ТЕРМОМЕТРИЯ АПАТИТА ЯРОТСКОГО ГРАНИТНОГО МАССИВА (ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

Денисова Ю.В.

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, yulden777@yandex.ru

Аннотация

В работе представлены результаты изучения акцессорного апатита из пород Яротского гранитного массива. В гранитах выявлены фтор-апатиты [8] одного морфологического типа. С помощью термометрии насыщения Ватсона и уточнениями Беа и Пичеванта были определены температурные диапазоны формирования гранитов Яротского массива по апатиту. Проведено сравнение полученных температур между собой и с ранее полученными температурами для акцессорного циркона этого же массива.

Summary

The paper presents the results of studies of accessory apatite from the rocks of the Yarot granitic massif. Fluorine apatites of the same morphological type were found in granites. The temperature range of the Yarot massif granite formation was determined using the Watson, Bea and Pichavant saturation thermometry on the apatite. The comparison of the obtained temperatures with each other and with the previously obtained temperatures for the accessory zircon of the same massif was carried out.

Яротский массив, расположенный в северо-восточной части Приполярного Урала в долине р. Малая Ярота, протягивается в субмеридиональном направлении более чем на 6 км при ширине до 500 м (рис. 1). Массив, прорывающий верхнерифейские отложения мороинской свиты, сложен преимущественно массивными лейкократовыми (аляскитовыми) гранитами. Опробование гранитного массива проводилось точечным методом с отбором частных проб в количестве 5 единиц. Для каждой пробы отбирались куски неизменной породы общим весом в среднем 10-15 кг, содержание апатита в которых для Яротского массива составило в среднем 22 г/т. Акцессорный апатит этого массива представлен преимущественно жёлтыми матовыми удлинёнными кристаллами гексагонального дипирамидально-призматического габитуса. Размер кристаллов 0.10-0.45 мм, коэффициент удлинения 2-4.5. Облик минерала представлен комбинацией призмы $10\bar{1}0$ и дипирамиды $10\bar{1}1$. Поверхность граней трещиноватая. Характерными включениями являются кварц, плагиоклаз, циркон.

Для определения температуры кристаллизации апатита в работе использована термометрия насыщения Е. Ватсона [7]. Эта методика позволяет определять температуру формирования апатита и породы по распределению содержания оксида фосфора между апатитом и породой, содержащей минерал. Согласно расчётам Т. Харрисона и Е. Ватсона, уровень насыщения фосфора в металаюминиевой породе ($A/CNK < 1$), необходимый для образования апатита, зависит от содержания SiO_2 в породе и температуры:

Рис. 1. Яротский гранитный массив.

1 – слюдяно-кварцевые сланцы, порфиры, порфириты, прослои мраморов и кварцитов; 2 – терригенно-карбонатные отложения; 3 – граниты; 4 – риолиты, фельзиты; 5 – геологические границы: а – стратиграфические и магматические, б – тектонические; б – элементы залегания плоскостных структур. Массивы (цифры в кружочках): 1 – Бадьяюсский; 2 – Яротский.

$\ln D_p = (8400 + 26400 (\text{SiO}_2 - 0.5)) / T - 3.1 - 12.4 (\text{SiO}_2 - 0.5)$, $P_2O_5(\text{HW}) = 42 / D_p$, где D_p – соотношение концентрации P в апатите и расплаве, P_2O_5 , SiO_2 – весовая доля оксида фосфора, кремнезема в расплаве, масс. вес, T – температура, Кельвин.

В случае пералюминиевых пород ($A/\text{CNK} > 1$), Ф. Беа [5] и М. Пичевант [9] предлагают вносить в формулу Ватсона следующие уточнения:

$$P_2O_5(\text{Bea}) = P_2O_5(\text{HW}) \times e^{\frac{6429(A/\text{CNK}-1)}{T-273,15}}$$

или

$$P_2O_5(\text{PV}) = P_2O_5(\text{HW}) + (A/\text{CNK} - 1) \times e^{\frac{-5900}{T} - 3,22\text{SiO}_2 + 9,31}$$

На основе данных по химическому составу гранитов Яротского массива (табл. 1) и с помощью программы GCDkit 2.3 [10], автором были получены температуры насыщения для апатита по Ватсону, Беа и Пичеванту (табл. 2).

По полученным температурам для каждой методики расчёта были составлены гистограммы распределения температур формирования пород Яротского гранитного массива по апатиту.

Согласно рис. 2, гистограммы распределения температур по Ватсону и Беа подобны. При использовании формулы Ватсона, получаем, что формирование пород Яротского массива происходило при температурах от 750°С

до 950 °С. В случае дополнения Беа – полученный диапазон так же относится к высокотемпературному и включает в себя два температурных режима: от 650 °С до 800 °С и от 850 °С до 900 °С. Резко противоположный результат получен в случае уточнений Пичеванта: соответствующая гистограмма показывает три температурных режима: от 350 °С до 550 °С, от 650 °С до 700 °С и от 850 °С до 900 °С, причем, большая часть данных относится к низкотемпературной области.

