

УДК 553.87:549.08:622.276.5

ТИПОМОРФНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КВАРЦА**¹Песков А.В., ¹Алекина Е.В., ²Тарасова Е.Ю.**¹*Самарский государственный технический университет, Самара, e-mail: pesko-aleksandr@ya.ru;*²*Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара*

Приведены результаты расчетов размеров областей когерентного рассеяния и величин микроискажений методом аппроксимации для образцов кварца разного генезиса. Представлено сравнение экспрессного метода по полуширине профилей, аппроксимированных функциями Коши или Гаусса, Фойгта и анализа формы профиля дифракционных линий с учетом асимметрии аппаратных искажений и физического профиля. Исследования проводились на образцах халцедона, волжского агата, яшмы, коричневого кварца, кварцевого песка, кварца песчаников пород коллекторов из керна, которые были отобраны в Самарской области. Также использовался жильный кварц в качестве эталона. Обоснован выбор аналитических линий исследуемого минерала и эталона. Экспрессная рентген-дифракционная методика определения параметров микроструктуры кварца при аппроксимации функцией Фойгта апробирована с учетом ограничений в условиях работы аппаратуры с заданной экспрессностью и точностью. Проведено сопоставление полученных результатов: размеров областей когерентного рассеяния и индекса кристалличности по изученным образцам кварца. Приводятся некоторые достоинства и недостатки использования применяемых методов. Полученные параметры микроструктуры: размеры областей когерентного рассеяния и величины микроискажений кварца возможно приводить в качестве дополнительной характеристики при определении состава терригенных пород. С использованием структурных типоморфных особенностей возможно дифференцировать однотипные кварцевые песчаники.

Ключевые слова: область когерентного рассеяния, микроискажения, профиль дифракционной линии, рентгеновский метод аппроксимации, кварц, халцедон, физические и экспериментальные уширения, генезис, керн

TIPOMORFNY FEATURES OF QUARTZ**¹Peskov A.V., ¹Alekina E.V., ²Tarasova E.Yu.**¹*Samara State Technical University, Samara, e-mail: pesko-aleksandr@ya.ru;*²*Samara branch of The Lebedev physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara*

Calculation data are herein described for coherent-scattering region sizes and micro-distortion values by the approximation method for quartz samples of different genesis. Comparison of two methods for micro-structure analysis is presented: rapid test method for half-width profiles approximated by the Cauchy or Gauss, Voigt functions, and diffraction line shape analysis taking into account the asymmetry of instrumental distortions and physical profile. The researches were carried out on samples of chalcedony, Volga agate, jasper, brown quartz, quartz sand, sandstone rock quartz of core container rocks which were selected in the Samara Region with indication of their detailed location. Also gangue quartz was used as a reference. The choice of analytical lines for the mineral to be investigated and the reference was grounded. The rapid X-ray diffraction method to determine quartz micro-structure parameters at approximation by the Voigt function was tested taking into account the limitations in the instrument operation conditions with the set rapidness and accuracy. The obtained data were compared: the coherent-scattering regions and the crystallinity index from the studied quartz samples. Advantages and disadvantages of the rapid test method for half-width profiles approximated by the Cauchy or Gauss, Voigt functions, and diffraction line profile shape analysis taking into account the asymmetry of instrumental distortions and physical profile. The obtained micro-structure parameters: the coherent-scattering region sizes and the quartz micro-distortion value may be given as an additional characteristic in determining the particle size distribution of terrigenous rocks. Using structural typtomorphic features, it is possible to differentiate similar quartz sandstones.

Keywords: coherent-scattering region, micro-distortions, diffraction line profile, X-ray approximation method, quartz, chalcedony, physical and experimental broadening, genesis, core

Терригенные породы, являющиеся коллекторами нефти и газа, сложены песчаниками, основным компонентом которых является кварц. Однако реальные минералы могут обладать различным количеством изоморфных примесей, различием в габитусе и дефектности кристаллической структуры.

При построении литолого-петрофизической модели залежи используют основные коллекторские свойства пород: пористость и проницаемость, однако в построении фациальной модели пласта могут помочь и другие физические свойства.

Современные геологические трехмерные модели отложений учитывают фациальные условия формирования осадочных пород, исходя из данных ГИС и исследований керна скважин. Для определения количественного состава минералов и особенностей кристаллической структуры применяется рентгеноструктурный и электронномикроскопический анализы.

