

ШКАЛА КонтРАСТНОСТИ МИНЕРАЛОВ ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ ТОМОГРАФИИ ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

А.А. Калоян, Е.С. Коваленко, А.В. Пахневич*, К.М. Подурец

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия*

**Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, 117647, Москва, ул. Профсоюзная, д. 123, Россия*

Рассматривается нейтронная томография как альтернатива рентгеновской томографии при исследовании палеонтологических и геологических объектов. На экспериментальном материале построена шкала контрастности минералов и горных пород, в том числе встречающихся в палеонтологических объектах, для нейтронной томографии. Приводятся примеры применения нейтронной томографии геологических объектов, обсуждаются сравнительные возможности методов.

Томография, нейтроны, рентгеновские лучи.

THE CONTRAST SCALE OF MINERALS FOR NEUTRON TOMOGRAPHY OF PALEONTOLOGIC AND GEOLOGIC OBJECTS

A.A. Kaloyan, E.S. Kovalenko, A.V. Pakhnevich, and K.M. Podurets

Neutron tomography is considered as an alternative to X-ray tomography in the study of paleontologic and geologic objects. Based on experimental data, a contrast scale of minerals and rocks, including those present in paleontologic objects, has been constructed for neutron tomography. Examples of application of neutron tomography of geologic objects are given, and the potentialities of the above methods are compared.

Tomography, neutrons, X-rays

ВВЕДЕНИЕ

Томографическое исследование дает информацию о внутреннем строении объекта, взаимном расположении его деталей и используется во многих областях исследований. Основой томографии является измерение двумерных картин пропускания проникающего излучения исследуемым объектом с последующим математическим восстановлением трехмерного изображения объекта. В качестве проникающего излучения наиболее распространено применение рентгеновских лучей, генерируемых на лабораторных или синхротронных источниках, однако в последнее время на нейтронных источниках в крупных исследовательских центрах во всем мире создаются нейтронные томографы [Lehmann, Ridikas, 2015]. Основой отличия рентгеновской и нейтронной томографии является разный механизм взаимодействия излучения с веществом, в результате чего вещества, неразличимые для рентгеновского излучения, могут быть различимы для нейтронов.

Одной из областей науки, где применяется томография, является палеонтология, в интересах которой выполнено большое количество рентгеновских и синхротронных томографических исследований уникальных объектов [Ketcham, Carlson, 2001; Pakhnevich, 2010]. Особенностью палеонтологических объектов является то, что в них исходные биологические ткани были замещены на минеральные компоненты, которые могут различаться в пределах одного объекта. Если объект состоит из компонентов, одинаково ослабляющих рентгеновские лучи, то возможность получения информации о его строении с помощью рентгеновской томографии ограничена. Эта проблема может быть решена с помощью нейтронной томографии. На нейтронах с палеонтологическими объектами проводились немногочисленные, в основном демонстрационные, эксперименты [Schwarz et al., 2005]. Нейтронная томография применялась для исследования водородсодержащих объектов [Carlson, 2006; Vlassenbroeck et al., 2007], в том числе для поиска органического вещества в фоссилизированных остатках флоры и фауны [Cunningham et al., 2014; Dawson et al., 2014]. Совместное использование рентгеновского, синхротронного излучения и нейтронов является взаимодополняющим и дает новую информацию о строении палеонтологических объектов [Winkler, 2006; Hess et al., 2011; Martins et al., 2011; Калоян и др., 2014].

Для прогнозирования результатов рентгеновского томографического исследования в работах [Пахневич, 2011, 2013] на лабораторном источнике было проведено сравнение контраста между различными минералами и горными породами и построена шкала рентгеновской контрастности. Целью данной работы является построение шкалы контрастности для томографии на тепловых нейтронах. Сравнение рентгеновской и нейтронной шкал позволит продемонстрировать особенности применения нейтронов для томографии палеонтологических и геологических объектов и выбрать оптимальный метод исследования в зависимости от состава объекта.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Для построения шкалы контрастности в нейтронной томографии были использованы 47 образцов различных минералов и горных пород (табл. 1). Для исследования в основном брались минералы и горные породы, встречающиеся либо в окаменелостях, либо в окружающих их породах. Кроме того, исследовались некоторые объекты, дополняющие картину по своему химическому составу. Образцы имели естественную форму с характерным размером по длине, ширине и высоте около 1 см. Для демонстрации различий результатов синхротронной и нейтронной томографии использовались образцы кристалла граната в слюдяном сланце (пос. Китяля, Карелия) и фрагмента обугленной ископаемой древесины (Урал).