Таблица 1. Химический состав гранитов Яротского массива

Компонент, масс. %	Номер пробы									
	Я-1	Я-2	Я-3	Я-4	Я-5	Я-6	Я-7	Я-8	Я-9	Я-10
SiO ₂	75.52	75.02	74.59	74.89	74.86	75.69	75.89	75.27	75.48	74.77
TiO ₂	0.14	0.37	0.16	0.22	0.29	0.18	0.19	0.21	0.16	0.31
Al ₂ O ₃	12.35	11.59	13.27	12.08	11.78	12.57	12.35	12.25	12.39	12.89
FeO	1.62	1.63	1.69	1.55	1.49	1.01	1.29	1.04	1.81	1.01
Fe ₂ O ₃	0.82	0.66	0.40	0.77	1.22	0.72	0.71	0.67	1.54	0.83
MnO	0.04	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02
MgO	0.21	0.24	0.15	0.21	0.33	0.25	0.23	0.19	0.39	0.18
CaO	0.88	0.89	0.61	0.57	0.59	0.56	0.49	0.55	0.54	0.31
Na ₂ O	3.30	3.02	3.33	3.09	3.17	3.27	3.56	3.61	3.09	3.09
K ₂ O	4.59	4.65	4.52	4.93	4.91	4.62	4.56	4.52	5.11	4.99
P ₂ O ₅	0.07	0.06	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02	0.02
ппп	0.16	0.32	0.09	0.06	0.05	0.06	0.07	0.36	0.42	0.31
Σ	99.7	98.5	98.84	98.39	98.71	98.94	99.37	98.71	100.97	98.73
A/CNK	1.029	0.997	1.051	1.054	1.015	1.103	1.057	1.035	1.068	1.167

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

Таблица 2. Температуры насыщения для апатита Яротского массива

Температура	Номер пробы										Среднее
	Я-1	Я-2	Я-3	Я-4	Я-5	Я-6	Я-7	Я-8	Я-9	Я-10	
по Ватсону, °С	918	892	754	757	757	765	818	761	814	808	804
по Беа, °С	899	892	723	724	748	702	783	739	772	700	768
по Пичеванту, °С	693	892	417	413	531	368	472	451	454	381	507

Примечание. Проба Я-2 является метаалюминиевой породой, поэтому при расчёте температур по Беа и Пичеванту для этой пробы оставлена температура по Ватсону.

Определим толерантность полученных результатов с помощью статистических методов.

При использовании различных статистических методов применительно к изучаемым выборкам необходимо проверить согласованность распределения эмпирических данных с нормальным законом с помощью критерия согласия Пирсона с заданным уровнем значимости $\alpha = 0.05$ (табл. 3) [4].

Рис. 2. Гистограммы распределения температур образования для гранитов Яротского массива по апатиту. а – по Ватсону, b – по Беа, с – по Пичеванту.

Таблица 3. Проверка гипотезы о нормальном распределении температур насыщения для апатита Яротского массива.

Гистограмма	Критерий согласия Пирсона		
	Количество интервалов	$\chi^2_{\text{расчет}}$	$\chi^2_{\text{крит}}$
I	4	2.083	3.841
II	4	2.250	3.841
III	6	2.667	7.815

Примечание. Гистограммы: I – по Ватсону; II – по Беа; III – по Пичеванту.

$\chi^2_{\text{расчет}}$ – расчётный критерий Пирсона; $\chi^2_{\text{крит}}$ – табличное значение критерия Пирсона

Для всех гистограмм выполняется неравенство $\chi^2_{\text{расчет}} < \chi^2_{\text{крит}}$, что позволяет сделать вывод о нормальном распределении исходных данных.

Гистограмма температур насыщения I имеет мономодальный характер с пиком на 750-800 °C. Два других графика являются более сложно построенными. На гистограмме II чётко выражены два резких повышения температур на интервалах 700-750 °C и 850-900 °C. При рассмотрении гистограммы III, отмечаются три пика: 450-500 °C, 650-700 °C и 850-900 °C.

Проверим с помощью метода Голдина полимодальность II и III гистограмм (табл. 4) [4]. Выдвинем гипотезу об уномодальности этих распределений.

Таблица 4. Проверка гипотезы о мономодальности распределении температур насыщения для апатита Яротского массива.

Гистограмма	Сумма всех частот	Частоты				t _{расчет}	t _{крит}
		Максимум			Минимум		
		Первый	Второй	Третий			
II	10	5	2	–	1	3.04	2.26
III	10	3	1	–	1	0.89	2.26
		3	–	1	1	0.89	2.26

Примечание. $t_{\text{расчет}}$ – расчётный критерий; $t_{\text{крит}}$ (при $q = 0.05$) – табличное значение критерия Стьюдента.

