

УДК 549. 514:552.321
DOI 10.19110/1994-5655-2019-3-47-52

Ю.В. ДЕНИСОВА

**ТЕРМОМЕТРИЯ НАСЫЩЕНИЯ
ЦИРКОНА, АПАТИТА, МОНАЦИТА
(КОЖИМСКИЙ МАССИВ,
ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)**

*Институт геологии им. акад. Н.П. Юшкина
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
г. Сыктывкар*

yulden777@yandex.ru

YU.V.DENISOVA

**SATURATION THERMOMETRY
OF ZIRCON, APATITE, MONAZITE
(THE KOZHIM MASSIF, SUBPOLAR URALS)**

*N.P.Yushkin Institute of Geology,
Federal Research Centre Komi Science Centre,
Ural Branch, RAS,
Syktyvkar*

Аннотация

В работе представлены результаты изучения акцессорного апатита, циркона и монацита из пород Кожимского гранитного массива. В ходе исследования были рассчитаны температуры Фоватсона (циркон), Ватсона и Беа (апатит), Монтеля (монацит). Согласно полученным данным, циркон кристаллизовался при температуре от 749°C до 816°C, апатит – от 722°C до 856°C, монацит – от 762°C до 842°C. Полученные температурные диапазоны позволили выявить изменение температурного режима в процессе формирования кожимских гранитов. Для акцессорного циркона изученного массива проведено сравнение с температурами, полученными ранее с помощью эволюционно-кристалломорфологического анализа.

Ключевые слова:

циркон, апатит, монацит, гранит, Кожимский массив, Приполярный Урал, Ватсон, Беа, Монтел

Abstract

Among the variety of existing methods of thermometry, a special place is occupied by saturation thermometry, based on the rock level of the organization of matter. This method allows the use of individual accessory minerals as natural geothermometers. In the study of the Kozhim massif exposed in the arch of the Lyapin anticlinorium, M.V. Fishman and his colleagues found that the temperature of granites formation of this massif does not exceed 720°C. To confirm the temperature regime of the rocks under consideration, saturation thermometry was used for accessory zircon, apatite, monazite. Using the formulas of Watson, Bea and Montel, which show the relationship between the temperature and the degree of accumulation of the necessary element for the crystallization of zircon, apatite, monazite, saturation temperatures for these minerals were established. According to the presented data, zircon crystallized at a temperature from 749°C to 816°C, apatite - from 722°C to 856°C, monazite - from 762°C to 842°C. This suggests that the Kozhim massif granites are high-temperature formations, which does not coincide with the conclusions of M. V. Fishman and his colleagues. However, the obtained temperature ranges are similar to the temperatures obtained earlier by the author using evolutionary crystal morphological analysis for the accessory zircon of the studied massif.

Keywords:

zircon, apatite, monazite, granite, Kozhim massif, Subpolar Urals, Watson, Bea, Montel

Введение

Для определения температуры образования той или иной породы разработано большое количество различных геотермометров. Это и изотопные геотермометры, основанные на зависимости рас-

пределения изотопов между минералом и средой (кислородный, аргонный геотермометр и др), и геотермометры, базирующиеся на методе минеральных равновесий (двуполюшпатовый геотермометр Барта–Рябчикова, геотермометр Кудо-Вейля, биотитовый геотермометр Офтедаля, магнетитовый геотермометр Баддингтона-Линсли-Тугаринова, кальцитовый геотермометр Харкера-Татла-Графа-Гольдсмида, гранат-биотитовый геотермометр Перчука, пирротиновый геотермометр Арнольда, сфалеритовый геотермометр Куллеруда и др.). Все большее распространение стали получать также геотермометры, в основе которых изучение химического состава породы (геотермометр Ватсона, геотермометр Монтеля). В связи с этим стало возможным использовать отдельные минералы, а именно, циркон, апатит, монацит, в качестве природных геотермометров.

Целью настоящей работы является определение температуры формирования гранитов Кожимского массива с использованием термометрии насыщения, рассчитанной для циркона, апатита и монацита.