Эксперименты проводили на нейтронном томографе [Глазков и др., 2014], установленном на исследовательском реакторе ИР-8 в пучке нейтронов, монохроматизированном отражением от монокристалла Cu (111) на длине волны $\lambda = 1.56 \text{ \AA}$, доля нейтронов высших порядков составляла около 20%. Результаты рентгеновской томографии для табл. 2 брались из работ [Пахневич, 2011, 2013], недостающие образцы, для сохранения условий съемки, исследовались на том же лабораторном микротомографе Skyscan 1172 (ПИН РАН) при $U = 100 \text{ кВ}$ и с фильтром Al 1 мм. Рентгеновская томография для демонстрации различий результатов для разных видов излучения выполнена на Курчатовском источнике синхротронного излучения на поворотном магните и с фильтром Cu 1.5 мм. Восстановление виртуальных томографических срезов по проекциям выполнялись методом свертки и обратного проецирования [Herman, 1980].

Для каждого образца в паре с образцом кальцита на нейтронах проводилась съемка 360 проекций в диапазоне 180° и восстановление трехмерного изображения объекта. Трехмерный массив представляет собой распределение величины, пропорциональной линейному коэффициенту ослабления, в объекте. Выбирался один виртуальный срез, на котором видны оба образца. По этому срезу вычислялась контрастность данного образца как отношение его экспериментального линейного коэффициента ослабления к таковому для кальцита. Диапазон полученных значений (0.2—30) был по логарифмическому закону разбит на группы. Число групп выбирали, во-первых, по аналогии с ранее полученной рентгеновской шкалой, во-вторых, оно основывалось на визуальной оценке результатов и, в-третьих, с учетом отсутствия в составе исследованных образцов веществ, сильно поглощающих нейтроны (таким, например, является весьма редкий минерал гринокит CdS). Таким образом, изученные образцы были разбиты на 9 групп контрастности, а 10-я группа оставлена для сильнопоглощающих веществ.

С использованием опубликованных данных [Флейшер, 1990] и значений нейтронных сечений [Sears, 1992] были рассчитаны линейные коэффициенты ослабления нейтронов в исследованных образцах, их значения также отнесены к коэффициенту ослабления кальцита и разбиты на группы аналогично экспериментальным значениям.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Шкала контрастности минералов и горных пород представлена в табл. 2, где образцы распределены по группам контрастности в соответствии с экспериментальными данными, а для каждого образца в скобках дана его расчетная группа. Минералы и горные породы, помещенные в одну группу, визуально неразличимы на изображениях, получаемых в нейтронной томографии. Минералы и горные породы, помещенные в разные группы, различимы между собой. Экспериментальная и расчетная шкалы в основном соответствуют друг другу, но имеются и несовпадения в положении некоторых объектов в экспериментальной и расчетной шкалах.

В табл. 3 приведена рентгеновская шкала контрастности [Пахневич, 2013], в которой для каждого минерала в скобках добавлена его контрастность по экспериментальной нейтронной шкале. Сопоставление данных из этих таблиц показывает, что для любой пары исследованных минералов и горных пород возможны четыре случая: 1) пара может быть различима только в рентгеновских лучах, 2) пара может быть различима только в нейтронах, 3) пара может быть различима в обоих типах излучения, 4) пара не может быть различима в этих типах проникающего излучения. Примеры изображений минералов и пород для каждого из четырех случаев представлены на рис. 1. Некоторые минералы одинаково

Таблица 1.

