АПАТИТ НИКОЛАЙШОРСКОГО ГРАНИТНОГО МАССИВА (ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

Ю. В. Денисова

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

yulden777@yandex.ru

В работе представлены результаты типоморфического и типохимического изучения акцессорного апатита из гранитов Николайшорского массива. В породах рассмотренного массива выявлены фторапатиты двух типов. Согласно полученным морфологическим особенностям, гексагональный дипирамидально-призматический апатит образовался на раннем этапе формирования Николайшорского массива и при более высокотемпературных условиях, чем гексагональный призматический апатит. Применение термометрии насыщения Ватсона с уточнением Беа позволило определить температуру формирования гранитов Николайшорского массива. Для пород этого массива выявлены два температурных диапазона: 751–877 °С и 634–699 °С.

Ключевые слова: акцессорный апатит, гранит, Николайшорский массив, Приполярный Урал, Ватсон, Беа.

THE APATITE OF THE NIKOLAISHOR GRANITE MASSIF (THE SUBPOLAR URALS)

Yu. V. Denisova

Institute of geology of Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The paper presents the results of the typomorphism and chemical studies of accessory apatite from the Nikolaishor granite massif. Two types of the fluor-apatites were revealed in the rocks of the considered massif. According to the morphological features a hexagonal dipyr-ramidal prismatic apatite was formed at the early stage of formation of the Nikolayshor massif under higher temperature conditions than the hexagonal prismatic apatite. The application of the saturation thermometer of Watson with the specification Bea allowed determining temperature of the Nikolaishor granite massif formation. Two temperature ranges (751–877 °C and 634–699 °C) in the rocks of this massif were revealed.

Keywords: accessory apatite, granite, the Nikolaishor massif, the Subpolar Urals.

Введение

Несмотря на многочисленные исследования пород Николайшорского гранитного массива, на сегодняшний день крайне мало информации по апатиту, который является одним из широко распространенных акцессорных минералов в гранитах Приполярного Урала. Также этот минерал никогда ранее не использовался в качестве геотермометра. На данный момент определение температуры по апатиту стало возможно благодаря термометрии насыщения Ватсона, в основе которой лежит исследование химического состава породы, содержащей апатит.

Целью настоящей работы является выявление особенностей акцессорного апатита из пород Николайшорского массива, а также определение температуры формирования изученных гранитов.

Объект исследования

Николайшорский гранитный массив расположен в юго-восточной части Приполярного Урала, в бассейнах рек Николай-Шор и Иг-Шор, и пространственно ассоциируется с гнейсами няргинского метаморфического комплекса раннепротерозойского возраста. Массив образует вытянутое в северо-северо-западном направлении узкое согласное пластовое тело длиной 4 км при средней ширине 1.5 км (рис. 1). В пределах изученного массива отмечаются плагиограниты и нормальные калишпатовые граниты. Николайшорские граниты имеют преимущественно гнейсовидный облик, также можно наблюдать взаимные переходы к гнейсам и кристаллическим сланцам. Согласно А. М. Пыстину (1994), более подходящее название для этих пород — плагиогранито-гнейсы и гранито-гнейсы. Гранито-гнейсы развиваются преимущественно за счет плагиогранито-гнейсов и пространственно тесно связаны с ними [4].

Кроме пород гранитного ряда, составляющих основной объем Николайшорского гранитного массива, здесь встречаются в различной степени гранитизированные метаморфиты няргинского комплекса. Породы сильно катаклазированы. Николайшорский автохтонный массив, согласно классификации Б. Чаппела, относится к S-типу [1].

Опробование гранитного массива проводилось точечным методом с отбором частных проб в количестве 10 единиц. Для каждой пробы отбирались куски неизменной породы общим весом в среднем 10–15 кг, содержание апатита в которых для Николайшорского массива составило в среднем 30 г/т.

Типоморфные особенности апатита Николайшорского массива

В гранитах Николайшорского массива содержится достаточное количество акцессорного апатита. Однако хрупкость этого минерала не позволяет в полной мере использовать его морфологические особенности для различных корреляций. Несмотря на плохую сохранность апатита, в процессе получения искусственных шлихов, при больших содержаниях минерала в пробе, по отдельным обломкам кристаллов можно выявить их основные типоморфические признаки.

