



УДК 552.321.1+552.113+550.425+549.753.11(234.851)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.54.132>

Особенности кристаллизации апатита из гранитов Кузьпуаюского массива (Приполярный Урал)

Ю. В. Денисова*

*Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар,
Россия*

Аннотация. Приводятся результаты исследования апатита из пород Кузьпуаюского массива, относящегося к сальнеро-маньхамбовскому гранитоидному комплексу Приполярного Урала. В ходе исследования выявлен апатит гексагонального призматического и гексогонального дипирамидально-призматического облика. Детальное изучение морфологии и химического состава минерала позволило установить не только два основных морфологических апатита с разделением на 5 подтипов, но и эволюцию кристаллов. На ранних магматических стадиях из обогащенного фтором высокотемпературного (от 893 °C) расплава кристаллизуются таблитчатые апатиты II-типа с низким содержанием воды. По мере эволюции системы и увеличения активности водных флюидов на поздних стадиях при более низких температурах (до 727 °C) формируются призматические апатиты I-типа, обогащенные водой и натрием.

Ключевые слова: апатит, гранит, температура насыщения, Кузьпуаюский массив, Приполярный Урал.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского литосферного сегмента» – 122040600012-2.

Для цитирования: Денисова Ю. В. Особенности кристаллизации апатита из гранитов Кузьпуаюского массива (Приполярный Урал) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 54. С. 132–148. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.54.132>

Original article

Features of Apatite Crystallization from Granites of the Kuzpuayu Massif (the Subpolar Urals)

Yu. V. Denisova*

*Institute of Geology named after academician N. P. Yuskin Komi SC UB RAS, Syktvykar,
Russian Federation*

Abstract. The study presents the results of research on apatite from rocks of the Kuzpuayu massif, which belongs to the Salnero-Mankhambov granitoid complex of the Subpolar Urals. The investigation identified apatite with hexagonal prismatic and hexagonal dipyramidal-prismatic habits. A detailed study of the mineral's morphology and chemical composition made it possible to establish two main morphological types of apatite with a division into five subtypes, and to trace the evolution of the crystals. During the early magmatic stages, tabular type II apatites with low water content crystal-

lized from a high-temperature (from 893 °C), fluorine-enriched melt. As the system evolved and the activity of aqueous fluids increased during later stages at lower temperatures (down to 727 °C), prismatic type I apatites, enriched in water and sodium, were formed.

Keywords: apatite, granite, saturation temperature, the Kuzpuyau massif, the Subpolar Urals.

For citation: Denisova Yu.V. Features of Apatite Crystallization from Granites of the Kuzpuyau Massif (the Subpolar Urals). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2025, vol. 54, pp. 132-148. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.54.132> (in Russian)

Введение

Апатит, являясь одним из самых распространенных минералов, отмечается в породах различного состава, возраста и генезиса. Минерал встречается в эффузивных и интрузивных кислых, основных и щелочных, осадочно-метаморфических, контактово-метасоматических породах. Подобное распространение, согласно Я. Э. Юдовичу [Юдович, Кетрис, Рыбина, 2022], указывает на неспособность породообразующих минералов удерживать в своей кристаллической решетке большое количество фосфора. Изучение типоморфических и типохимических особенностей этого минерала позволяет решать многие вопросы геологии, в том числе получать данные и по температуре образования содержащей его породы.

Акцессорный апатит является распространенным минералом в магматических породах Приполярного Урала. Причем концентрация этого минерала может сильно варьироваться от 10 г/т, отмечаемых в породах кожимского комплекса, до 800 г/т для гранитов сальнеро-маньхамбовского комплекса [Минералогия ... , 1968], представителем которого является Кузпуаюский гранитный массив [Пыстин, Пыстина, 2008]. На сегодняшний день по морфологии и химическому составу апатита из этого массива имеются только общие данные, полученные в результате обширнейшего изучения акцессорных минералов магматических пород севера Урала под руководством М. В. Фишмана, которое также позволило установить исследователям, что состав породы рассматриваемого массива соответствует высокотемпературной эвтектике ($t > 720$ °C). Дополнительные данные о температурах образования исследованных гранитов можно найти только в более ранних статьях автора настоящей работы, содержащих результаты определения температур насыщения по монациту [Денисова, 2021], а также установление температур кристаллизации циркона с использованием эволюционно-кристалломорфологического анализа [Денисова, 2020].

Целями представленной работы являются выявление характерных морфологических типов апатита из гранитов Кузпуаюского массива (Приполярный Урал), определение температурного диапазона образования апатита и гранита на основе данных химического состава породы.

Геологическая и петрографическая характеристика Кузпуаюского массива

Кузпуаюский массив (Приполярный Урал), отмечаемый в бассейне руч. Кузпуаю, – штокообразное гранитное тело, прорывающее верхнерифейские отложения хобейнской и мороинской свит, представленные преимущественно

но хлорит-мусковит-альбит-кварцевыми сланцами (рис. 1). Исследованные граниты представляют собой плотные среднезернистые образования розового цвета с хорошо выраженным зеленовато-серым оттенком. Структура гранитов преимущественно гранитовая, в отдельных случаях она может изменяться от неравномернозернистой гипидиоморфной до среднезернистой аллотриоморфной. Согласно классификации Б. Чаппела [Loiselle, Wones, 1979], породы относятся к А-типу [Махлаев, 1996].