Объект исследования

Одним из гранитоидов, обнажающихся в сводовой части Ляпинского антиклинория, является Кожимский массив, который представляет собой

группу вытянутых пластообразных тел, расположенных на берегах р.Кожим в бассейнах ручьев Понъю, Осюю и Епкошор. Гранитные тела, приуроченные к ядрам антиклинальных складок, относятся к одной межпластовой интрузии, прорывающей отложения пуйвинской свиты среднего рифея. Породы этого массива обычно сильно катаклазированы, расланцованы и местами превращены в серицитовые динамометаморфические сланцы. Кожимские граниты с максимальной сохранностью первичной структуры и облика представляют собой плотные гнейсовидные породы розового цвета (показатель повышенного содержания щелочного полевого шпата в породе) с хорошо выраженным зеленовато-серым оттенком (характерный признак наличия серицита и мусковита, мелких зерен кварца в граните). Структура изученных пород изменяется от зернистой гипидиоморфной (крупные субидиоморфные зерна полевых шпатов погружены в средне-мелкозернистую массу, состоящую из зерен кварца, полевых шпатов и чешуек слюд) до средне-зернистой аллотриоморфной [1, 2]. Минеральный состав гранитов представлен калиево-натриевым полевым шпатом (до 50%), плагиоклазом (до 20%), кварцем (до 40%), биотитом (до 5%), мусковитом (до 7%).

Из акцессорных минералов пород Кожимского массива наиболее характерными являются цир-

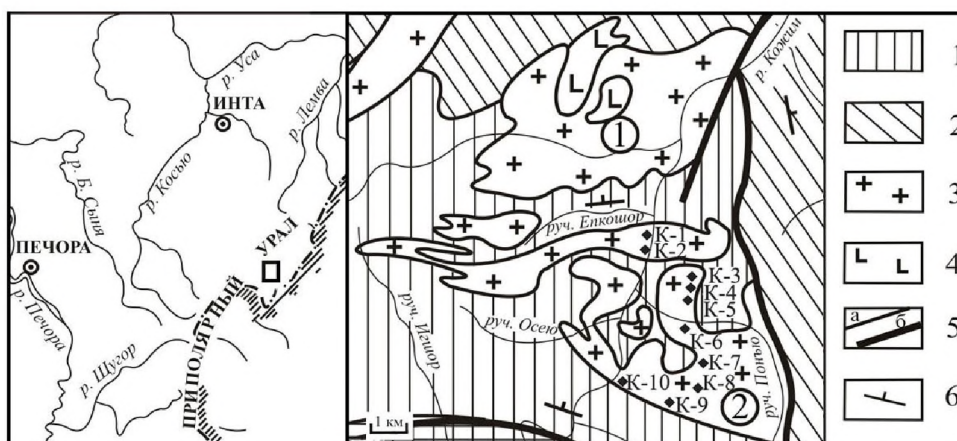


Рис. 1. Кожимский массив: 1 – слюдяно- кварцевые сланцы, зеленые ортосланцы, кварциты; 2 – слюдяно-кварцевые сланцы, порфиры, порфириты, прослои мраморов и кварцитов; 3 – граниты; 4 – габбро; 5 – геологические границы: а – стратиграфические и магматические, б – тектонические; 6 – элементы залегания плоскостных структур.

Точки отбора проб: К-1 – левый берег р. Кожим, в 1,0 км от устья руч. Епкошор; К-2 – левый берег р.Кожим, в 0,5 км выше по течению от К-1; К-3 – в 2,1 км по азимуту 118° от К-2; К-4 – в 0,5 км по азимуту 180° от К-3; К-5 – в 2,3 км по азимуту 197° от К-4; К-6 – правый берег руч. Понъю, в 3 км по азимуту 237° от устья руч. Понъю; К-7 – в 1,5 км по азимуту 148° от К-6; К-8 – в 1,7 км по азимуту 199° от К-7; К-9 – в 1,6 км по азимуту 242° от К-8; К-10 – правый берег р. Кожим, в 2,5 км по азимуту 312° от К-9. Массивы (цифры в кружочках): 1 – Кузпуяуский; 2 – Кожимский.