**Минералы и горные породы, использованные для построения шкалы.
Состав дается по [Флейшер, 1990]**

№ п/п	Название	Хим. формула	Месторождение
1	Авгит	$(Ca,Na)(Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Al, Ti)(Si, Al)_2O_6$	Месторождение Вичи гора, Чехия
2	Аквамарин	$Be_3Al_2Si_6O_{18}$	г. Шерловая, Читинская обл.
3	Амазонит	$KAlSi_3O_8$	Ильменские горы, Урал
4	Апатит	*	Слюдянка, Прибайкалье
5	Арагонит	$CaCO_3$ (ромб.)	Шах-Тау, Стерлитамак
6	Арфведсонит	$Na_3(Fe^{2+}, Mg)_4 Fe^{3+} Si_8 O_{22}(OH)_2$	р. Тульок, Хибины, Мурманская область
7	Барит	$BaSO_4$	Белореченское месторождение, Северный Кавказ
8	Биотит	$K(Mg, Fe^{2+})_3(Al, Fe^{3+})Si_3O_{10}(OH, F)_2$	Кандалакшский р-н, Мурманская обл.
9	Вивианит	$Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$	Керчь, п-ов Крым
10	Галенит	PbS	Забайкалье
11	Галит	$NaCl$ (с примесью Rb)	Соликамское месторождение, Пермская обл.
12	Гематит	$\alpha-Fe_2O_3$	Марокко
13	Гетит	$\alpha-Fe^{3+}O(OH)$	Вранчице, Чехия
14	Гипс	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Ульяновск
15	Глина	*	Кандалакшский район, Мурманская область, берег Белого моря, ББС МГУ
16	Доломит	$CaMg(CO_3)_2$	Белореченское месторождение, Северный Кавказ
17	Кальцит	$CaCO_3$ (гекс.)	Тура, Сибирь
18	Кварц	SiO_2	Предуралье, пик Пирамида
19	Касситерит	SnO_2	Мерекское месторождение, Хабаровский край
20	Корунд	Al_2O_3	Карелия
21	Лабрадорит	*	Мадагаскар
22	Лимонит	*	Ливийская пустыня, Египет
23	Магнезит	$MgCO_3$	Дальний Восток
24	Малахит	$Cu_2(CO_3)(OH)_2$	Южный Урал
25	Мусковит	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH, F)_2$	Вороньи тундры, Мурманская обл.
26	Оливин	$Fe_2SiO_4 - Mg_2SiO_4$	Месторождение Гил-Гит, Пакистан
27	Опал	$SiO_2 \cdot nH_2O$	Вознесенское, Казахстан
28	Ортоклаз	$KAlSi_3O_8$	Кандалакшский р-н, Мурманская обл.
29	Пирит	FeS_2	Гуйчжоу, Китай
30	Пирролюзит	MnO_2	Месторождение Ушкатын-4, Казахстан
31	Родохрозит	$MnCO_3$	Капильитас, Аргентина
32	Рутил	TiO_2	Наманган, Азербайджан
33	Сера самородная	S	Водинское месторождение, Среднее Поволжье
34	Сидерит	$FeCO_3$	Николаевское месторождение, Дальнегорский рудный район
35	Смитсонит	$ZnCO_3$ (тригон.)	Месторождение Чихуахуа, Мексика
36	Сподумен	$LiAlSi_2O_6$	Афганистан
37	Стильбит	$NaCa_2Al_5Si_{13}O_{36} \cdot 14H_2O$	Пуна, Индия
38	Стронцианит	$SrCO_3$	Подолия, Украина
39	Сфалерит	$(Zn, Fe)S$	Забайкалье
40	Тодорокит	$(Mn^{2+}, Ca, Mg)Mn^{4+}_3O_7 \cdot H_2O$	Керчь, п-ов Крым
41	Фенакит	Be_2SiO_4	Рудник Малышева, г. Асбест, Урал
42	Флюорит	CaF_2	Шанжао, Китай
43	Фосфорит	*	Морена, Талдомский р-н, Московская обл.
44	Хризоберилл	$BeAl_2O_4$	Рудник Малышева, г. Асбест, Урал
45	Целестин	$SrSO_4$	Бийнеу-Кыр, Туркменистан
46	Церуссит	$PbCO_3$	Цумеб, Намибия
47	Янтарь	*	Калининградская обл.

* Для горных пород и минералов с переменным химическим составом химическая формула не приводится.