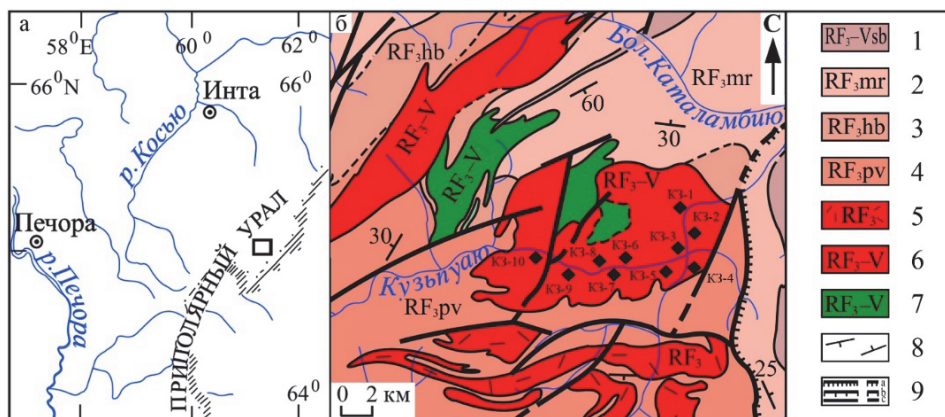


Рис. 1. а – Карта района исследований (квадрат – район исследования); б – Кузьюпауский гранитный массив [Возрастные ..., 2022].
Обозначения. Свиты: 1 – саблегорская (RF_3-V), 2 – мороинская (RF_3), 3 – хобейнская (RF_3), 4 – пуйвинская (RF_3); гранитные комплексы: 5 – кожимский (RF_3), 6 – сальнеро-маньхамбовский (RF_3-V), 7 – хаталамбинский габбро-долеритовый комплекс (RF_3-V), 8 – элементы залегания плоскостных структур; 9 – тектонические границы:
а – шарьяжи и надвиги, б – взбросы и сбросы, с – крутопадающие дизъюнктивы.
КЗ-п (п – 1–10) – точки отбора образцов

Породообразующие минералы представлены калиевым полевым шпатом (до 50 %), плагиоклазом (до 20 %), кварцем (до 30 %), слюдами (до 5 %) (преимущественно – биотит, реже – мусковит) (рис. 2, а–в). Процентные содержания этих минералов указывают на то, что породы Кузьюпауского массива являются лейкогранитами (2–5 % биотита), в отдельных частях массива содержание этой слюды может составлять менее 1 %, что позволяет рассматривать эти породы как аляскииты. Ортоклаз, занимающий наибольшую часть основной массы породы, характеризуется умеренной примесью альбитового компонента и следовой примесью анортитового компонента ($Ab_{8,9-17,1} An_{0,2-0,9} Or_{83,4-90,2}$), что может быть следствием микропертитового распада (табл. 1). Этот минерал отмечается также в виде вкрапленников. Характерными включениями являются кристаллы кислого плагиоклаза. Плагиоклаз отмечается в общей массе, в виде вкрапленников, гипидиоморфных зерен альбита и олигоклаза, которые являются сильно серицитизированными, пелитизированными (рис. 2, в, г), а также в виде жилок чистого альбита (рис. 2, з, и). Породообразующий минерал (основная масса породы) представляет собой натриевый

плагиоклаз с составом, близким к альбиту ($Ab_{91,2-94,9}$ $An_{3,4-5,8}$ $Or_{1,1-4,1}$) (см. табл. 1). Кварц в гранитах Кузьпуаюского массива встречается в виде округлых ксеноморфных зерен (рис. 2, *е*). Биотит (рис. 2, *з, ж*) отмечается в виде мелких чешуек коричнево-зеленого, реже темно-коричневого цвета. Также наблюдается мусковит (рис. 2, *з, е, ж*). Минерал, являясь слюдой вторичного генезиса, встречается обычно в плагиоклазе в виде скоплений чешуек светло-зеленого цвета.