Fig. 1. The Kozhim granite massif: 1 – mica-quartz shales, green orthoshales, quartzite; 2 – mica-quartz shales, porphyries, porphyrites, interlayers of marbles and quartzites; 3 – granites; 4 – gabbro; 5 – geological boundaries: stratigraphic and magmatic, b – tectonic; 6 – elements of occurrence of planar structures.

Sampling points: K-1 – left bank of the river Kozhim, 1.0 km from the mouth of the stream Epkoshor; K-2 – left bank of river Kozhim, 0.5 km upstream from K-1, K-3 – 2.1 km in azimuth 118° from K-2; K-4 – 0.5 km in azimuth 180° from K-3, K-5 – 2.3 km in azimuth 197° from K-4, K-6 – right bank of the stream Ponyu, 3 km in azimuth 237° from the mouth of the stream Ponyu ; K-7 – 1.5 km in azimuth 148° from K-6; K-8 – 1.7 km in azimuth 199° from K-7; K-9 – 1.6 km in azimuth 242° from K-8; K-10 – right bank of the river Kozhim, 2.5 km in azimuth 312° from K-9.

Massifs (numbers in circles): 1 – the Kuzpuayu massif; 2 – the Kozhim massif.

кон, апатит, ортит. Встречаются титанит, флюорит, гранат, монацит. Циркон в гранитах Кожимского массива представлен преимущественно хорошо ограненными бесцветными и светло-желтыми прозрачными дипирамидально-призматическими кристаллами, размер которых составляет 0.05–0.15 мм при коэффициенте удлинения 1.0–2.0. В редких случаях отмечаются прозрачные и полупрозрачные светло-желтые длиннопризматические кристаллы размером 0.4–0.8 мм с коэффициентом удлинения 3.0–5.0 (реже 6.0). Кожимский апатит – это светло-желтые полупрозрачные и молочные матовые удлиненные кристаллы гексагонального дипирамидально-призматического габитуса. Размер кристаллов 0.10–0.4 мм, коэффициент удлинения 1.5–3.5. В гранитах изученного массива монацит встречается преимущественно в виде непрозрачных желтых зерен неправильной формы, реже отмечаются полупрозрачные светло-желтые кристаллы призматического габитуса. Размер кристаллов 0.10–0.25 мм. Содержание циркона, апатита, монацита в гранитах Кожимского массива в среднем составило 12 г/т, 18 г/т, менее 0,1 г/т соответственно [3].

Методы исследования

Для расчета температур формирования кожимских гранитов в работе использована термометрия насыщения, которая позволяет получить искомый параметр на основе степени накопления определенных элементов в породе: циркония (термометрия насыщения Ватсона для циркона [4]), фосфора (термометрия насыщения Ватсона и Беа для апатита [5]), легких редких земель (термометрия насыщения Монтеля для монацита [6]).

Многочисленные исследования циркона позволили Е. Ватсону совместно с Т. Хариссоном установить связь между температурой образования циркона и цирконсодержащей породой, уровнем насыщения циркония в породе, содержаниями Na₂O, K₂O, Al₂O и Si₂O в расплаве. Согласно выявленной закономерности, исследователи представили степень насыщения циркония в породе как функцию от температуры и состава расплава:

$$\ln D_{Zr} = (-3.80 - [0.85 \cdot (M-1)]) + 12900/T^K,$$

$$M_{Zr} = 100(\text{Na} + \text{K} + 2\text{Ca}) / (\text{Al}^* \text{Si}), \text{Zr} = 497644 / D_{Zr},$$

где D_{Zr} – соотношение концентрации Zr в цирконе и расплаве, M_{Zr} – соотношение катионов; T^K – температура, Кельвин.