Типоморфные особенности кварца могут расчленять одинаковые по химическому составу пласты кварцевых песчаников, а извлеченная генетическая информация повы-

силь информативность фациальной модели залежи.

Концепция типоморфизма минералов была введена впервые А.Е. Ферсманом. Типоморфизм – это свойство минералов в процессе образования и последующего преобразования, то есть генезиса, обладать определенными типоморфными особенностями. Поэтому в минералах имеется генетическая информация, количество которой значительно в распространенных минералах, таких как кварц, кальцит, пирит и другие.

Различают типоморфизм минералов и типоморфные особенности минералов. Стадии минералообразования характеризуются типоморфными ассоциациями минералов. Типоморфные особенности минералов разделяются на химические, структурные и физические.

Химические особенности – это наличие изоморфных примесей, изотопный состав и другое. Структурные особенности минералов – это параметры элементарной ячейки, полиморфизм, дефективность структур: плотность дислокаций, характер вакансий и другие неоднородности. В настоящей работе проводилось изучение структурных типоморфных особенностей с применением рентгенографического анализа.

Физические свойства минералов зависят от несовершенств их строения – дефектов. Дефекты подразделяют на точечные, линейные и объемные. Микроискажения возникают в связи с точечными и линейными дефектами кристаллов. Области когерентного рассеяния – это области кристалла с периодическим расположением атомов разделенными друг от друга границами зерен и дислокационными стенками. Типоморфные особенности кварца изучали ряд исследователей в России [1–3].

Цель исследования: определить параметры тонкой кристаллической структуры

(размеры блоков о.к.р. и величин микроискажений) кварца различных генераций.

Материалы и методы исследования

Исследование микроструктуры, предполагающее определение размеров областей когерентного рассеяния и микроискажений, можно проводить с применением рентгеноструктурного анализа.

В работе сравниваются экспрессный рентгенодифракционный метод анализа при аппроксимации функциями Гаусса или Коши [4], Фойгта [5; 6] и анализ формы профиля дифракционных линий [7] с учетом асимметрии профилей.

В случае аппроксимирующих функций Гаусса $e^{-\alpha x}$ или Коши $1/(1 + \gamma x^2)$ по линиям 2 порядков отражения можно рассчитать размеры о.к.р. и величины микроискажений по зависимостям [4]. В экспрессном анализе используется функция Фойгта с интегральной шириной B , Коши B_K и гауссовой B_G составляющих. Значения B_K и B_G получают, применяя уравнение Лангфорда.

В ходе расчетов определяют физические уширения по Коши и Гауссу β_K и β_G , размер ОКР по Коши, Гауссу и общий D_K , D_G , D и величину микроискажений [6]. При расчете по функции Фойгта имеются ограничения:

$$1 \leq \frac{\beta_{K2} \cos \Theta_2}{\beta_{K1} \cos \Theta_1} \leq 4, \quad (1)$$

$$1 \leq \frac{\beta_{G2} \cos \Theta_2}{\beta_{G1} \cos \Theta_1} \leq 2.$$

При анализе профиля [7] дифракционная линия аппроксимируется асимметричной функцией псевдо-Фойгта – суммой функций Лоренца и Гаусса.

Расчет размеров блоков D по [7] при асимметрии пика с учетом полуширины для левой и правой частей линии проводится по зависимости:

$$D = 90\lambda K_k \left\{ \pi^3 \left[\frac{\eta_{Lh} w_{Lh}^2 + \eta_{Rh} w_{Rh}^2}{a(\eta_{Lh} w_{Lh} + \eta_{Rh} + b(w_{Lh} + w_{Rh}))} - \frac{\eta_{Lg} w_{Lg}^2 + \eta_{Rg} w_{Rg}^2}{a(\eta_{Lg} w_{Lg} + \eta_{Rg} w_{Rg}) + b(w_{Lg} + w_{Rg})} \right] \cos \Theta_0 \right\}^{-1}, \quad (2)$$

где η_R – доля функции Коши для правой доли линии;

η_L – доля функции Коши для левой доли линии;

w_{Lg} – полуширина левой доли для эталона;

w_{Rg} – полуширина правой доли для эталона;

w_{Rh} – полуширина правой доли для эксперимента;

w_{Lh} – полуширина левой доли для эксперимента;

K_k – коэффициент, характеризующий форму о.к.р.;

Θ – угол аналитической линии;

λ – длина волны излучения;

$a = \pi - (\pi/\ln 2)^{1/2}$, $b = (\pi/\ln)^{1/2}$.