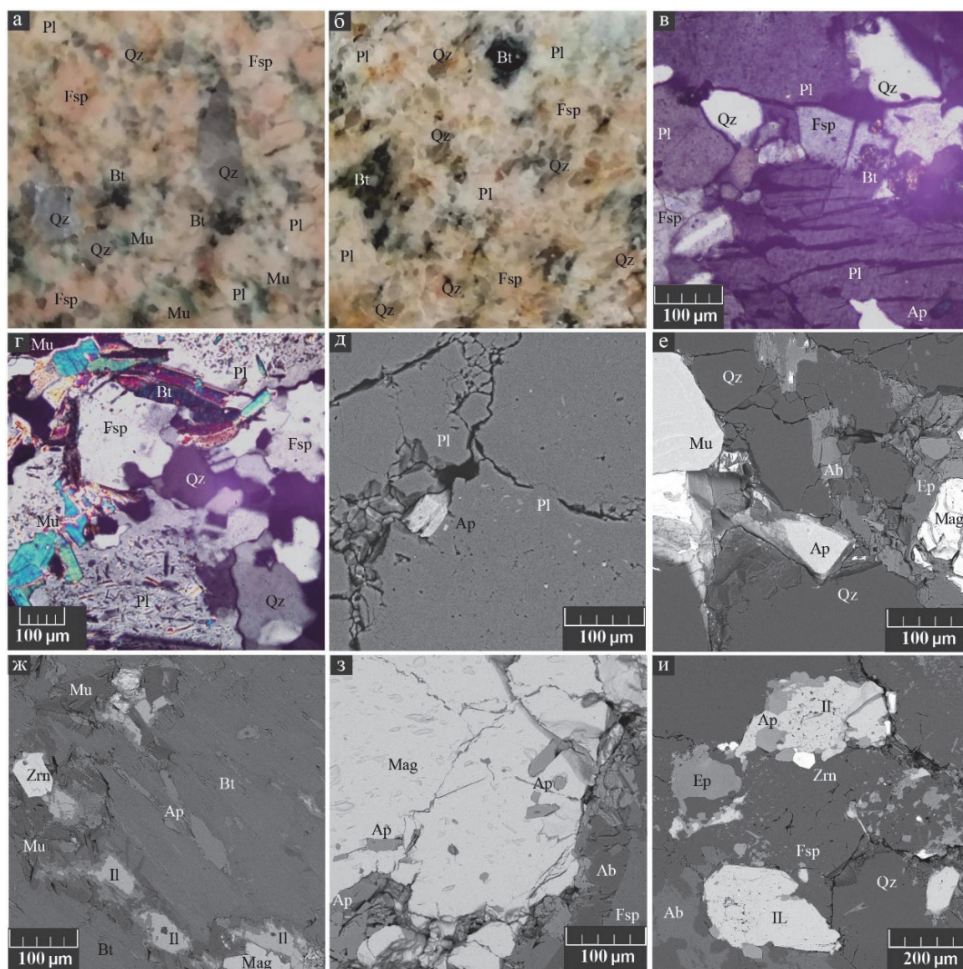


Рис. 2. Аншлифы (*а, б*), шлифы (*в, г* – с анализатором) и BSE-изображения (*д–и*) гранитов Кузьпуаюского массива. Минералы (сокращение по ФГУП «ВСЕГЕИ»): Pl – плагиоклаз, Kfs – калиевый полевой шпат, Qz – кварц, Bt – биотит, Mu – мусковит, Ab – альбит, Ap – апатит, Mag – магнетит, Il – ильменит, Ep – эпидот, Zrn – циркон

Таблица 1

Мольные содержания минералов полевых шпатов из гранитов Кузьпуаюского массива (Приполярный Урал), мас. %

Компонент	Номер пробы									
	КЗ-1	КЗ-2	КЗ-3	КЗ-4	КЗ-5	КЗ-6	КЗ-7	КЗ-8	КЗ-9	КЗ-10
Калиевый полевой шпат										
CaO	0,13	0,18	0,15	0,05	0,13	0,15	0,09	0,07	0,11	0,09
Na ₂ O	1,23	1,02	1,12	1,32	1,89	2,15	1,09	1,52	0,98	1,89
K ₂ O	14,38	15,62	13,11	15,12	15,44	15,71	14,78	12,88	13,89	14,78
Ab	11,4	8,9	11,4	11,7	15,6	17,1	10,0	15,1	9,6	16,2
An	0,7	0,9	0,8	0,2	0,6	0,7	0,5	0,4	0,6	0,4
Or	87,9	90,2	87,8	88,1	83,8	82,2	89,5	84,5	89,8	83,4
Плагиоклаз (основная масса)										
CaO	0,78	0,72	0,78	0,61	0,65	0,62	0,71	0,56	0,69	0,52
Na ₂ O	8,89	7,78	6,94	7,89	8,12	9,15	7,52	8,89	9,22	7,89
K ₂ O	0,42	0,53	0,12	0,34	0,54	0,23	0,41	0,17	0,55	0,44
Ab	92,6	91,2	93,2	93,4	91,9	94,9	91,9	95,5	92,5	93,2
An	4,5	4,7	5,8	4,0	4,1	3,6	4,8	3,3	3,8	3,4
Or	2,9	4,1	1,1	2,6	4,0	1,6	3,3	1,2	3,6	3,4

Характерными акцессорными минералами являются циркон, апатит, титанит, гранат, ортит. Содержание акцессорного апатита в гранитах Кузьпуаюского массива может достигать 400 г/т, что является типичной концентрацией минерала для приконтактных зон массива [Минералогия ... , 1968]. Акцессорный апатит наблюдается в виде включений во всех породообразующих минералах (плагиоклазе (рис. 2, в), в биотите (рис. 2, ж), в отдельных рудных (магнетите (рис. 2, з), ильмените (рис. 2, и)), реже в акцессорных минералах (цирконе, титаните, ортите). Нередки случаи, когда более поздний апатит содержит включения раннего апатита (рис. 3).