Таблица 2. Шкала контрастности минералов и горных пород в нейтронной томографии, в скобках указаны расчетные группы контрастности

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сера (3)	Аквамарин (2)	Арагонит (2)	Биотит (*)	Авгит (*)	Гипс (9)	Галит (8)	Гетит (9)	Лимонит (*)
	Амазонит (3)	Барит (3)	Вивинит (10)	Смитсонит (4)	Гематит (5)	Малахит (9)		Пирролюзит (7)
	Апатит (*)	Доломит (2)	Глина (*)			Янтарь (*)		Стильбит (9)
	Арфведсонит (7)	Корунд (2)	Мусковит (3)					Тодорокит
	Галенит (2)	Магнезит (2)	Родохрозит (6)					(10)
	Кальцит (2)	Опал (9, $n = 1$)	Рутил (6)					
	Касситерит (3)	Сподумен (8)	Сидерит (5)					
	Кварц (2)	Сфалерит (4)	Фосфорит (*)					
	Лабрадорит (*)	Хризоберилл (2)						
	Оливин (2)	Церуссит (10)						
	Ортоклаз (3)							
	Пирит (5)							
	Стронцианит (3)							
	Флюорит (2)							
	Фенакит (2)							
	Целестин (4)							

* Расчет не проводился из-за большой неопределенности состава.

Таблица 3. Экспериментальная шкала контрастности минералов и горных пород в рентгеновской томографии

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Янтарь (7)	Магнезит (3)	Фенакит (2)	Аквамарин (2)	Амазонит (2)	Арагонит (3)	Авгит (6)	Апатит (2)	Арфведсонит (2)	Барит (3)
		Цеоцит-стильбит (9)	Глина (4)	Гипс (6)	Галит (7)		Флюорит (2)	Биотит (4)	Галенит (2)
			Кварц (2)	Корунд (3)	Доломит (3)		Флюорит (2)	Вивинит (4)	Гематит (6)
			Опал (3)	Лабрадор	Кальцит (2)				Гетит (8)
			Сподумен (3)	Мусковит (4)	Оливин (2)				Касситерит (2)
				Ортоклаз (2)	Оливин (2)				Лимонит (9)
				Хризоберилл (3)	Сера (1)				Малахит (7)
					Фосфорит (4)				Марказит
									Пирит (2)
									Пирролюзит (9)
									Родохрозит (4)
									Рутил (4)
									Сидерит (4)
									Смитсонит (5)
									Стронцианит (2)
									Сфалерит (3)
									Тодорокит (9)
						Целестин (2)			
						Церуссит (3)			

Примечание. В скобках указаны нейтронные группы контрастности.

неконтрастны между собой по рентгеновской и нейтронной экспериментальным шкалам (см. табл. 3), например, сочетания арагонит—доломит, аквамарин—кварц, лимонит—пирролюзит—тодорокит и др. Важно, что арагонит и доломит часто встречаются вместе в карбонатных осадочных породах, это минеральное сочетание имеет большое значение для палеонтологических объектов. Выявление компонентов в подобных парах является сложной задачей как для нейтронной, так и для рентгеновской томографии.

Следует отметить, что в соответствии с расчетами (табл. 2) все минералы, содержащие водород, являются наиболее контрастными по сравнению с остальными (группы 7—9), но их экспериментальные группы контрастности зачастую ниже расчетных (так, арфведсонит экспериментально находится во второй группе, а расчетно – в седьмой). Это может быть связано, например, с частичным замещением ОН-группы на другие анионы.

Аналогично можно сказать о Li (сподумен), который также не дал ожидаемой контрастности. Такие различия могут быть связаны с тем, что геологические материалы практически не встречаются в чистом виде, а всегда с наличием примесей.