Это позволило ученым составить формулу для определения температуры:

$$T^C = 12900 / (\ln D_{Zr} + 3.8 + 0.85(M_{Zr} - 1)) - 273.15,$$

где T^C – температура, Цельсий.

Позже ими же для определения температуры кристаллизации апатита и, соответственно, породы, содержащей этот минерал, была определена зависимость между уровнем насыщения фосфора в породе, необходимого для образования апатита, содержанием кремния и температурой:

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

$$P_2O_5(HW) = 42 / D_p,$$

$$T^C = (8400 + 26400(\text{SiO}_2 - 0.5)) / (\ln(42 / P_2O_5) + 3.1 + 12.4(\text{SiO}_2 - 0.5)) - 273.15,$$

где D_p – соотношение концентрации фосфора в апатите и расплаве; P₂O₅, SiO₂ – весовая доля оксида фосфора, кремния в расплаве, мас. вес; T^K – температура, Кельвин; T^C – температура, Цельсий.

Эта формула была составлена для пород, относящихся к метаалюминиевым (A/CNK < 1). Позже Ф. Беа с коллегами внесли в исходную формулу Ватсона уточнение по уровню содержания оксида фосфора для пералюминиевых пород (A/CNK > 1).

$$P_2O_5(\text{Bea}) = P_2O_5(HW) \cdot \exp(6429(A/CNK - 1) / (T - 273.15)),$$

где A/CNK = Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O).

На основании корректировки Ф. Беа расчетная формула приобрела следующий вид:

$$T^C = (8400 + 26400(\text{SiO}_2 - 0.5)) / (\ln(42 / P_2O_5 \cdot \exp(6429(A/CNK - 1) / (T - 273.15))) + 3.1 + 12.4(\text{SiO}_2 - 0.5)) - 273.15.$$

Согласно Дж. Монтелю, в основе расчета температуры формирования монацитсодержащей породы и монацита, являющегося фосфатом лантаноидов, лежит взаимосвязь между содержаниями легких редкоземельных элементов, основных элементов и H₂O в расплаве и температурой:

$$\ln(LREE) = 9.5 + 2.34M_{mz} + 0.3879 \cdot (H_2O)^{0.5} - 13318/T^K,$$

$$LREE = (\sum(REE_i) / REE) / X_{mz},$$

Таблица 1

Химический состав гранитов Кожимского массива, мас. %

Chemical composition of the Kozhim massif granites, wt. %

Table 1

Компонент	Номер пробы									
	К-1	К-2	К-3	К-4	К-5	К-6	К-7	К-8	К-9	К-10
SiO ₂	77.78	76.89	75.95	75.89	76.49	78.12	77.54	76.26	77.48	76.95
TiO ₂	0.16	0.22	0.48	0.52	0.48	0.11	0.24	0.42	0.31	0.59
Al ₂ O ₃	11.88	11.95	12.69	12.52	10.05	11.34	11.78	12.22	11.09	10.92
FeO	1.72	1.29	1.15	1.24	0.56	0.50	0.59	0.62	0.61	1.03
Fe ₂ O ₃	0.84	1.12	0.52	1.05	0.92	1.21	0.87	1.02	0.89	0.56
MnO	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.04	0.03	0.03
MgO	0.16	0.25	0.17	0.33	0.38	0.39	0.18	0.29	0.19	0.18
CaO	0.31	0.29	0.22	0.38	0.59	0.28	0.45	0.42	0.37	0.51
Na ₂ O	3.65	3.33	4.22	4.02	3.08	3.15	3.22	4.51	3.01	3.89
K ₂ O	3.88	4.51	4.09	3.89	4.15	5.17	4.99	3.78	4.65	3.28
P ₂ O ₅	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02
ппп	0.05	0.29	0.59	0.15	0.75	0.62	0.39	0.98	1.02	1.23
Σ	100.46	100.17	100.10	100.02	97.50	100.92	100.28	100.57	99.68	99.19
H ₂ O	0.07	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.09	0.02	0.05	0.06