Методы исследования

Петрографическое изучение гранитов Кузьпуаюского массива (Приполярный Урал) проводилось на базе штучных проб в количестве 10 единиц, исследование породообразующих минералов – в шлифах под поляризационным микроскопом БиОптик СР-400. Морфология и химический состав акцессорного апатита изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа Vega3 Tescan (ЦКП «Наука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН, аналитики А. С. Шуйский, Е. М. Тропников). Анализ морфологических особенностей апатита осуществлялся на базе зерен и наиболее сохранившихся обломков минерала (пробы КЗ-1, КЗ-5, КЗ-10), нанесенных на токопроводящий графитовый скотч, выявление геохимических особенностей изученного минерала – на основе полированных шлифов из этих же образцов.

Расчеты температур образования апатита и гранита Кузьпуаюского массива проводились с использованием программы GCDkit 2.3 [Hornik, 2012] на базе термометрии насыщения Т. Харрисона и Е. Уотсона [Harrison, Watson, 1984], в основе которой лежит взаимосвязь между температурой кристалли-

зации минерала и породы и степенью накопления фосфора в материнском расплаве:

$$\ln D_P = (8400 + 26400 \cdot (\text{SiO}_2 - 0,5)) / T - 3,1 - 12,4 \cdot (\text{SiO}_2 - 0,5),$$

$$D_P = 42 \text{ (мас. \%)} / \text{P}_2\text{O}_5 \text{ (HW)},$$

где D_P – соотношение концентрации фосфора в апатите и расплаве; P_2O_5 , SiO_2 – весовая доля оксида фосфора, кремния в расплаве, мас. %; T – температура, Кельвин.

Ф. Беа [Bea, Fershtater, Corretgé, 1992] и М. Пишаваном [Pichavant, Montel, Richard, 1992] предлагается добавлять корректирующий коэффициент к содержанию оксида фосфора в изучаемой породе, в случае отнесения ее к пералюминиевой разновидности ($A/\text{CNK} > 1$):

$$\text{P}_2\text{O}_5(\text{B}) = \text{P}_2\text{O}_5(\text{HW}) \cdot \exp(6429(A/\text{CNK})/T),$$

$$\text{P}_2\text{O}_5(\text{PV}) = \text{P}_2\text{O}_5(\text{HW}) + (A/\text{CNK} - 1) \cdot \exp(-5900/T - 3,22 \cdot \text{SiO}_2 + 9,31).$$

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

Петрохимические особенности гранитов Кузьпуаюского массива

Анализ содержаний главных элементов гранитов Кузьпуаюского массива (табл. 2) показал, что рассмотренные породы являются нормально- и умереннощелочными лейкогранитами ($\text{SiO}_2 > 73$ мас. %, $9 \text{ мас. \%} > \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} > 6 \text{ мас. \%}$). По количеству оксида калия изученные граниты отмечаются как умереннокалиевые, так и высококалиевые [Chappel, Whitte, 1974]. Отношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ составляет более 0,25, что является показателем калиевого типа породы. Значение апаитового индекса ($K_a = (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ (в мас. %)) находится в пределах от 0,57 до 0,73, т. е. не превышает единицы, что позволяет утверждать, что все количество щелочных металлов при образовании гранитов концентрировалось в полевых шпатах. Согласно коэффициенту глиноземистости ($al' = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO})$ (в мас. %)), изученные образцы являются весьма высокоглиноземистыми образованиями, так как этот параметр находится в пределах от 2 до 10. Для коэффициента железистости ($f = \text{FeO} / (\text{FeO} + \text{MgO})$ (в мас. %)) также характерен небольшой разброс значений, а именно, от 0,68 до 0,85. Индекс Шенда ($A/\text{CNK} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ (в мол.)) в среднем составляет 1,07, что указывает на металюминевый и слабо пералюминевый состав изученных гранитов [Ефремова, Стафеев, 1985].

Для выявления возможных взаимосвязей между отдельными оксидами главных элементов определены коэффициенты корреляции. Сильная связь между выбранными элементами характеризуется попаданием индикатора в диапазон от 0,7 до 1, средняя (на взаимосвязь элементов оказывают влияние посторонние факторы) – $0,5 \geq r > 0,7$. Также можем отметить прямую ($r > 0$ – увеличение содержания одного элемента влечет за собой увеличение концентрации второго) или обратную ($r < 0$ – содержание второго элемента в рассмотренной паре уменьшается при росте содержания первого) [Математическая ... , 2001; Справочник ... , 1987].

Таблица 2

Содержание петрогенных элементов в гранитах Кузьпуаюского массива
(Приполярный Урал), мас. %