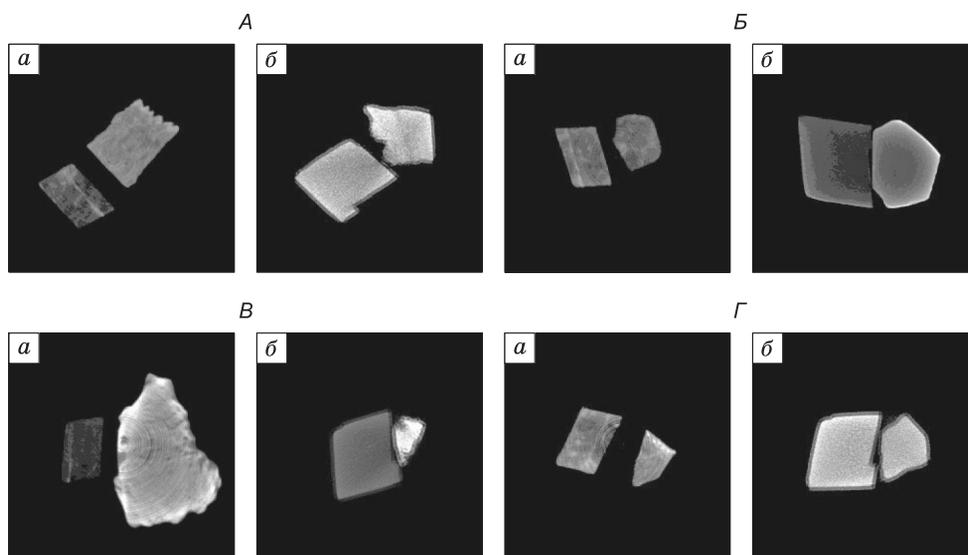


Рис. 1. Томографические срезы пар образцов:

А — кальцит и доломит, контрастные в нейтронах (*а*), но не контрастные в рентгеновских лучах (*б*); *Б* — кальцит и пирит, не контрастные в нейтронах (*а*), но контрастные в рентгеновских лучах (*б*); *В* — кальцит и гетит, контрастные в обоих случаях: *а* — нейтроны, *б* — рентгеновские лучи; *Г* — кальцит и оливин не контрастные в обоих случаях: *а* — нейтроны, *б* — рентгеновские лучи. На всех срезах эталонный минерал кальцит размещен в левой части изображения.

Применительно к палеонтологическим объектам наиболее важен относительный контраст минералов и пород, которые либо присутствуют в них в качестве исходных составляющих, либо возникают в процессе fossilization. В табл. 4 для некоторых из них в качестве характеристики контрастности приведены разности номеров нейтронной (выше диагонали) и рентгеновской (ниже диагонали) групп контрастности по табл. 2, 3. На основе полученных данных можно увидеть, какой из методов диагностики является предпочтительным для получения контрастных изображений внутренней структуры объекта, состоящего из этих веществ. Так, пара пирит—гетит контрастна в нейтронах, но не контрастна в рентгеновских лучах, пара доломит—опал контрастна в рентгеновских лучах, но не контрастна в нейтронах.

Наиболее общими являются следующие критерии выбора: во-первых, если компоненты объекта содержат тяжелые элементы (медь, железо), то они не контрастны между собой в рентгеновском излучении из-за сильного ослабления, и различить такие компоненты можно с помощью нейтронов, во-вторых, если некоторые из слабопоглощающих рентгеновское излучение компонентов содержат водород (например, кристаллизационную воду, гидроксильную группу), то различить такие компоненты можно с помощью нейтронов. Важно учитывать наличие в составе исследуемых объектов таких элементов, как Li, Cl, Mn, имеющих сравнительно высокое сечение ослабления нейтронов.

Для иллюстрации различия томографических изображений одних и тех же объектов в разных типах излучения приведены примеры изображений геологического и палеонтологического объектов,

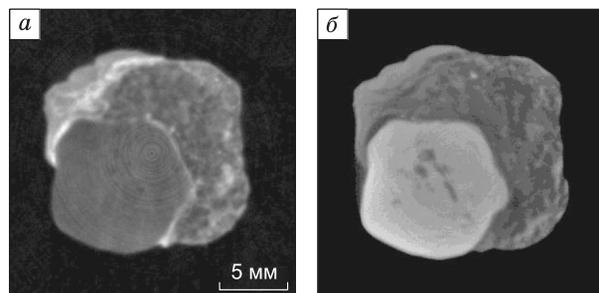


Рис. 2. Кристалл граната в слюдяном сланце — нейтроны (*а*) и синхротронное излучение (*б*).

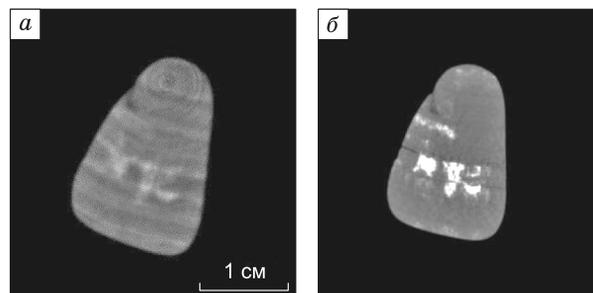


Рис. 3. Томографические срезы фрагмента обугленной ископаемой древесины, полученные с помощью нейтронов (*а*) и синхротронного излучения (*б*).

