКТ) все чаще используется в практике геологических исследований. В настоящее время данный метод наиболее востребован в нефтегазовой отрасли для определения фильтрационно-емкостных свойств коллекторов и в палеонтологии для определения морфологических особенностей ископаемых [Журавлев, 2013; Пономаренко и др., 2014; Фазлиахметов и др., 2014 и др.]. Примеры применения РКТ в литологии единичны [Ескин, 2014].

Методика проведения РКТ описана во многих публикациях, например, [Якушина, 2012]. Процесс начинается с записи двумерных рентгеновских изображений (теневых проекций) образца. При этом рентгеновская трубка генерирует излучение, часть которого поглощается образцом. Оставшуюся часть интегрирует детектор и преобразует в цифровое изображение, которое сохраняется на жестком диске компьютера. Во время записи образец поворачивается на 360° вокруг оси, перпендикулярной линии «источник—детектор», с шагом $0,3^\circ$ (в данном исследовании). Снимок делается при каждом шаге. Серия полученных теневых проекций обрабатывается компьютером, после чего создается объемная модель образца.

РКТ позволяет распознать внутри исследуемого образца участки, отличающиеся способностью поглощать рентгеновское излучение, которая в большинстве случаев хорошо коррелируется с плотностью. В общем случае, чем больше разница плотностей, тем отчетливее видна структура объекта исследований, например, самородное золото в жильном кварце (рис. 1). Чем меньше образец и крупнее составляющие его фрагменты, тем четче видно внутреннее строение. Зоны образца, имеющие равную плотность (коэффициент поглощения рентгеновского излучения), сливаются.

После проведения РКТ-съемки можно получить виртуальный срез и объемное изображение образца целиком или его части, вычислить их линейные размеры, объем и другие параметры. Материалы съемки могут быть представлены в виде плоского изображения или в формате видео в градациях серого цвета: чем темнее, тем ниже плотность. Возможно применение различных фильтров и изменение цветовых настроек визуализации.

В качестве объектов исследований были взяты три образца. Им была придана форма, близкая к цилиндрической, с диаметром 7 мм и высотой 20 мм. Съемка производилась в Институте геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета с помощью нанофокусной трубки компьютерного рентгенов-

© А. М. Фазлиахметов, 2014

© Е. О. Стаценко, 2014

© Э. М. Храмченков, 2014

ского томографа PhoenixV|tome|XS 240. Суммарные затраты времени на придание формы образцу, съемку и компьютерную обработку составляют около 1 часа.

Образец 1. Песчаник кварцевый с прослоями, обогащенными зернами гематита. Отобран из отложений бирьянской подсвиты зильмердакской свиты рифея Башкирского антиклинория. Обломки кварца составляют более 50% площади шлифа. Их размер от 0,1 до 0,3 мм, сортировка хорошая. Они несущественно удлинены, окатанные и угловато-окатанные. Обломки гематита размером 0,05–0,15 мм занимают около 20% площади шлифа. Они имеют угловато-окатанную форму, распределены в шлифе хаотично, изредка формируя скопления. Прочие обломки представлены микроклином (1–3%), микрокварцитами и слюдястыми микрокварцитами (5–10%). Цемент кварцевый регенерационный.

На томограммах образца 1 отчетливо выделяются участки двух типов (рис. 2). Первый расположен в центральной части образца. Он имеет темный тон, отвечающий кварцу (низкая плотность — 2,65 г/см³), с редкими вкраплениями белого и светлосерого цвета, соответствующими, по всей видимости, гематиту (высокая плотность — 5,0–5,2 г/см³). Плохо заметные вкрапления темно-серого цвета с мозаичной структурой, предположительно, соответствуют слюдястым кварцитам.

Участки второго типа отвечают прослоям с высоким содержанием гематита. На сечениях видно, что сложенные им зерна разноориентированы, разобщены участками, заполненными кварцем, или же прилегают друг к другу плотно, образуя скопления неправильной формы размерами до 1,0 мм. Содержание гематита в них достигает 90–100%, тогда как в среднем колеблется около 20%.