Оксид	Номер пробы										Среднее значение
	КЗ-1	КЗ-2	КЗ-3	КЗ-4	КЗ-5	КЗ-6	КЗ-7	КЗ-8	КЗ-9	КЗ-10	
SiO ₂	76,33	76,56	76,81	76,87	77,08	77,24	78,88	77,59	77,81	77,33	77,25
TiO ₂	0,16	0,22	0,34	0,52	0,45	0,14	0,55	0,39	0,31	0,24	0,33
Al ₂ O ₃	12,18	11,63	12,47	11,87	11,75	12,02	11,28	11,48	11,78	12,08	11,85
FeO	1,08	0,45	1,09	1,11	0,95	1,07	1,04	0,99	1,10	0,92	0,98
Fe ₂ O ₃	0,82	1,88	0,75	1,55	0,92	0,98	0,78	1,38	0,89	0,52	1,05
MnO	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,00	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
MgO	0,24	0,21	0,19	0,33	0,21	0,21	0,18	0,22	0,19	0,18	0,22
CaO	0,59	0,29	0,22	0,38	0,51	0,49	0,39	0,22	0,23	0,45	0,38
Na ₂ O	4,34	4,03	4,22	3,48	3,18	3,65	3,13	3,15	3,01	3,22	3,54
K ₂ O	3,88	4,51	4,09	3,89	4,15	4,65	3,33	3,78	5,08	4,99	4,24
P ₂ O ₅	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
ппп	0,25	0,19	0,02	0,06	0,73	0,03	0,32	0,72	0,03	0,09	–
Сумма	99,91	100,01	100,25	100,1	99,99	100,51	99,92	99,96	100,46	100,05	–
K ₂ O/Na ₂ O	0,89	1,12	0,97	1,12	1,31	1,27	1,06	1,20	1,69	1,55	1,22
K ₂ O+Na ₂ O	8,22	8,54	8,31	7,37	7,33	8,30	6,46	6,93	8,09	8,21	7,78
Fe ₂ O ₃ + FeO	1,90	2,33	1,84	2,66	1,87	2,05	1,82	2,37	1,99	1,44	2,03
K _a	0,67	0,73	0,67	0,62	0,62	0,69	0,57	0,60	0,69	0,68	0,81
al'	5,69	4,58	6,14	3,97	5,65	5,32	5,64	4,43	5,40	7,46	5,43
F	0,82	0,68	0,85	0,77	0,82	0,84	0,85	0,82	0,85	0,84	2,03
A/CNK	0,99	0,97	1,06	1,12	1,10	1,01	1,05	1,19	1,08	1,19	1,08

Используя петрогенные пары Харкера [Harker, 1909] (табл. 3), установим основные петрохимические особенности породы. Наиболее сильная взаимосвязь отмечается между содержанием кремнезема и концентрациями Al₂O₃, Na₂O, а также K₂O+Na₂O. Оксиды алюминия, калия и натрия сконцентрированы в полевых шпатах, причем калиевая часть индикатора K₂O+Na₂O характеризует поведение ортоклаза, по натриевой части можно судить о плагиоклазе. Согласно полученным коэффициентам корреляции, при увеличении содержания кремнезема снижается общая степень щелочности ($r(\text{SiO}_2, \text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}) = -0,7$), глиноземистости ($r(\text{SiO}_2, \text{al}') = -0,6$) за счет уменьшения количества плагиоклаза ($r(\text{SiO}_2, \text{Na}_2\text{O}) = -0,7$, $r(\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3) = -0,7$) при относительно постоянном содержании калиевого полевого шпата в породе. В меньшей степени при повышении концентрации SiO₂ происходит уменьшение и степени железистости ($r(\text{SiO}_2, \text{Fe}_2\text{O}_3) = -0,6$, $r(\text{SiO}_2, f) = -0,6$). Учитывая, что в гранитах Кузьпуаюского массива Fe₂O₃ распределен между плагиоклазом, калиевым полевым шпатом, биотитом, мусковитом, магнетитом, можно предположить, что повышение содержания кремнезема приведет к уменьшению примеси окисла железа в породообразующих минералах и снижению концентрации магнетита в породе. Единственным петрогенным оксидом, содержание которого увеличивается при повышении уровня кремнезема в породе, является TiO₂ ($r(\text{SiO}_2, \text{TiO}_2) = 0,5$). Этот оксид главным образом входит в качестве примеси в биотит: повышение содержания кремнезема в граните может привести к повышению титанистости биотита [Макрыгина, 2011; Петрохимический ..., 2008; Остапенко, 1995].

Таблица 3

Коэффициенты корреляции между петрогенными оксидами и их вариациями для гранитов Кузьпуаюского массива (Приполярный Урал)

Оксид	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O+Na ₂ O	K ₂ O/Na ₂ O	K _a	A/CNK
SiO ₂	1	0,5	-0,7	-0,2	-0,7	-0,7	0,3	0,2	-0,1
P ₂ O ₅	-0,3	-0,1	0,4	-0,2	0,5	0,1	-0,5	0	-0,5
Оксид	MnO	MgO	CaO	P ₂ O ₅	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ +FeO	f	al'
SiO ₂	0	-0,4	0,2	-0,3	0,3	-0,6	-0,2	-0,6	0,5
P ₂ O ₅	-0,3	0,1	0,3	1	0,1	0	0	0	0

Среди минералов фосфора в кузьпуаюских гранитах отмечаются такие акцессорные минералы, как апатит, монацит и ксенотим. Причем последние два – в крайне мизерных содержаниях, преимущественно в виде включений в апатите, что позволяет рассматривать апатит как основной концентратор фосфора. На основе расчетных r можно предположить, что при повышении в минеральном составе процента содержания плагиоклаза существует вероятность повышения количества апатита ($r(\text{P}_2\text{O}_5, \text{Na}_2\text{O}) = 0,5$). Отношение щелочных металлов ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$) характеризует соотношение калиевого и натриевых шпатов в породе. При рассмотрении взаимосвязи оксида фосфора с этим отношением отмечаем наличие обратной средней связи между компонентами ($r(\text{P}_2\text{O}_5, \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}) = -0,5$), т. е. при увеличении процентного содержания ортоклаза в породе относительно плагиоклаза наблюдается тенденция к снижению содержания апатита.