В гранитах Николайшорского массива акцессорный апатит представлен двумя морфологическими типами (рис. 2, 3).

Первый морфологический тип наиболее распространен в породах изученного массива и представлен преимущественно гексагональным призматическим молочно-белым (иногда с желтым оттенком) полупрозрачным апатитом (рис. 2, а, б, е–h; 3, а–е). Отмечаются (1010)- и (0001)-границы. У отдельных зерен апатита слабо развита грань (1011). Границы кристаллов с жир-

Рис. 1. Николайшорский гранитный массив (цифра 1 в круге) (по А. М. Пыстину [4]): 1 — биотитовые и двуслюдяные гнейсы с простоями амфиболитов; 2 — известковистые кристаллические сланцы, мраморы, кварциты, амфиболовые сланцы; 3 — слюдяно-кварцевые сланцы, зеленые ортосланцы, метапорфиры, кварциты; 4 — гранитоидные гнейсы; 5 — граниты; 6 — геологические границы: а — стратиграфические и магматические, б — тектонические; 7 — элементы залегания плоскостных структур

Fig. 1. The Nikolaishor granite massif (numeral 1 in circle) (by A. M. Pystin [4]): 1 — biotite and two-mica gneisses with amphibolites layers; 2 — calcareous shales, marbles, quartzites, amphibole shales; 3 — mica-quartz shales, green orthoschales, metaporphyrates, quartzites; 4 — granitoid gneisses; 5 — granites; 6 — geological boundaries: a — stratigraphic and magmatic, b — tectonic; 7 — elements of occurrence of planar structures

Рис. 2. Типы кристаллов апатитов Николайшорского гранитного массива: а, b, е–h — акцессорный апатит I типа; c, d, i–l — акцессорный апатит II типа

Fig. 2. Types of the apatite crystals of the Nikolaishor granite massif: a, b, e–h — the accessory type I apatite; c, d, i–l — the accessory type II apatite

ным блеском слабокорродированны (отмечаются зерна и со среднекорродированными гранями). Размер кристаллов 0.15–0.45 мм. Коэффициент удлинения 1.0–3.5. Отмечаются включения кварца, циркона, биотита, эпидота, пирита, распределенные в теле кристалла без

видимой закономерности. Содержание апатита первого типа оставляет в среднем 60 % от общего объема этого минерала в породе.

Второй морфологический тип составляет гексагональный дипирамидально-призматический желтоватый (до коричневатого) полупрозрачный (редко матовый) апатит (рис. 2, c, d, i–l, 3, f–j). Развита (1010)- и (1011)-границы. У отдельных кристаллов минерала наблюдается слабо развитая (0001)-грань. Границы кристаллов шершавые, среднекорродированные (отмечаются зерна и со слабокорродированными гранями). Размер кристаллов 0.15–0.35 мм. Коэффициент удлинения 1.5–3.0. Среди включений встречаются образования кварца, плагиоклаза, циркона, биотита, распределенные в теле кристалла хаотично. Содержание апатита второго типа в протоловках гранитов Николайшорского массива в среднем 40 % от общего объема минерала в породе.

Согласно исследованиям М. В. Фишмана и его коллег [6], между развитием граней пинакоида (0001) и температурой имеется тесная взаимосвязь, а именно: при понижении температуры среды минералообразования апатита происходит подавление дипирамидальных граней, что приводит к увеличению относительно размера граней третьего пинакоида [1]. В нашем случае у апатита I типа облик кристалла обусловлен развитием именно граней (0001). Это указывает на то, что кристаллы первого типа образовались в более низкотемпературных условиях, чем апатит II морфологического типа.

Изучение включений в апатите позволяет получить информацию о физико-химических свойствах минералообразующей среды, а также о времени выделения в общем процессе образования породы. Для каждого морфологического типа характерен свой набор синпетрогенных включений. Учитывая последовательность кристаллизации того или иного минерала при формировании Николайшорского гранитного массива, по включениям можно определить относительное время кристаллизации каждого выделенного морфотипа. Для апатита I типа отмечаются включения

Рис. 3. Акцессорный апатит из гранита Николайшорского массива: а–е — акцессорный апатит I типа; f–j — акцессорный апатит II типа.