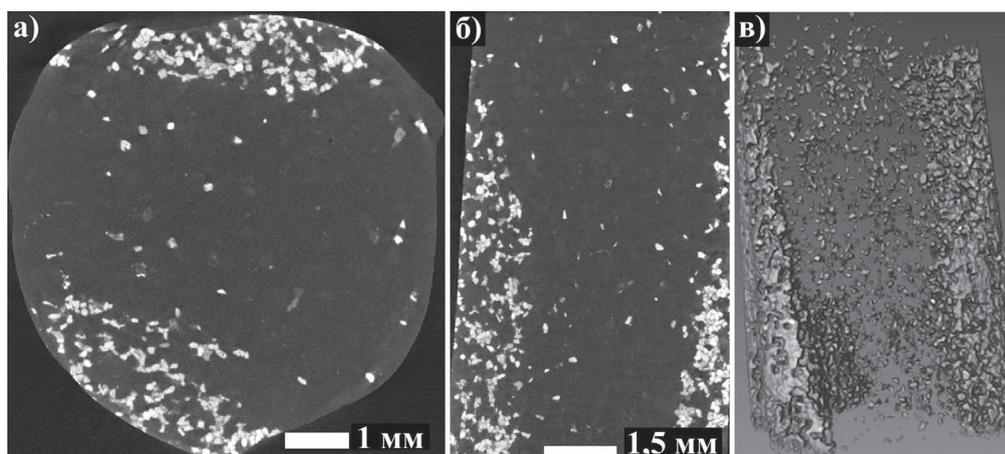


Рис. 2. Томограммы кварцевого песчаника с прослоями, обогащенными зернами гематита (образец 1)

а–б — сечения перпендикулярные слоистости. Темный фон — области заняты кварцем; темно-серые вкрапления — обломки слюдястых кварцитов; светлые вкрапления — зерна гематита; в — объемное изображение, на котором выделены только зерна гематита.

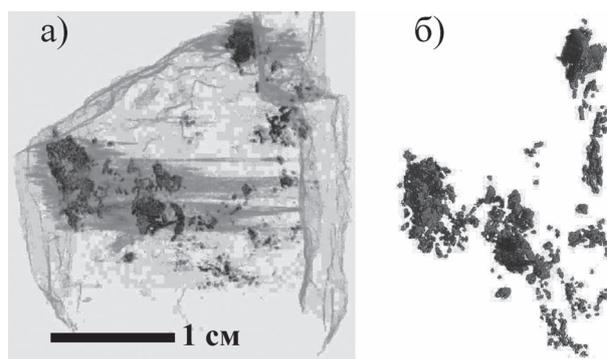


Рис. 1. Объемные томограммы образца жильного кварца с включениями самородного золота (образец В.С. Полянина)

а — видны контуры образца и выделения самородного золота (темные участки); б — путем фильтрации данных выделено только самородное золото.

Образец 2. Песчаник грубозернистый вулканический (в терминологии [Шванов и др., 1998]). Отобран в подошве тефротурбидита из отложений ирендыкской свиты Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала. Размер обломков колеблется от 0,3 до 1,5 мм по короткой оси. Их форма угловатая, сортировка плохая. Существенно преобладают кристаллы основного плагиоклаза — приблизительно 50% от площади шлифа. Пироксен занимает около 20%, обломки вулканических пород андезибазальтового состава — около 10%. Постдиагенетические преобразования, проявленные образованием хлорита, пренита и других минералов, интенсивны и частично скрывают первичную структуру породы.

Образец 3. Песчаник крупнозернистый вулканический. Отобран из кровли того же тефротурбидита, что и образец 2.

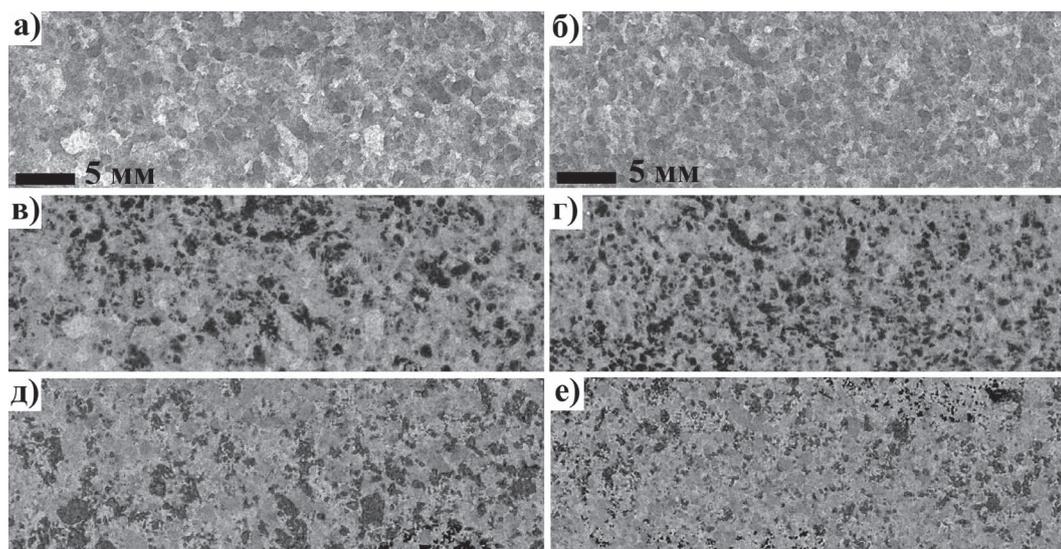


Рис. 3. Томографические срезы по вулканическим песчаникам (образцы 2 и 3)