Морфология и химический состав апатита из гранитов Кузьпуаюского массива

В породах Кузьпуаюского гранитного массива апатит встречается в виде белых и серых (иногда желто-серых) полупрозрачных и непрозрачных кристаллов. Размер зерен составляет 0,1–0,5 мм при коэффициенте удлинения 2–4 (редко до 8). Все изученные минералы можно разделить на два главных типа: I-apatит, характеризующийся наличием пирамиды, и II-apatит, главную роль в облике которого играет пинакоид. При этом в каждом типе минерала установлены подтипы, общее количество которых составило 5. Образование апатита протекает со сменой морфологии кристаллов от дипирамидально-призматической к гексогонально-призматической (рис. 3).

Рассмотрим каждый тип подробнее. К апатиту I-типа были отнесены кристаллы с призмой (1010) и пирамидой (1011), характеризующиеся полным отсутствием пинакоида (0001) (подтип 1, рис. 4, 1) или его слабым развитием (подтип 2, рис. 4, 2). Это обычно полупрозрачные призматические и



Рис. 3. Поздний апатит с включением раннего апатита (Кузьпуаюский массив, Приполярный Урал)

длиннопризматические кристаллы с множественными включениями биотита, кварца, плагиоклаза, в результате чего зерна приобретают серую окраску. У апатита II-типа хорошо развит пинакоид (0001) при полном отсутствии каких-либо пирамид (подтип 5, рис. 4, 5), слабом развитии пирамиды (1121) (подтип 4, рис. 4, 3) или пирамид (1121), (1011) (подтип 3, рис. 4, 4). Это преимущественно белые полупрозрачные короткопризматические зерна с включениями циркона, апатита, биотита, кварца, мусковита, титанита, ортита.

Выявленные подтипы апатита не только характеризуются особенностями морфологии, но и в совокупности образуют непрерывную последовательность кристаллов, демонстрирующую закономерное изменение габитуса от изометричного к призматическому, что может быть связано с изменением физико-химических условий при образовании гранита Кузьпуаюского массива. Согласно Й. Раковану и Н. М. Пиатаку [Rakovan, Piatak, 2007], пирамиды (1011) доминируют в облике апатита при более высоких скоростях роста, пинакоид (0001) начинает проявляться в габитусе минерала при условиях, близких к равновесию (более низкие скорости роста).

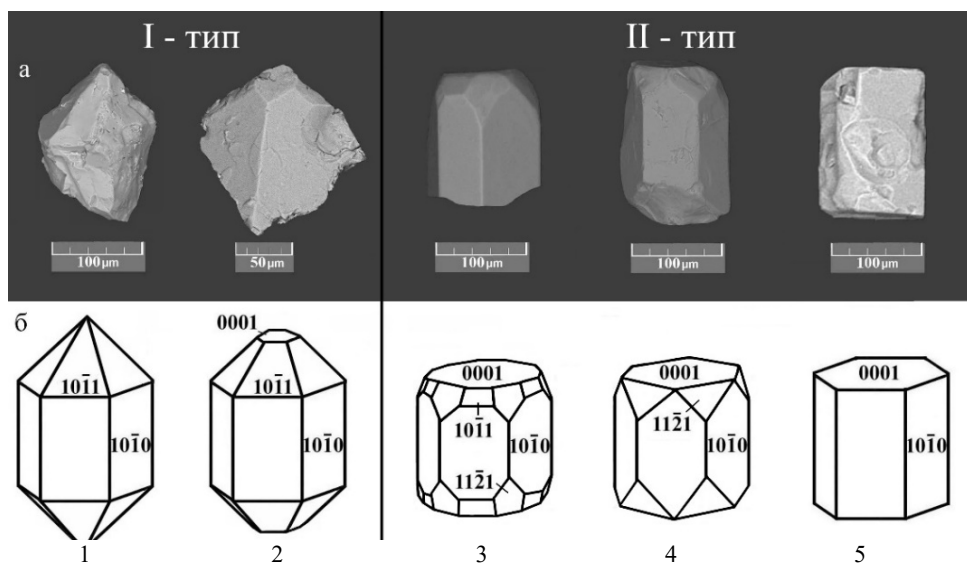


Рис. 4. Морфологический ряд апатита из гранитов Кузьпуаюского массива (Приполярный Урал). SE-изображения минералов (а) и их идеальные формы (б)

Изучение химического состава апатита из гранитов Кузьпуаюского массива показало, что изученные минералы являются фторапатитом (табл. 4).

При кристаллизации апатита содержание оксида кальция и фосфора в расплаве оставалось практически неизменным (разница между средними минимальным и максимальным содержанием этих оксидов составляет менее 1 %). Наибольшие содержания оксида натрия отмечаются у апатитов подтипов 1 и 2, наименьшие – у апатитов подтипов 4 и 5. Наибольшие концентрации фтора наблюдаются у апатита подтипа 5, наименьшие – апатита подтипа 1.