Без учета асимметрии линии при $w_{Lg} = w_{Rg} = w_g$ и $w_{Rh} = w_{Lh} = w_h$ размер блоков вычисляется:

$$D = \frac{90\lambda K_k}{\pi^3 \left[\frac{\eta_h w_h}{a\eta_h + b} - \frac{\eta_g w_g}{a\eta_g + b} \right] \cos \Theta_0} \quad (3)$$

Исследования проводились на дифрактометре Thermo scientific ARL XtrA. Объектами исследований являлись образцы халцедона, яшмы, волжского агата, кварцевого песка, песчаника из керна нефтяных скважин, крупнозернистого образца кварца с коричневой окраской, отобранные в Самарской области.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим результаты определения параметров тонкой кристаллической структуры исследованных образцов.

Для образцов халцедона и яшмы по экспериментальным уширениям В и отношению измеренной на половине высоты уширения пика к экспериментальной ширине рассчитаны уширения гауссовой и Коши компонент (табл. 1). Определялось отношение физических уширений гауссовой компоненты для двух порядков отражений $\beta_{r2} \cos \Theta_2 / \beta_{r1} \cos \Theta_1$ и доля функции Коши η_k . Из приведенной таблицы видно, что экспериментальные уширения за счет функции Коши более значительны, чем уширения за счет функции Гаусса. Отношение $\beta_{r2} \cos \Theta_2 / \beta_{r1} \cos \Theta_1$ для халцедона, яшмы

и коричневого кварца больше допустимой величины 2, а для агата, породы, песка уширения для рефлекса 202 полностью связаны с функцией Коши, и расчет в связи с этим размера о.к.р. по функции Гаусса не имеет смысла. В связи с этим далее рассчитывался размер о.к.р. по уширениям доли Коши по зависимости 14. Отношение $\beta_{k2} \cos \Theta_2 / \beta_{k1} \cos \Theta_1$ для большинства образцов, исключая коричневый кварц, больше 1, что допускает проведение расчетов по соответствующим зависимостям.

Для халцедона размер о.к.р. по зависимости [4] при аппроксимации по Коши составил $D = 155,4$ нм, а при аппроксимации по Гауссу $D = 144,4$ нм (табл. 2). По зависимости [6] с учетом уширения гауссовой и Коши компонент $D = 127,8$ нм. По зависимостям псевдо-Фойгта [7], при использовании для расчета пика 101, значение о.к.р. составило 19,8 нм, а по пику 202 значение незначительно отличается и равно $D = 18,5$ нм. Для образца яшмы по зависимостям [4] получены близкие по значению размеры о.к.р. $D = 169,8$ нм при аппроксимации по Коши. При аппроксимации по Гауссу получен размер о.к.р. $D = 112,1$ нм, а согласно зависимости [6] с учетом уширения гауссовой и Коши компонент $D = 103,2$ нм. По зависимостям [7] по пику 101 $D = 17,5$ нм, а по пику 202 $D = 12,8$ нм. Полученные значения при расчете по зависимостям российских ученых отличаются от значений, полученных по выражениям зарубежных исследователей.

Таблица 1

Экспериментальные уширения компоненты Гаусса V_g , компоненты Коши V_k , отношение физических уширений по Гауссу и Коши, доля компоненты Коши η_k образцов минералов для отражений 101 и 202

	hkl	V_g	V_k	$\beta_{r2} \cos \Theta_2 / \beta_{r1} \cos \Theta_1$	$\beta_{k2} \cos \Theta_2 / \beta_{k1} \cos \Theta_1$	η_k
Халцедон	101	0,070	0,129	2,62	1,02	0,83
	202	0,153	0,189			0,93
Яшма	101	0,078	0,149	2,25	1,09	0,76
	202	0,161	0,219			0,75
Порода Флер. № 2	101	0,050	0,056	-	1,36	0,7
	202	0,030	0,108			0,996
Порода Флер. № 6	101	0,047	0,073	-	1,58	0,65
	202	0,000	0,135			1
Агат	101	0,065	0,183	-	1,07	0,85
	202	0,000	0,265			1
Коричневый кварц	101	0,055	0,085	2,3	0,29	0,77
	202	0,070	0,107			0,77
Песок	101	0,039	0,074	-	2,75	0,75
	202	0,000	0,185			1