а, в, д — песчаник грубозернистый из подошвы турбидита; б, г, е — песчаник крупнозернистый из кровли турбидита. а–б — первичные томограммы: более темные участки соответствуют веществу с малой плотностью, светлые — веществу с высокой плотностью; в–г — темным выделены участки с плотностью меньше, чем у алюминия (предположительно плагиоклазы); д–е — темным выделены участки с плотностью больше, чем у алюминия (предположительно пироксены).

Минералого-петрографический состав и структура образцов 2 и 3 более сложные в сравнении с образцом 1. Пироксены и плагиоклазы, составляющие основной объем породы, имеют непостоянный химический состав и, соответственно, плотность (лабродор — $2,69 \text{ г/см}^3$, битовнит — $2,72 \text{ г/см}^3$, анортит — $2,76 \text{ г/см}^3$, энстатит — $3,1\text{--}3,3 \text{ г/см}^3$, гиперстен — $3,3\text{--}3,5 \text{ г/см}^3$, диопсид — $3,3\text{--}3,4 \text{ г/см}^3$). Форма и размер их кристаллов различны — от долей до нескольких миллиметров. Вторичные минералы развиты по кристаллам в целом, их отдельным участкам, обломкам пород и цементу. Кроме того, плотность всех минералов в изучаемых образцах отличается несущественно.

Перечисленные факторы ограничивают возможность расшифровки томограмм. Несмотря на то, что обломочная структура читается в целом отчетливо (рис. 3), форма обломков не всегда видна хорошо. Многие из них, имея близкий цветотон, сливаются друг с другом. Кроме того, при детальном рассмотрении (в том числе при больших увеличениях на мониторе) видно, что границы зерен с контрастно отличающимся цветотонem (плотностью), постепенные, не резкие.

Для упрощения расшифровки томограмм два образца снимались одновременно. Кроме того, к ним был прикреплен кусочек алюминия, выступающий в качестве маркера плотности ($2,7 \text{ г/см}^3$). При обработке данных в программном пакете AvizoFire 7.1 в обоих образцах были выделены участки (плотностные фракции), занятые материалом, плотность

которого больше, меньше и примерно равна плотности алюминия. Их объемные содержания вычислены (табл.).

Участки, плотность которых больше и меньше плотности алюминия, имеют неправильную форму, группируются или разобщены. Контуры их неровные, с заливами и выступами. Лишь в редких случаях выделения имеют очертания, похожие на кристалл. Можно только предполагать, учитывая минералого-петрографический состав песчаников, что участки малой плотности соответствуют плагиоклазам, высокой — пироксенам, средней (равной плотности алюминия) — областям развития вторичных минералов, обломков вулканических пород и др.

Для проверки расчета содержаний плотностных фракций методом РКТ в исследуемых образцах было определено содержание минералов легкой и тяжелой фракций путем разделения в бромформе (плотность $2,89 \text{ г/см}^3$) порошка с размером частиц $0,01\text{--}0,25 \text{ мм}$. Сравнение результатов показало, что они друг с другом не согласуются. В частности, содержание фракции тяжелее алюминия, учитывая разницу в единицах измерения (% объема и % массы), должно превышать содержание тяжелой фракции, полученной при разделении в бромформе, поскольку минералов с плотностью более $2,7 \text{ г/см}^3$ в образце больше, чем минералов с плотностью более $2,89 \text{ г/см}^3$. Причины выявленных несоответствий лишь предстоит выяснить. Вероятно, значение имеют погрешности обоих методов и отсутствие корреляции между плотностью и коэффициентом

Таблица

Содержания в образце плотностных фракций, выделенных по данным РКТ и при разделении порошка в бромформе

Обра- зец	Содержания в образце «плотностных фракций», выделенных по данным РКТ относительно алюминия (2,7 г/см ³), % объема			Содержания в образце фракций при разделении в бромформе (2,89 г/см ³), % массы	
	легче Al	близко к плотности Al	тяжелее Al	легкая фракция	тяжелая фракция
2	12,1	65,4	22,5	35,5	40,3
3	11,2	69,5	19,3	45,7	33,4

поглощения рентгеновского излучения каких-либо минералов, входящих в исследуемые образцы.