Таблица 4

Выборочные представительные анализы апатитов Кузьпуаюского массива
(Приполярный Урал), мас. %

Подтип апатита	№	Оксид							Сумма	Элемент, %		F/Cl
		P ₂ O ₅	SiO ₂	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O		F	Cl	
1	1	43,02	0,28	0,94	0,08	55,43	0,08	0,16	99,99	2,02	0,11	18,36
	2	43,02	0,29	0,65	0,08	55,67	0,11	0,12	99,94	1,98	0,11	18,00
	3	43,04	0,26	0,89	0,04	55,42	0,12	0,14	99,91	2,01	0,11	18,27
	4	42,25	0,27	1,01	0,07	56,12	0,07	0,13	99,92	1,89	0,10	18,90
	5	43,55	0,31	0,72	0,04	55,08	0,09	0,14	99,93	1,99	0,11	18,09
	6	43,17	0,29	0,69	0,04	55,52	0,14	0,11	99,96	2,03	0,12	16,92
Среднее	—	43,01	0,28	0,82	0,06	55,54	0,10	0,13	—	1,99	0,11	18,09
2	7	42,97	0,32	1,03	0,07	55,47	0,08	0,11	100,05	2,04	0,11	18,55
	8	43,22	0,28	0,69	0,03	55,49	0,09	0,15	99,95	2,18	0,12	18,17
	9	42,65	0,29	0,47	0,05	56,31	0,11	0,11	99,99	2,27	0,12	18,92
	10	42,56	0,25	0,59	0,05	56,27	0,09	0,12	99,93	2,17	0,13	16,69
	11	42,49	0,25	1,02	0,04	56,03	0,07	0,14	100,04	2,23	0,12	18,58
	12	42,26	0,29	0,98	0,07	56,11	0,08	0,12	99,91	2,24	0,14	16,00
Среднее	—	42,69	0,28	0,80	0,05	55,95	0,09	0,13	—	2,19	0,12	17,82
3	13	42,69	0,28	0,97	0,07	55,81	0,11	0,11	100,04	2,33	0,13	17,92
	14	42,97	0,26	0,63	0,03	55,80	0,13	0,12	99,94	2,44	0,13	18,77
	15	42,77	0,28	0,95	0,09	55,72	0,13	0,08	100,02	2,41	0,13	18,54
	16	42,69	0,29	0,65	0,07	56,12	0,09	0,10	100,01	2,44	0,13	18,77
	17	43,09	0,27	0,63	0,06	55,85	0,11	0,13	100,14	2,55	0,14	18,21
	18	43,02	0,29	0,77	0,08	55,78	0,11	0,13	100,18	2,59	0,12	21,58
Среднее	—	42,87	0,28	0,77	0,07	55,85	0,11	0,11	—	2,46	0,13	18,97
4	19	43,12	0,27	0,56	0,05	55,86	0,12	0,08	100,06	2,56	0,15	17,07
	20	42,47	0,26	0,99	0,06	55,96	0,14	0,06	99,94	2,44	0,13	18,77
	21	43,01	0,31	0,75	0,06	55,73	0,12	0,03	100,01	2,71	0,15	18,07
	22	42,55	0,27	0,62	0,06	56,22	0,11	0,08	99,91	2,55	0,15	17,00
	23	43,51	0,26	0,61	0,08	56,01	0,09	0,04	100,60	2,75	0,15	18,33
	24	43,35	0,29	0,73	0,09	55,85	0,11	0,06	100,48	2,70	0,13	20,76
Среднее	—	43,00	0,28	0,71	0,07	55,94	0,12	0,06	—	2,62	0,14	18,33
5	25	42,85	0,29	0,73	0,04	55,88	0,09	0,04	99,92	2,71	0,15	18,07
	26	42,72	0,29	0,64	0,07	56,03	0,11	0,06	99,92	2,96	0,16	18,50
	27	43,02	0,26	0,59	0,06	55,82	0,09	0,03	99,87	2,88	0,16	18,00
	28	42,73	0,29	0,92	0,09	55,77	0,11	0,05	99,96	2,98	0,16	18,63
	29	43,07	0,27	0,73	0,08	56,05	0,09	0,04	100,33	3,02	0,14	21,57
	30	43,75	0,28	0,81	0,08	56,31	0,11	0,05	101,39	2,95	0,15	19,67
Среднее	—	43,02	0,28	0,74	0,07	55,98	0,10	0,05	—	2,92	0,15	19,07

Рассматривая соотношение стехиометрических индексов фтора и гидроксилальной группы (табл. 5), отмечаем, что F/OH увеличивается от апатита подтипа 1 (F/OH \approx 1) до апатита подтипа 5 (F/OH \approx 3). Отмечаемые в апатите подтипа 1 умеренные количества F и OH указывают на кристаллизацию из расплава с умеренной активностью HF и высокой активностью H₂O, что типично для поздних магматических или ранних гидротермальных стадий эволюции гранитных интрузий. Высокие содержания кальция и фосфора все же свидетельствуют о магматической природе этих апатитов. Рассматриваемый подтип апатита, согласно квалификационной диаграмме (рис. 5), относится к гидроксил-фторапатиту (переходный тип) и гидроксилапатиту.