Растровые изображения получены в ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН (комплекс Vega3 Tescan, аналитик С. С. Шевчук)

Fig. 3. An accessory apatite of the Nikolaishor granite massif: a–e — the accessory type I apatite; f–j — the accessory type II apatite.

The bitmap images were received in the research center Geosciences, Institute of Geology, Komi science centre, Ural Branch of RAS (complex Vega 3 Tuscan, analyst S. S. Shevchuk)

кварца, циркона, биотита, эпидота, пирита. Согласно М. В. Фишману и его коллегам (1968), эти минералы характерны для поздней стадии формирования пород Николайшорского массива. В случае апатита II типа отмечаются включения кварца, плагиоклаза, циркона, биотита, характерные для раннего этапа образования николайшорских гранитов.

Апатит может содержать различные элементы-примеси в своем составе, преимущественное содержание которых можно определить по окраске минерала. Апатит, не имеющий никаких примесей, практически бесцветен. Так, бирюзовый или голубой (синий) цвет кристаллам придает Mn^{5+} . Розовая окраска минерала обусловлена наличием ионов Sm^{2+} . У зеленых и лимонных апатитов отмечается Pr^{3+} . Благодаря присутствию Fe^{3+} минерал имеет желтоватый и коричневатый тон. Среди апатитов Николайшорского гранитного массива отмечаются минералы желтоватой и коричневатой окраски. На основании этого можно предположить, что в составе изученных апатитов в заметных количествах содержится примесь железа. Причем, судя по интенсивности окраски минералов, среднее содержание железа в апатите второго типа больше, чем в апатите первого типа [3].

Таким образом, на основе выявленных морфологических особенностей апатита можно сделать вывод, что на раннем этапе образования николайшорских гранитов происходило выделение апатита второго типа, а позднее, при более низких температурах, кристаллизовался апатит первого типа.

Типохимические особенности апатита Николайшорского массива

Рассмотренные химические составы апатита первого и второго типов схожи (табл. 1), за исключением содержания оксида железа. Содержание FeO в апатите II типа в среднем выше на 47.62 %, чем в апатите I ти-

па, что подтверждает значимость сделанных ранее выводов на основании окраски минерала. Проанализированные минералы относятся исключительно к фтористой разновидности: $F_{I \text{ тип}} = 1.58\text{--}2.88\%$, в среднем 2.10 %; $F_{II \text{ тип}} = 1.78\text{--}2.42\%$, в среднем 2.25 %. Для апатита основным показателем генезиса является индикаторное отношение F/Cl [3]. Так, для осадочных пород оно составляет 150–200, для метаморфических апатитов — 10–30, для изверженных пород характерен более узкий диапазон — 15–19. В ранних работах на основании изучения цирконов автором было показано, что граниты Николайшорского массива образованы по субстрату первично-осадочных пород [1, 2]. Однако отношение F/Cl указывает на магматическое происхождение исследованных минералов, что подтверждают и типично высокие степени корреляции между основными компонентами химического состава [9] апатита Николайшорского массива, как для первого, так и для второго морфологического типов (рис. 4).

Термометрия апатита Николайшорского массива

Несмотря на то, что апатит не обладает такой же высокой физико-химической устойчивостью к воздействию наложенных процессов, как циркон, минерал может быть использован в качестве геотермометра. В настоящий момент на основе исследований апатита несколькими авторами определены расчетные формулы для определения температуры кристаллизации апатита [7, 8]. При изучении минерала применялась термометрия насыщения, определяющая температуру кристаллизации по распределению содержания P_2O_5 между апатитом и породой, содержащей минерал.

Е. Ватсон и Т. Харрисон установили, что уровень насыщения фосфора в породе, необходимый для образования апатита, находится в прямой зависимости от содержания SiO_2 и в обратной — от температуры [7]:

Таблица 1. Химический состав апатитов Николайшорского гранитного массива

Table 1. Chemical composition of apatite of the Nikolaishor granite massif

№	Тип апатита Apatite type	Окисел, мас. % Oxide, wt %							Σ	Элемент, % Element, %		F/Cl
		P ₂ O ₅	SiO ₂	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O		F	Cl	
1	I	43.12	0.26	0.56	0.08	54.89	0.18	0.07	99.16	2.61	0.14	18.64
2		43.49	0.27	0.45	0.06	54.57	0.17	0.05	99.06	2.33	0.15	15.53
3		42.93	0.26	0.64	0.06	54.56	0.11	0.08	98.64	1.58	0.09	17.56
4		44.56	0.27	0.52	0.04	54.89	0.09	0.07	100.44	1.88	0.12	15.67
5		44.25	0.28	0.66	0.02	53.66	0.13	0.06	99.06	2.48	0.14	17.71
6		43.56	0.29	0.65	0.03	54.78	0.09	0.09	99.49	1.96	0.13	15.08
7		44.03	0.29	0.77	0.05	54.33	0.12	0.04	99.63	2.88	0.16	18.00
8		45.06	0.32	0.48	0.07	53.43	0.11	0.07	99.54	1.92	0.11	17.45
9		42.82	0.28	0.71	0.06	55.22	0.11	0.09	99.29	2.35	0.13	18.08
10		42.99	0.25	0.85	0.03	55.31	0.09	0.07	99.59	2.49	0.14	17.79
11	II	44.03	0.24	0.83	0.12	54.88	0.22	0.11	100.43	2.23	0.13	17.15
12		43.98	0.26	0.94	0.08	54.51	0.18	0.08	100.03	2.25	0.13	17.31
13		44.03	0.25	0.77	0.06	55.12	0.2	0.09	100.52	2.08	0.12	17.33
14		43.48	0.26	0.85	0.03	54.22	0.15	0.08	99.07	2.11	0.12	17.58
15		43.88	0.26	0.98	0.08	54.82	0.16	0.09	100.27	1.95	0.11	17.73
16		43.71	0.29	1.02	0.05	54.12	0.11	0.11	99.41	1.88	0.11	17.09
17		43.63	0.27	1.01	0.06	54.66	0.08	0.13	99.84	1.92	0.11	17.45
18		43.71	0.27	0.89	0.09	54.51	0.1	0.08	99.65	1.78	0.1	17.80
19		43.32	0.31	0.99	0.04	54.21	0.12	0.05	99.04	2.42	0.14	17.29
20		43.87	0.24	1.02	0.03	54.62	0.07	0.03	99.88	2.33	0.13	17.92

Примечание. Микронзондовый анализ выполнен в ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН (комплекс Vega3 Tescan, аналитик С. С. Шевчук).

Note. Microprobe analysis was performed in the research center Geosciences, of Institute of Geology, Komi science centre, UB RAS (complex Vega 3 Tuscan, analyst S. S. Shevchuk).

Рис. 4. Связь между содержаниями отдельных компонентов в составе апатитов из гранитов Николайшорского массива: а, б — апатиты I типа; с, д — апатиты II типа

Fig. 4. A relationship between the contents of the specific components of the apatite composition of the Nikolaishor massif granites. а, б — type I apatites; с, д — type II apatites

Таблица 2. Химический состав гранитов и температуры насыщения для апатита Николайшорского массива
Table 2. A chemical composition of granite and saturation temperatures for apatite of the Nikolaishor massif

Компонент, мас. % Component, mas. %	Номер пробы \ Sample No.									
	H-1	H-2	H-3	H-4	H-5	H-6	H-7	H-8	H-9	H-10
SiO ₂	74.20	75.50	75.04	76.11	76.14	75.40	75.76	76.20	75.66	76.12
TiO ₂	0.13	0.16	0.23	0.05	0.10	0.13	0.10	0.11	0.17	0.22
Al ₂ O ₃	13.53	13.72	13.48	13.67	12.57	13.01	13.14	12.58	12.86	13.88
FeO	0.61	0.72	0.54	1.01	0.89	1.16	0.97	1.23	1.08	0.89
Fe ₂ O ₃	1.65	1.21	1.43	0.48	0.42	1.05	0.75	0.61	0.81	0.94
MnO	0.03	0.01	0.03	0.02	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03	0.03
MgO	0.05	0.30	0.24	0.35	0.18	0.17	0.42	0.29	0.39	0.41
CaO	2.01	1.55	0.86	0.46	1.22	0.67	0.59	0.52	0.38	0.29
Na ₂ O	4.28	3.84	3.75	3.11	3.28	3.48	3.33	4.29	3.02	3.11
K ₂ O	2.53	3.53	3.83	4.89	4.31	4.78	5.14	3.79	5.29	5.18
P ₂ O ₅	0.04	0.01	0.12	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.03
ппп	0.74	0.32	0.68	0.23	1.08	0.49	0.62	0.59	0.49	0.58
Σ	99.80	100.87	100.23	100.39	100.25	100.4	100.86	100.27	100.19	101.68
A/CNK	1.01	1.06	1.14	1.22	1.02	1.07	1.09	1.04	1.13	1.23
Температура по Беа, °С	1	751	877	634	806	799	764	797	685	699