Так как для гистограммы II $t_{\text{расчет}}$ превысило $t_{\text{крит}}$, то нулевую гипотезу следует отклонить как неподтвердившуюся и принять альтернативу о наличии двух вершин для исследуемой совокупности данных. Для гистограммы III ($t_{\text{расчет}} < t_{\text{крит}}$) нулевая гипотеза о одновершинности распределения является подтвердившейся (табл. 4). Согласно гистограмме по Беа, при температурах от 800 до 850 °С кристаллизации апатита не происходила. Это может быть связано с малым объёмом выборки. График по Пичеванту утверждает, что апатиты Яротского гранитного массива образовывались только при низких температурах (от 350 до 550 °С), причем два пика в зоне высоких температур можно считать незначительными.

Необходимо отметить, что средние температуры по Ватсону и Беа значительно отличаются от средней температуры Пичеванту. Для оценки этих средних для каждой выборки определим доверительные интервалы.

Таблица 5. Доверительные интервалы для средних температур насыщения для апатита Яротского массива.

Методика расчёта	Средняя температура, °С	$t_{\text{крит}}^L$	δ	Доверительный интервал
по Ватсону	804	2.02	38	766-842
по Беа	768	2.02	46	722-814
по Пичеванту	507	2.02	105	402-612

Примечание. $t_{\text{крит}}^L$ (при $\gamma = 0.05$) – табличное значение критерия Лапласа, δ – доверительная вероятность.

Полученные доверительные интервалы для средних температур насыщения (табл. 5) подтверждают резкое отличие средней температуры насыщения по Пичеванту для апатита Яротского массива от средних температур насыщения по Ватсону и Беа.

Для уточнения значимости температурных диапазонов по каждой методике расчёта используем правило «трёх сигм», согласно которому нормально распределенная случайная величина практически не принимает значений вне интервала, и модификации это правила (табл. 6).

Как мы видим, начальные диапазоны температур насыщения для апатита по Ватсону и Беа определены достаточно точно, в отличие от температур по Пичеванту. Даже при $\gamma_1 = 99.72\%$ расчётный интервал не смог охватить все начальные температуры по Пичеванту.

Таким образом, можно сделать вывод, что уточнения Пичеванта формулы Ватсона для пералюминиевых пород в случае гранитов не являются корректными.

Таблица 6. Расчётные интервалы для средних температур насыщения для апатита Яротского массива при различных уровнях вероятности.

Методика расчёта	Средняя температура, °C	Начальный интервал	$T_{cp} \pm 3\sigma$ ($\gamma_1 = 99.72\%$)	$T_{cp} \pm 2\sigma$ ($\gamma_2 = 95.44\%$)	$T_{cp} \pm \sigma$ ($\gamma_2 = 68.26\%$)
по Ватсону	804	754-918	627-931	686-922	745-863
по Беа	768	700-899	551-917	624-913	696-840
по Пичеванту	507	368-892	15-861	179-836	343-671

Примечание. T_{cp} – средняя температура, °C; σ – среднее квадратическое отклонение.

Согласно приведённым выше данным, формирование пород Яротского массива проходило при высоких температурах. Термометрия насыщения Ватсона по апатиту определяет этот диапазон как 754-918°C, проведенная корректировка температур по Беа даёт более расширенный интервал – 700-899°C. Эти данные подтверждают полученные ранее автором температуры с помощью термометрии насыщения Ватсона (806-926°C) и классического эволюционно-морфологического анализа Пюпена (750-900°C) для циркона этого же массива [1, 2, 3, 6]. На основании этого можно утверждать, что термометрия насыщения Ватсона и уточнённая формула Беа для апатита даёт такую же точную информацию об эволюции температурного режима в ходе образования гранитов, как термометрии насыщения Ватсона 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.

Список литературы

1. Денисова Ю.В. Термометрия циркона из гранитоидов Приполярного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар. № 11. 2016. С. 11-22.
2. Денисова Ю.В., Вихоть А.Н. Термометрия циркона Яротского гранитного массива (Приполярный Урал) // Минералы: строение, свойства, методы исследования. Екатеринбург. № 10. 2018. С. 57-58.
3. Денисова Ю.В. Апатит Николайшорского гранитного массива (Приполярный Урал) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар. 2018. в печати.

4. Овчинников Л.Н., Коган Р.Н. О применении методов математической статистики в абсолютной геохронологии // Статистические методы геологических исследований. 1971. Вып. 2. 90 с.
5. Bea F., Fershtater G.B., Corretgé L.G. The geochemistry of phosphorus in granite rocks and the effects of aluminium // *Lithos*. 1992. V. 48. P. 43-56.
6. Denisova Y.V., Vikhot A.N. Zircon thermometry of the Yarot granite massif (the Subpolar Ural) // «Minerals: structure, properties, methods of investigation - 9th Geoscience Conference for Young Scientists, Ekaterinburg, Russia, February 5-8, 2018» в рамках серии «Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences». в печати.
7. 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.
8. Pasero M., Kampf A.R., Ferraris C. et al. Nomenclature of the apatite supergroup minerals // *Europ. J. Mineral*. 2010. V. 22. P. 163-179.
9. Pichavant M., Montel J.M., Richard L.R. Apatite solubility in peraluminous liquids: experimental data and extension of the Harrison - Watson model // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1992. V. 56. P. 3855-3861.
10. The Comprehensive R Archive Network (<https://cran.r-project.org/>).