Таблица 4.

**Сравнительная контрастность пар минералов и горных пород на нейтронах
(справа от диагонали) и на рентгеновских лучах (слева от диагонали)**

Р \ Н	Апатит	Гетит	Глина	Доломит	Кальцит	Кварц	Опал	Пирит	Фосфорит
Апатит		6	2	1	0	0	1	0	2
Гетит	2		4	5	6	6	5	6	4
Глина	4	6		1	2	2	1	2	0
Доломит	2	4	2		1	1	0	1	1
Кальцит	2	4	2	0		0	1	0	2
Кварц	4	6	0	2	2		1	0	2
Опал	4	6	0	2	2	0		1	1
Пирит	2	0	6	4	4	6	6		2
Фосфорит	2	4	2	0	0	2	2	4	

полученные с помощью нейтронной и рентгеновской томографии. На нейтронном изображении граната в слюдяном сланце (рис. 2) между ними видна прослойка, образовавшаяся в процессе роста кристалла граната за счет сегрегации примесей. Эта прослойка в рентгеновских лучах не видна. На томографических срезах фрагмента обугленной ископаемой древесины (рис. 3), полученных с помощью нейтронов и синхротронного излучения, видны разные детали строения объекта. На нейтронном изображении отчетливо видны годовые кольца древесины, на рентгеновском – более контрастны включения.

Таким образом, зная фазовый состав объекта, на основе нейтронной и рентгеновской шкал контрастности можно выбрать метод томографии, наилучший для его изучения. Для двухфазных объектов выбор, как правило, однозначен, для многофазных возможны случаи, когда для контрастирования разных компонентов объекта требуются разные типы излучения, и тогда результаты нейтронной и рентгеновской томографии являются взаимодополняющими.

В случае, когда компоненты объекта не контрастны ни в нейтронах, ни в рентгеновских лучах, возможно использование методов, основанных на изменении различных вкладов в полное сечение за счет их энергетической зависимости (края поглощения в рентгеновских лучах [Elleaume et al., 2002], брэгговских скачков и резонансов в нейтронах [Shilstein, 1992]). Также возможно применение других видов контраста: фазового, рефракционного или малоуглового [Podurets et al., 1994], деполяризационного [Подурец и др., 1994], а также дифракционных эффектов [Ludwig et al., 2007].

ВЫВОДЫ

В настоящей работе с помощью метода нейтронной томографии по 47 образцам построена экспериментальная шкала нейтронной контрастности минералов и горных пород. Эта шкала в совокупности с ранее полученной рентгеновской позволяет планировать проведение томографических исследований палеонтологических и геологических объектов с точки зрения выбора оптимального типа излучения (рентгеновского излучения и нейтронов) либо их комбинации с целью получения наиболее полной информации об их внутреннем строении. Продемонстрировано неполное соответствие расчетов контрастности с реальной картиной, которая возникает при использовании природных образцов. Шкала применима для всех установок, использующих тепловые нейтроны, независимо от метода их генерации.

Авторы благодарят В.А. Соменкова за ценные обсуждения. В работе использовалось оборудование уникальных научных установок «Исследовательский реактор ИР-8» и «Курчатовский источник синхротронного излучения», финансируемых Министерством образования и науки РФ (идентификатор проекта RFMEFI61914X0002), также работа поддержана грантами РФФИ № 14-22-01001 офи-м и № 16-04-00758-а.

ЛИТЕРАТУРА

Калоян А.А., Коваленко Е.С., Пахневич А.В., Подурец К.М., Рожнов С.В., Соменков В.А. Синхротронная и нейтронная томография для исследования палеонтологических объектов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014, № 11, с. 5—11.

Глазков В.П., Калоян А.А., Коваленко Е.С., Подурец К.М., Соменков В.А., Яковенко Е.В. Нейтронный томограф на реакторе ИР-8 НИЦ КИ // Приборы и техника эксперимента, 2014, № 5, с. 18—21.

Пахневич А.В. Шкала контрастности минералов и горных пород для рентгеновской микротомографии // *Материалы Международного минералогического семинара «Минералогические перспективы-2011»*. Сыктывкар, 2011, с. 124—125.

Пахневич А.В. Шкала контрастности для рентгеновской микротомографии // *Современная минералогия. Сборник трудов I Международной интернет-конференции*. Казань, 5 февраля 2013. Казань, Изд-во «Казанский университет», 2013, с. 27—33.