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

Таблица 2
Содержания редких и редкоземельных элементов в гранитах Кожимского массива, г/т
Table 2
The content of rare and rare earth elements in granites of the Kozhim massif, g/t

Элемент	Номер пробы				
	К-1	К-3	К-5	К-6	К-9
Rb	113.47	118.97	182.15	152.56	148.52
Ba	448.17	387.90	488.23	352.56	322.56
Th	13.73	15.90	12.56	14.23	11.26
Ta	1.56	1.66	1.51	1.86	1.43
Nb	18.58	23.62	37.81	22.36	31.75
Hf	3.38	6.43	4.21	3.78	4.45
Zr	60.62	98.23	75.26	102.23	88.15
Y	27.89	44.89	52.26	35.11	38.89
U	1.86	3.35	2.15	2.89	3.01
La	36.08	49.25	38.15	32.59	33.58
Ce	74.95	103.17	88.59	64.89	58.88
Pr	8.56	12.80	10.20	7.59	6.59
Nd	32.86	51.20	40.10	29.58	25.48
Sm	6.66	11.40	12.23	7.91	9.89
Eu	0.77	0.65	0.88	0.68	0.59
Gd	6.40	12.20	7.88	7.89	7.16
Tb	1.11	2.03	1.57	1.46	1.29
Dy	7.17	13.10	9.36	8.89	7.89
Ho	1.50	2.72	2.05	1.73	1.45
Er	4.65	8.13	6.89	5.71	4.89
Tm	0.71	1.21	1.02	0.85	0.68
Yb	4.77	7.98	6.22	5.02	8.29
Lu	0.69	1.2	0.92	0.75	0.62

Примечание. Содержания элементов получены с помощью ICP-MS метода в Институте геологии и геохимии (Екатеринбург, аналитик Ю. Л. Ронкин).

$$M_{mz} = 100(\text{Na} + \text{K} + \text{Li} + 2\text{Ca}) / (\text{Al}(\text{Al} + \text{Si})),$$

где REE_i – содержание La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd в расплаве, атом. вес; REE – суммарное содержание LREE в расплаве, атом. вес; X_{mz} – суммарное содержание LREE в расплаве, мол. вес; M_{mz} – соотношение катионов; H₂O – предполагаемое содержание воды в расплаве, мас. %; T^K – температура, Кельвин.

Это позволяет получить формулу определения температуры для монацита:

$$T^C = 13318 / (9,5 + 2,34M_{mz} + 0,3879 \cdot (\text{H}_2\text{O})^{0,5}) - \ln(\text{LREE}) - 273,15,$$

где T^C – температура, Цельсий.

Термометрия циркона, апатита, монацита для гранитов Кожимского массива

Данные химического состава пород Кожимского массива (таблицы 1, 2) позволили определить искомые температуры: для циркона и цирконсодержащей породы температура насыщения находится в диапазоне от 749°C до 816°C, для апатита и апатитсодержащей породы – от 722°C до 856°C, для монацита и монацитсодержащей – от 762°C до 842°C (табл. 3).

Необходимо отметить, что кристаллизация того или иного минерала происходит в определенный период, который является наиболее благоприятным по термодинамической обстановке и физико-химическим особенностям минералообразующей среды. Согласно последовательности выделения ми-

Таблица 3
Температура формирования гранитов Кожимского массива, °C
Table 3
The temperature of formation of granites of the Kozhim massif, °C

Номер пробы	Температура		
	по циркону	по апатиту	По монациту
К-1	749	722	810
К-2	-	798	-
К-3	816	770	842
К-4	-	764	-
К-5	801	856	818
К-6	771	836	796
К-7	-	768	-
К-8	-	770	-
К-9	784	840	762
К-10	-	826	-
Среднее	784	795	806

нералов, которую в свое время определил М.В. Фишман с коллегами для пород Кожимского комплекса (рис. 2), первым из расплава выделялся циркон, затем апатит и на завершающем этапе гранитогенеза образовался монацит [7]. Причем наиболее интенсивная кристаллизация апатита происходила после выделения основной массы породообразующих минералов. Рассматривая гистограммы температур (рис. 3), видим, что большая часть апатита сформировалась при температурах от 750°C до 850°C.