Примечание. Химический состав получен с помощью силикатного метода в ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН (аналитик О. В. Кокшарова).

Note. The chemical composition was obtained by silicate method in the research Geosciences Institute of Geology, Komi science centre, Urals branch of RAS (analyst O. V. Koksharova).

$$\ln D_p = (8400 + 26400 (\text{SiO}_2 - 0.5)) / T - 3.1 - 12.4 (\text{SiO}_2 - 0.5), P_2O_5 (\text{HW}) = 42 / D_p,$$

где D_p — соотношение концентрации Р в апатите и расплаве P_2O_5 ; SiO_2 — весовая доля оксида фосфора, кремнезема в расплаве, мас. вес; T — температура, Кельвин.

Однако эта формула применима только для металаюминиевых пород ($A/CNK < 1$). Ф. Беа с коллегами разработали уточняющие формулы для пералаюминиевых пород ($A/CNK > 1$) [7]:

$$P_2O_5 (\text{Bea}) = P_2O_5 (\text{HW}) \times e^{\frac{6429 (A/CNK - 1)}{T - 273.15}},$$

где $A/CNK = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$.

С использованием данных по химическому составу гранитов Николайшорского массива и программы GCDkit 2.3 [10] автором были получены температуры насыщения для апатита (табл. 2) на основе формул для пералаюминиевых пород.

Рассматривая гистограмму, составленную на основании полученных температур (рис. 5), мы видим, что в процессе становления Николайшорского массива породы подвергались влиянию двух температурных режимов. На высокотемпературной стадии (от 750 до 900 °С) происходило формирование породы, позднее граниты подверглись воздействию наложенных процессов при температурах от 600 до 700 °С.

Применение термометрии насыщения Беа (на основе формулы Ватсона) для апатита позволяет сделать вывод, что формирование пород Николайшорского массива происходило в достаточно широком температурном диапазоне, включающем два температурных режима (634–699 и 751–877 °С).

Заключение

Проведенное исследование акцессорного апатита Николайшорского массива позволило выявить два морфологических типа минерала: I тип — гексагональный

Рис. 5. Гистограмма распределения температур образования для гранитов Николайшорского массива

Fig. 5. A formation temperature histogram of the Nikolaishor massif granites

призматический апатит, II тип — гексагональный дипирамидально-призматический апатит. Преобладание одной из главных граней (пинакоид/дипирамида) в габитусе кристалла, наличие своего набора синпетрогенных включений, индикаторное значение F/Cl — все эти признаки позволили сделать вывод, что кристаллизация апатита началась после полного переплавления первично-осадочных пород Николайшорского массива, причем фторапатит II типа кристаллизовался на раннем этапе формирования исследованного массива при более высокотемпературных условиях, чем фторапатит I типа. Температуру каждого этапа удалось уточнить с термометрией насыщения Ватсона с дополнением Беа: ранний — 751–877 °С, поздний — 634–699 °С.

Согласно приведенным выше данным, гранитоге-незис Николайшорского массива характеризуется двумя температурными режимами. Эти данные подтверждают полученные ранее автором температуры с помощью термометрии насыщения Ватсона (606–648 °С) и

классического эволюционно-морфологического анализа Пюпена (650–700 и 800–900 °С) для циркона этого же массива. Однако при использовании термометрии насыщения для циркона мы смогли получить лишь температуру заключительного этапа. В случае же термометрии насыщения для апатита был получен более полный диапазон температур, а также выявлены два температурных этапа. На основании этого можно сделать вывод, что термометрия насыщения Ватсона с дополнением Беа для апатита дает такую же точную информацию об эволюции температурного режима в ходе образования гранитов, как и эволюционно-кристалломорфологический анализ Пюпина и Тюрко для цирконов.