Подурец К.М., Петренко А.В., Соменков В.А., Шильштейн С.Ш. Нейтронная радиография с деполяризационным контрастом // *Журнал технической физики*, 1994, т. 64, вып. 9, с. 200—202.

Флейшер М. Словарь минеральных видов. М., Мир, 1990, 206 с.

Carlson W.D. Three-dimensional imaging of earth and planetary materials // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, v. 249, p. 133—147.

Cunningham J.A., Rahman I.A., Lautenschlager S., Rayfield E.J., Donoghue P.C.J. A virtual world of paleontology // *Trends Ecol. Evol.*, 2014, v. 29, № 6, p. 347—357.

Dawson M., Frsnic J., Carpenter R. New views of plant fossils from Antarctica: a comparison of X-ray and neutron imaging techniques // *J. Paleontol.*, 2014, v. 88, № 4, p. 702—707.

Elleau H., Charvet A.M., Corde S., Esteve F., Le Bas J.F. Performance of computed tomography for contrast agent concentration measurements with monochromatic X-ray beams: comparison of K-edge versus temporal subtraction // *Phys. Medic. Biol.* 2002, v. 47, p. 3369—3385.

Herman G.T. Fundamentals of computerized tomography: image reconstruction from projections. New York-London, Academic Press, 1980, 316 p.

Hess K.-U., Flaws A., Mühlbauer M.J., Schillinger B., Franz A., Schulz M., Calzada E., Dingwell D.B., Bente K. Advances in high-resolution neutron computed tomography: Adapted to the earth sciences // *Geosphere*, 2011, v. 7, № 6, p. 1294—1302.

Ketcham R.A., Carlson W.D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences // *Comput. Geosci.*, 2001, v. 27, № 4, p. 381—400.

Lehmann E.H., Ridikas D. Status of neutron imaging — activities in a worldwide context // *Phys. Proc.*, 2015, v. 69, p. 10—17.

Ludwig W., Lauridsen E.M., Schmidt S., Poulsen H.F., Baruchel J. High-resolution three-dimensional mapping of individual grains in polycrystals by topotomography // *J. Appl. Crystallogr.*, 2007, v. 40, p. 905—911.

Martins R.M.S., Beckmann F., Castanhinha R., Mateus O., Pranzas P.K. Dinosaur and crocodile fossils from the Mesozoic of Portugal: neutron tomography and synchrotron radiation-based micro-computed tomography // *MRS Proc.*, 2011, v. 1319, № 1, mrsf10-1319-ww02.

Pakhnevich A.V. Study of fossil and recent brachiopods, using a skyscan 1172 X-ray microtomograph // *Paleontol. J.*, 2010, v. 44, p. 1217—1230.

Podurets K.M., Somenkov V.A., Shilstein S.S. Neutron radiography with high angular resolution: new types of contrast and possible applications // *Proceedings of the 4th World conference on neutron radiography, San Francisco, California, USA, May 10-16, 1992 / Ed. J.P. Barton, Switzerland, Yverdon: Gordon and Breach Science Publishers, 1994, 817 p.*

Sears V.F. Neutron scattering lengths and cross sections // *Neutron News*, 1992, v. 3, № 3, p. 29—37.

Schwarz D., Vontobel P., Lehmann E.H., Meyer C.A., Bongartz G. Neutron tomography of internal structures of vertebrate remains: A comparison with X-ray computed tomography // *Palaeontol. Electr.*, 2005, v. 8, № 2, 30A, http://palaeo-electronica.org/2005_2/neutron/neutron.pdf

Shilstein S.Sh. Contrast enhancement methods in neutron radiography // *Industrial and Technological Applications of Neutrons. Proceedings of the International School of Physics «Enrico Fermi»*. Lerici, Italia, June 19—29, 1990. North Holland, 1992, p. 456—485.

Vlassenbroeck J., Cnudde V., Masschaele B., Dierick M., Van Hoorebeke L., Jacobs P., Pieters K. A comparative and critical study of X-ray CT and neutron CT as non-destructive material evaluation techniques // *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 2007, v. 271, p. 277—285.

Winkler B. Applications of neutron radiography and neutron tomography // *Rev. Miner. Geochem.*, 2006, v. 63, p. 459—471.