Таблица 2

Физические уширения кварца β , физические уширения компоненты Коши β_k , экспериментальные уширения анализируемой линии и эталона – wh , wg , размер о.к.р. D и микроискажений ε рефлексов 101 (1 пик), 202 (2 пик) кварца для образцов халцедон и яшма

Расчет по зависимости	hkl	Параметр	Халцедон	Яшма
	101	β_{k1} , рад.	0,001276	0,001617
	202	β_{k2} , рад.	0,001515	0,002036
	101	β_1 , рад.	0,001139	0,001837
	202	β_2 , рад.	0,001375	0,002993
	101	wh_1 , град.	0,156	0,196
	202	wg_1 , град.	0,091	0,091
	101	wh_2 , град.	0,199	0,292
	202	wg_2 , град.	0,120	0,12
По Коши [4]	ε		0,000127439	0,00096
	D , нм		155,4	169,8
По Гауссу [4]	ε		0,00033	1,25E-03
	D , нм		144,4	112,0
По Фойгту [6]	ε		2,66621E-05	5,95E-05
	D		127,8	103,2
[7]	$D_1(hkl = 101)$, нм		19,8	17,5
	$D_2(hkl = 202)$, нм		18,5	12,8

Таблица 3

Рентгеновские параметры рефлекса 110 эталона кварца и халцедона для левой ветви: экспериментальная ширина пика w_l , доля Коши η_l ; для правой ветви: экспериментальная ширина пика w_{pp} , доля Коши η_{pp} , размер о.к.р. – D

	w_l , град.	w_{pp} , град.	$B.05/B_l$	$B.05/B_{pp}$	η_l	η_{pp}	D , нм
Эталон кварца	0,110	0,082	0,844	0,697	0,038	0,070	11,1
Халцедон	0,17	0,14	0,69	0,707	0,838	0,8	

Полученные данные расчета по зависимости (2) (табл. 3) показали размер о.к.р. с учетом асимметрии линий халцедона по пику 101 $D = 11,1$ нм против $D = 19,8$ нм без учета асимметрии пика.

Для образцов агата получены близкие значения относительно яшмы и халцедона согласно зависимости [7], и для агата по пику 101 размер о.к.р. составил $D = 11,3$ нм, а для пика 202 $D = 10,2$ нм (табл. 4). Для образца коричневого кварца получены значительные размеры о.к.р. исходя из зависимости [7] по 3 пикам: по пику 100 $D = 174,3$ нм, по пику 101 $D = 52,4$ нм и по пику 202 $D = 117,3$ нм (табл. 4).

Для образца коричневого кварца отношение $\beta_{k2} \cos \theta_2 / \beta_{k1} \cos \theta_1$ менее 1, в связи с чем расчет по зависимости 14 не проводился.

Размер о.к.р. образца кварцевого песка по зависимости [7] составил для пика

101 $D = 82$ нм, а для пика 202 $D = 36$ нм (табл. 5).

Образцы кварца песчаника из керна нефтяной площади показали значительную разницу в размерах о.к.р.: образец 2 при аппроксимации по Коши составил по зависимости [4] $D = 643,4$ нм, а при аппроксимации по Гауссу $D = 644,4$ нм (табл. 5). По зависимости [6] с учетом уширения гауссовой и Коши компонент $D = 642,8$ нм. По зависимостям [7] при использовании для расчета пика 101 значение о.к.р. составило $D = 84,0$ нм, а по пику 202 значение $D = 66,8$ нм. Образец 6 по зависимости [4] при аппроксимации по Коши составил $D = 77,7$ нм, а при аппроксимации по Гауссу $D = 76,1$ нм. По зависимости [6] для образца № 6 с учетом уширения гауссовой и Коши компонент $D = 144$ нм, а по зависимостям [7], при использовании для расчета пика 101, значение о.к.р. составило 15,8 нм, а по пику 202 значение $D = 10,9$ нм.