Приведенные примеры показывают, что РКТ может применяться при литологических исследованиях песчаников. Неоспоримым преимуществом данного метода является то, что образцы не разрушаются в процессе съемки, а это дает возможность дальнейшего применения других средств изучения. Кроме того, в отличие от оптической микроскопии, РКТ позволяет увидеть объемное строение образца, с большей точностью производить замеры объектов и вычислять содержания компонентов. Погрешность измерений и детальность наблюдений зависят от параметров исследуемого образца (размер, состав, форма). Причины установленных несоответствий результатов двух методов (РКТ и разделение в бромформе) могут быть выявлены при дальнейших исследованиях, что позволит усовершенствовать методику РКТ-съемки и расшифровки томограмм.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект № 14-05-31271).

Литература:

Ескин А.А. Морфолого-генетические типы структур пустотного пространства карбонатных пород и факторы

их формирования (на примере восточного борта Мелекесской впадины и западного склона Южно-Татарского свода): Автореф. дис... канд. геол.-мин. наук / КФУ. – Казань, 2014. – 25 с.

Журавлев А.В. Возможности использования компьютерной микротомографии для изучения конодонтовых элементов // Литосфера. – 2013. – № 2. – С. 163–166.

Пономаренко Е.С., Стаценко Е.О., Уразаева М.Н. Гидрозойная интерпретация Palaeoplesina (проблематика) на основе строения системы каналов // Палеонтологический журнал. – 2014. – № 2. – С. 20–25.

Фазлиахметов А.М., Стаценко Е.О., Храмченков Э.М. О применении рентгеновской компьютерной томографии при изучении конодонтов // Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий: Матер. II Всерос. молодежной геол. конф. – Уфа: ДизайнПресс, 2014. – С. 174–177.

Шванов В.Н., Фролов В.Т., Сергеева Э.И., Драгунов В.И., Патрунов Д.К., Кузнецов В.Г., Беленицкая Г.А., Куриленко В.В., Петровский А.Д., Кондитеров В.Н., Баженова Т.К., Жданов В.В., Щербаков Ф.А., Щербакова М.Н., Мизенс Г.А., Цейслер В.М., Трифионов Б.А., Верба Ю.Л., Ильин К.К. Систематика и классификация осадочных пород и их аналогов. – СПб.: Недра, 1998. – 352 с.

Якушина О.А. Методика и технология изучения природного и техногенного минерального сырья методом рентгеновской томографии: Автореф. дис... д-ра техн. наук / Гос. университет «Дубна». – Дубна, 2012. – 50 с.

Сведения об авторах:

Фазлиахметов Александр Маратович, Институт геологии Уфимского научного центра РАН (ИГ УНЦ РАН), г. Уфа. E-mail: famrb@mail.ru.

Стаценко Евгений Олегович, Институт геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань. E-mail: e.statsenko@yahoo.com.

Храмченков Эдуард Максимович, Институт геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань. E-mail: ekhramch@gmail.com.

**ON THE APPLICATION OF X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY
IN THE STUDY OF SANDSTONES**

A. M. Fazliakhmetov, E. O. Statsenko, E. M. Khramchenkov

Fazliakhmetov Alexander Maratovich, Institution of Russian Academy of Sciences Institute of geology of the Ufimian scientific centre (IRAS IG USC RAS), Ufa, Russia. E-mail: famrb@mail.ru.

Statsenko Evgeny Olegovich, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation. E-mail: e.statsenko@yahoo.com.

Khramchenkov Eduard Maximovich, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation. E-mail: ekhramch@gmail.com.

Annotation. Three sandstone samples were studied by X-ray computed tomography. Sample 1 is a medium-grained quartz sandstone with laminae enriched by hematite grains. On tomograms quartz grains are not visible. Hematite and micaceous microquartzite grains are clearly identified, their shape, distribution and content can be determined. Sample 2 is selected from the bottom of volcaniclastic turbidite (very coarse-grained sandstone), a sample 3 — from its top (coarse-grained sandstone). Multicomponent composition of sandstones (crystals of plagioclase, pyroxene, rock fragments, chlorite, prehnite, and others) makes it impossible to accurately identify minerals and rock fragments at tomograms. In this regard, recording was performed on two samples simultaneously. During shooting, the samples were attached to a piece of aluminum, as a density marker. As a result of processing of the obtained data, it became possible to calculate volume contents of fraction lighter than aluminum (plagioclase crystals), equal to the density of aluminum (rock fragments, remodified crystals of pyroxene and plagioclase) and heavier than aluminum (pyroxene crystals). On these examples, it is shown how X-ray computed tomography can be used in the study of sandstones.

Keywords: X-ray computed tomography, sandstones, method, mineral composition, the South Urals.