Исследования проведены в рамках НИР ИГ Коми НЦ УрО РАН ГР № АААА-А17-117121270035-0 и при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований РАН № 18-5-5-19.

Литература

1. Денисова Ю. В. Типоморфические и типохимические особенности акцессорных цирконов гранитоидов Приполярного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2014. № 5. С. 9–16.
2. Денисова Ю. В. Термометрия циркона из гранитоидов Приполярного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 11. С. 11–22.
3. Осовецкий Б. М. Типохимизм шлиховых минералов. Пермь: Изд-во Пермск. ун-та, 2001. 244 с.
4. Пыстин А. М. Полиметаморфические комплексы Западного Урала. СПб.: Наука, 1994. 208 с.
5. Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярноуральского сегмента земной коры // Литосфера. 2008. № 11. С. 25–38.
6. Фишман М. В., Юшкин Н. П., Голдин Б. А., Калинин Е. П. Минералогия, типоморфизм и генезис акцессорных минералов изверженных пород севера Урала и Тимана. М.-Л.: Наука, 1968. 252 с.
7. Bea F., Fershtater G. B., Corretgü L. G. The geochemistry of phosphorus in granite rocks and the effects of aluminium // Lithos. 1992. V. 48, P. 43–56.
8. Harrison T. M., Watson E. B. The behavior of apatite during crustal anatexis: Equilibrium and kinetic considerations // Geochim. Cosmochim. Acta. 1984. V. 48. P. 1467–1477.
9. Pasero M., Kampf A.R., Ferraris C. et al. Nomenclature of the apatite supergroup minerals // Europ. J. Mineral. 2010. V. 22. P. 163–179.
10. The Comprehensive R Archive Network (<https://cran.r-project.org/>)

References

1. Denisova Yu. V. *Tipomorficheskiye i tipokhimicheskiye osobennosti aktsessornykh tsirkonov granitoidov Pripolyarnogo Urala* (Typomorphic and typochemical features of accessory zircons of granitoids of the Subpolar Urals). Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar, No. 5, 2014, pp. 9–16.
2. Denisova Yu. V. *Termometriya tsirkona iz granitoidov Pripolyarnogo Urala* (Thermometry of zircon from the granitoids of Subpolar Urals) Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar, No. 11, 2016, pp. 11–22.
3. Osovetskiy B. M. *Tipokhimizm shlikhovykh mineralov* (Typochemism of schlich minerals). Perm: Perm university, 2001, 244 pp.
4. Pystin A. M. *Polimetamorficheskiye komplekсы Zapadnogo Urala* (Polymetamorphic complexes of the Western Urals). St. Petersburg: Nauka, 1994, 208 pp.
5. Pystin A. M., Pystina Yu. I. *Metamorfizm i granitobrazovaniye v proterozoyско-rannepaleozoyной istorii formirovaniya Pripolyarnoural'skogo segmenta zemnoy kory* (Metamorphism and granite formation in the Proterozoic-Early Paleozoic history of the formation of Subpolar Ural segment of the earth's crust). Litosfera, 2008, No. 11, pp. 25–38.
6. Fishman M. V., Yushkin N. P., Goldin B. A., Kalinin Ye. P. *Mineralogiya, tipomorfizm i genezis aktsessornykh mineralov izverzhennykh tverdoy severa Urala i Timana* (Mineralogy, typomorphism and genesis of accessory minerals of igneous rocks in the north of the Urals and Timan). Moscow- Leningrad: Nauka, 1968, 252 pp.
7. Bea F., Fershtater G. B., Corretgü L. G. The geochemistry of phosphorus in granite rocks and the effects of aluminium. Lithos, 1992, V. 48, pp. 43–56.
8. Harrison T. M., Watson E. B. The behavior of apatite during crustal anatexis: Equilibrium and kinetic considerations. Geochim. Cosmochim. Acta. 1984, V. 48, pp. 1467–1477.
9. Pasero M., Kampf A.R., Ferraris C. et al. Nomenclature of the apatite supergroup minerals. Europ. J. Mineral. 2010, V. 22, pp. 163–179.
10. The Comprehensive R Archive Network (<https://cran.r-project.org/>)