Таблица 4

Физические уширения кварца β , физические уширения компоненты Коши β_k , экспериментальные уширения анализируемой линии и эталона – wh, wg, размер о.к.р. D и микроискажений ϵ рефлексов 101 (1 пик) и 202 (2 пик), 100 (3 пик) кварца для образцов агата и коричневого кварца

Расчет по зависимости	Параметр	Агат	Коричневый кварц
	β_{k1} , рад.	0,002203	0,00049
	β_{k2} , рад.	0,002732	0,000168
	β_1 , рад.	0,002166	0,000339
	β_2 , рад.	0,002523	0,000435
	wh1, град.	0,215	0,110
	wg1, град.	0,091	0,091
	wh2, град.	0,265	0,145
	wg2, град.	0,120	0,120
	wh3, град.	–	0,082
	wg3, град.	–	0,078
По Коши [4]	ϵ	0,000154415	0,000063
	D, нм	78,4	567,7
По Гауссу [4]	ϵ	0,003565603	0,00013
	D, нм	74,9	505,5
По Фойгту [6]	ϵ	0,0000717	–
	D	753	–
[7]	$D_1(2\theta = 26,6)$, нм	11,3	52,4
	$D_2(2\theta = 54,4)$, нм	10,2	117,3
	$D_3(2\theta = 20,8)$, нм	–	174,3

Таблица 5

Физические уширения кварца β , физические уширения компоненты Коши β_k , экспериментальные уширения анализируемой линии и эталона – wh, wg, размер о.к.р. D и микроискажений ϵ рефлексов 101 (1 пик) и 202 (2 пик) кварца для образцов № 2 и № 6 керна нефтяных скважин

Методика анализа	Параметр	Образец № 2, керн	Образец № 6, керн	Кварцевый песок
	β_{k1} , рад.	0,000299	0,001414	0,000464
	β_{k2} , рад.	0,000470	0,002575	0,001471
	β_1 , рад.	0,000247	0,002103	0,000346
	β_2 , рад.	0,000270	0,002366	0,0004
По Коши [4]	ϵ	5,66023E-07	6,93E-05	2,15E-05
	D, нм	643,6	77,71	485,5863
По Гауссу [4]	ϵ	0,00001	3,2 E-05	0,000572
	D, нм	642,7	76,1	466,7
По Фойгту [6]	ϵ	3,15E -05	0,000226	0,00021
	D	642,8	144,0	937
[7]	wh1, град.	0,105	0,211	0,098
	wg1, град.	0,091	0,091	0,078
	wh2, град.	0,136	0,256	0,185
	wg2, град.	0,12	0,12	0,162
	$D_1(2\theta = 26,6)$, нм	84,0	15,8	82
	$D_2(2\theta = 54,4)$, нм	66,8	10,9	36

В ряде работ [8] изучалось качество кварца в зависимости от наличия изоморфных примесей и размера кристаллов с при-

менением рентгенографического анализа методом расчета индекса кристалличности. Расчет индекса кристалличности кварца

позволяет эффективно и качественно выявить наиболее перспективные виды кварцевого сырья для получения концентратов особо чистого кварца. В [9] получены значения индекса кристалличности и размер о.к.р. для образцов кварца разного генезиса. Индекс кристалличности для представленного ограниченного ряда образцов возрастает с увеличением размеров о.к.р., и из-за недостаточной изученности физических основ индекса кристалличности и малой выборки образцов эта связь недостаточна достоверна.

Заключение

Для образцов кварца крупнозернистого песка и коричневого кварца получены большие размеры о.к.р., чем для образцов халцедона, агата и яшмы. Размеры о.к.р. образцов кварца пород керны нефтяной площади значительно различаются. Исследование параметров тонкой кристаллической структуры рассмотренными группами методов показало их некоторые преимущества и ограничения. При исследовании экспрессным методом аппроксимацией функциями Гаусса, Коши или Фойгта можно использовать линии 2 порядков отражений. Это линии с hkl -100, 200, 300, 400, 101, 202. При исследовании методом анализа формы линий не указаны ограничения в использовании любой одиночной линии из рентгенометрических данных минерала. Кроме того, расчет можно проводить по асимметричным линиям.

Размер о.к.р. с учетом асимметрии линий халцедона по пику 101 равен $D = 11,1$ нм. Это значение меньше размера о.к.р., полученного без учета асимметрии пика $D = 19,8$ нм. Результаты, полученные по зависимостям из [7] по линиям с разными hkl , отличаются друг от друга приблизительно до 50%, что сопоставимо и представляет интерес для дальнейшего изучения. В зависимостях расчета размеров блоков D методом анализа профиля линий для $K\alpha$ -коэффициента, зависящего от формы о.к.р., принято значение, равное 1, исходя из предположения, что форма о.к.р. сферическая. Используя описанные методы, возможно дополнительно проводить изучение образцов кварца по размерам о.к.р. и расчленять пласты кварцевых песчаников.