Минерал	Магматический этап	
	ранняя стадия	поздняя стадия
циркон	■	
apatит		■
монацит		■

Рис. 2. Последовательность выделения минералов при формировании пород Кожимского массива по М.В. Фишману.

Fig. 2. The sequence of minerals in the formation of rocks of the Kozhim massif according to M.V.Fishman.

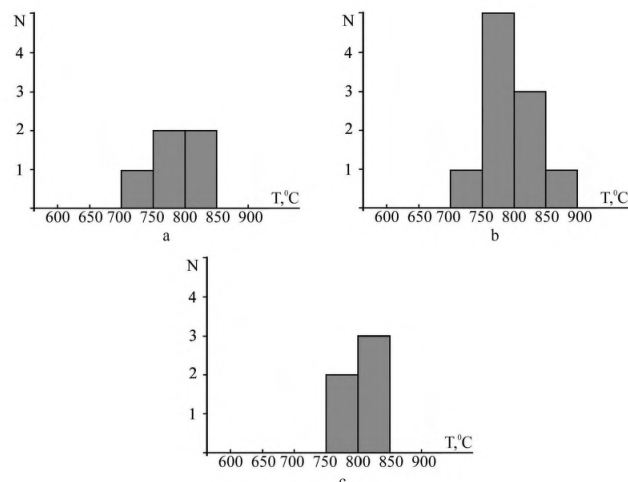


Рис. 3. Температура кристаллизации минералов и минералосодержащей породы.

Fig. 3. Crystallization temperature of minerals and mineral-containing rocks.

Этот же температурный режим характерен и для минералообразующей среды монацита, что позволяет утверждать о сохранении высокой температуры расплава в течение всего гранитогенеза. Отсутствие низкотемпературного режима в истории образования массива подтверждает выводы М.В. Фишмана и его коллег о быстром остывании расплава и, соответственно, относительной кратковременности периода формирования Кожимского массива.

Заключение

Комплексное изучение акцессорных минералов (циркона, апатита, монацита) из пород Кожимского массива с помощью термометрии насыщения Ватсона, Беа и Монтеля позволило определить, что изученные граниты являются высокотемпературными образованиями, сформировавшимися при температурах от 722°C до 856°C.

Это подтверждает более ранние выводы автора, сделанные на основе изучения морфологии циркона этого же массива с применением анализа Ж. Пюпена и Г. Тюрко [8], согласно которому становление Кожимского массива произошло при температуре от 700 °C до 900°C [9, 10]. Но в то же самое время автор отвергает данные М.В. Фишмана и его коллег, которые утверждали, что граниты Кожимского массива являются более низкотемпературными породами с температурой образования, не превышающей 720°C.

Ранее выявленная М.В. Фишманом и его коллегами последовательность кристаллизации минералов для пород Кожимского комплекса позволила предположить температуры отдельных этапов гранитообразования: температура раннего этапа, в период которого начинал выделяться циркон, не превышала 816°C. Позже при образовании апатита температуры насыщения варьировали от 722°C до 856°C. Температуры от 762°C до 842°C характерны для завершающего этапа, который сопровождался формированием монацита. Все этапы гранитогенеза изученного массива характеризуются высокими температурами, что позволяет говорить о кратковременном периоде становления Кожимского массива.

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. *Махлаев Л.В.* Гранитоиды севера Центрально-Уральского поднятия (Полярный и Приполярный Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 189 с.
2. *Пыстин А.М., Пыстина Ю.И.* Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярноуральского сегмента земной коры // Литосфера. 2008. № 11. С. 25, 38.
3. *Денисова Ю.В.* Типоморфические и типохимические особенности акцессорных цирко-

нов гранитоидов Приполярного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, 2014. № 5. С. 9–16.