Список литературы / References

1. Юргенсон Г.А. Типоморфные признаки жильного кварца и пирита золоторудных месторождений как поисково-оценочные критерии // Кулагинские чтения: техника и технология производственных процессов: 16 международная научно-практическая конференция. Чита: Забайкальский государственный университет, 2016. С. 10–15.
2. Yurgenson G.A. Typomorphic features of vein quartz and pyrite from gold deposits as prospecting evaluation criteria // Kulaginskiye chteniya: tekhnika i tekhnologiya proizvodstvennykh protsessov: 16 mezhdunarodnaya nauchno prakticheskaya konferentsiya. Chita: Zabaykalskiy gosudarstvennyy universitet, 2016. P. 10–15 (in Russian).
3. Лазарев Д.А., Каныгина О.Н. Об определении размеров областей когерентного рассеяния кристаллов кварца в глинистых системах // Вестник ОГУ. 2012. № 4. С. 221–224.
4. Lazarev D.A., Kanygina O.N. Determination of the dimensions of the coherent scattering regions of quartz crystals in clay systems // Vestnik OGU. 2012. № 4. P. 221–224 (in Russian).
5. Садовничий Р.В., Михайлина А.А., Рожкова Н.Н., Инина И.С. Морфологические и структурные особенности кварца шунгитовых пород максовской залежи // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 2. С. 73–88.
6. Sadovnichy R.V., Mikhaylina A.A., Rozhkova N.N., Inina I.S. Morphological and structural features of quartz in shungite rocks of the Maksavian deposit // Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN. 2015. № 2. P. 73–88 (in Russian).
7. Нагорнов В.П., Смыслов Е.Ф. Аналитические выражения для определения размеров блоков и величин микроискажений в рентгеновском методе аппроксимации. Рег. № 275–81. Деп. УДК 539.26. Аннотация опубликована в журнале «Известия вузов. Физика». 1981. Т. XXIV. № 3. С. 123–129.
8. Nagornov V.P., Smyslov E.F. Analytical expressions for determining the block sizes and microdistortions in the X-ray approximation method. Reg. No. 275–81. Dep. UDC 539.26. Abstract publ. in the journal «Izvestiya Vuzov. Physics». 1981. T. XXIV. No. 3. P. 123–129 (in Russian).
9. Смыслов Е.Ф., Селиванов В.Н. Экспрессный метод определения интегральной ширины и ее составляющих Фойгтовской рентгеновской линии // Заводская лаборатория 1996. Т. 62. № 5. С. 19–20.
10. Smyslov E.F., Selivanov V.N. Express method for determining the integral width and its components of the Voigt X-ray line // Zavodskaya laboratoriya 1996. T. 62. № 5. P. 19–20 (in Russian).
11. Селиванов В.Н., Смыслов Е.Ф. Экспрессные методы рентгеновского анализа распределений кристаллитов и дислокационной структуры деформированных поликристаллитов. Теоретические и практические аспекты методов. Ч. 1 // Материаловедение. 1998. № 4. С. 2–9.
12. Selivanov V.N., Smyslov E.F. Express methods of X-ray analysis of crystallite distributions and dislocation structure of deformed polycrystallites. Theoretical and practical aspects of the methods. Part 1 // Materialovedeniye. 1998. No. 4. P. 2–9 (in Russian).
13. Juan Pantoja-Cortes, Florentino Sanchez-Bajo, Angel L. Ortiz. A line-broadening analysis model for the microstructural characterization of nanocrystalline materials from asymmetric x-ray diffraction peaks. Journal of physics. 2012. V. 24. DOI: 10.1088/0953-8984/24/21/215301.
14. Разва О.С., Ануфриенкова А.М., Коровкин М.В. Оценка степени преобразования кварцитов методом рентгеновской дифракции // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 7. С. 27–28.
15. Razva O.S., Anufrienkova A.M., Korovkin M.V. Evaluation of the degree of transformation of quartzite by X-ray diffraction // Sovremennyye naukoemykiye tekhnologii. 2014. № 7. P. 27–28 (in Russian).
16. Песков А.В., Ольховская В.А. Измерение рентгенографических параметров кварца для безэталонной экспрессной оценки содержания минералов // Вестник СамГТУ. Серия технические науки. 2017. № 1. С. 153–164.
17. Peskov A.V., Olkhovskaya V.A. Measurement of X-ray parameters of quartz for a standard-free express assessment of mineral contents // Vestnik SamGTU. Seriya tekhnicheskiye nauki. 2017. № 1. P. 153–164 (in Russian).