4. *Harrison T.M. and Watson E.B.* The behavior of apatite during crustal anatexis: Equilibrium and kinetic considerations // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1984. Vol. 48. P. 1467–1477.
5. *Bea F., Fershtater G.B., Corretgé L.G.* The geochemistry of phosphorus in granite rocks and the effects of aluminium // *Lithos.* 1992. Vol. 48. P. 43–56.
6. *Montel J.M.* A model for monazite/melt equilibrium and application to the generation of granitic magmas // *Chem. Geol.* 1993. Vol. 110. P. 127–146.
7. *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.
8. *Pupin J.-P.* Zircon and granite petrology // *Contrib. Miner. Petrol.* 1980. Vol. 73. P. 207–220.
9. *Денисова Ю.В.* Термометрия циркона из гранитоидов Приполярного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, 2016. № 11. С. 11–22.
10. *Денисова Ю.В.* Апатит Николайшорского гранитного массива (Приполярный Урал) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, 2018. № 9. С. 24–29.

References

1. *Makhlaev L.V.* Granitoidy severa Central'no-Ural'skogo podnjatija (Poljarnyj i Pripoljarnyj Ural) [Granitoids of the North of the Central Urals uplift (the Polar and Subpolar Urals)]. Ekaterinburg: Ural Branch, RAS, 1996. 189 p.
2. *Pystin A.M., Pystina Yu.I.* Metamorfizm i granitoobrazovanie v proterozojsko-rannepaleozojskoj istorii formirovanija Pripoljarnoural'skogo segmenta zemnoj kory [Metamorphism and granite formation in the Proterozoic-Early Paleozoic history of the formation of the Circumpolar segment of the Earth crust] // *Lithosphere.* 2008. № 11. P. 25–38.
3. *Denisova Yu.V.* Tipomorficheskie i tipohimicheskie osobennosti akcessornyh cirkonov granitoidov pripoljarnogo Urala [Typomorphic and typochemical features of accessory zircons of the Subpolar Urals granitoids] // *Bull. of Inst. of Geology, Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS.* Syktyvkar, 2014. № 5. P. 9–16.
4. *Harrison T.M., Watson E.B.* The behavior of apatite during crustal anatexis: Equilibrium and kinetic considerations // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1984. Vol. 48. P. 1467–1477.
5. *Bea F., Fershtater G.B., Corretgé L. G.* The geochemistry of phosphorus in granite rocks and the effects of aluminium // *Lithos.* 1992. Vol. 48. P. 43– 56.

6. *Montel J.M.* A model for monazite/melt equilibrium and application to the generation of granitic magmas // *Chem. Geol.* 1993. Vol. 110. P. 127– 146.
7. *Fishman M.V., Yushkin N.P., Goldin B.A., Kalinin E.P.* Mineralogija, tipomorfizm i enesis akcessornyh mineralov izverzhennyh porod severa Urala i Timana [Mineralogy, typomorphism and genesis of accessory minerals of igneous rocks of the North Urals and Timan]. Moscow-Leningrad: Nauka, 1968. 252 p.
8. *Pupin J.-P.* Zircon and granite petrology // *Contrib. Miner. Petrol.* 1980. Vol. 73. P. 207–220.
9. *Denisova Yu.V.* Termometrija cirkona iz granitoidov Pripoljarnogo Urala [Thermometry of zircon from the granitoids of the Subpolar Urals] // *Bull. of Inst. of Geology, Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS.* Syktyvkar, 2016. № 11. P. 11 – 22.
10. *Denisova Yu.V.* Apatit Nikolajshorskogo granitnogo massiva (Pripoljarnyj Ural) [The apatite of the Nikolaishor granite massif (the Subpolar Urals)] // *Bull. of Inst. of Geology, Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS.* Syktyvkar, 2018. № 9. P. 24–29.

Статья поступила в редакцию 23.03.2019.