Таблица 5

Кристаллохимические формулы для апатитов Кузьяуяского массива (Приполярный Урал)

Подтип	№	Кристаллохимическая формула апатита	[F]/[ОН]
1	1	$(\text{Ca}_{10,09}\text{Na}_{0,06}\text{Fe}^{2+}_{0,14}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,02})(\text{P}_{6,07}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,06}\text{Cl}_{0,03}\text{OH}_{0,99})$	1,08
	2	$(\text{Ca}_{9,80}\text{Na}_{0,04}\text{Fe}^{2+}_{0,09}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{5,98}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,03}\text{Cl}_{0,03}\text{OH}_{1,02})$	1,01
	3	$(\text{Ca}_{9,76}\text{Na}_{0,04}\text{Fe}^{2+}_{0,12}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{5,99}\text{Si}_{0,04})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,05}\text{Cl}_{0,03}\text{OH}_{1,01})$	1,04
	4	$(\text{Ca}_{9,94}\text{Na}_{0,04}\text{Fe}^{2+}_{0,14}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,02})(\text{P}_{5,91}\text{Si}_{0,04})\text{O}_{25}(\text{F}_{0,99}\text{Cl}_{0,03}\text{OH}_{1,06})$	0,93
	5	$(\text{Ca}_{9,68}\text{Na}_{0,04}\text{Fe}^{2+}_{0,10}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,02})(\text{P}_{6,05}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,03}\text{Cl}_{0,03}\text{OH}_{1,02})$	1,01
	6	$(\text{Ca}_{9,69}\text{Na}_{0,03}\text{Fe}^{2+}_{0,09}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{5,95}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,05}\text{Cl}_{0,03}\text{OH}_{1,01})$	1,04
2	7	$(\text{Ca}_{9,76}\text{Na}_{0,04}\text{Fe}^{2+}_{0,14}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,02})(\text{P}_{5,98}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,06}\text{Cl}_{0,03}\text{OH}_{0,99})$	1,06
	8	$(\text{Ca}_{9,75}\text{Na}_{0,05}\text{Fe}^{2+}_{0,09}\text{Mn}_{0,00}\text{Mg}_{0,02})(\text{P}_{6,00}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,13}\text{Cl}_{0,03}\text{OH}_{0,92})$	1,23
	9	$(\text{Ca}_{9,93}\text{Na}_{0,04}\text{Fe}^{2+}_{0,06}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{5,94}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,18}\text{Cl}_{0,03}\text{OH}_{0,87})$	1,36
	10	$(\text{Ca}_{9,94}\text{Na}_{0,04}\text{Fe}^{2+}_{0,08}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,02})(\text{P}_{5,94}\text{Si}_{0,04})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,13}\text{Cl}_{0,03}\text{OH}_{0,92})$	1,23
	11	$(\text{Ca}_{9,90}\text{Na}_{0,04}\text{Fe}^{2+}_{0,14}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,02})(\text{P}_{5,93}\text{Si}_{0,04})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,16}\text{Cl}_{0,03}\text{OH}_{0,89})$	1,30
	12	$(\text{Ca}_{9,94}\text{Na}_{0,04}\text{Fe}^{2+}_{0,14}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,02})(\text{P}_{5,91}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,17}\text{Cl}_{0,04}\text{OH}_{0,87})$	1,34
3	13	$(\text{Ca}_{9,82}\text{Na}_{0,04}\text{Fe}^{2+}_{0,13}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{5,93}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,21}\text{Cl}_{0,04}\text{OH}_{0,75})$	1,61
	14	$(\text{Ca}_{10,09}\text{Na}_{0,04}\text{Fe}^{2+}_{0,09}\text{Mn}_{0,00}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{6,14}\text{Si}_{0,04})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,30}\text{Cl}_{0,04}\text{OH}_{0,74})$	1,76
	15	$(\text{Ca}_{9,81}\text{Na}_{0,03}\text{Fe}^{2+}_{0,13}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{5,95}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,25}\text{Cl}_{0,04}\text{OH}_{0,79})$	1,58
	16	$(\text{Ca}_{9,90}\text{Na}_{0,03}\text{Fe}^{2+}_{0,09}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,02})(\text{P}_{5,95}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,27}\text{Cl}_{0,04}\text{OH}_{0,78})$	1,63
	17	$(\text{Ca}_{9,81}\text{Na}_{0,04}\text{Fe}^{2+}_{0,09}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{5,98}\text{Si}_{0,04})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,32}\text{Cl}_{0,04}\text{OH}_{0,72})$	1,83
	18	$(\text{Ca}_{9,80}\text{Na}_{0,04}\text{Fe}^{2+}_{0,11}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{5,97}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,34}\text{Cl}_{0,03}\text{OH}_{0,71})$	1,89
4	19	$(\text{Ca}_{9,77}\text{Na}_{0,03}\text{Fe}^{2+}_{0,08}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{5,96}\text{Si}_{0,04})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,32}\text{Cl}_{0,04}\text{OH}_{0,72})$	1,83
	20	$(\text{Ca}_{9,90}\text{Na}_{0,02}\text{Fe}^{2+}_{0,14}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{5,93}\text{Si}_{0,04})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,27}\text{Cl}_{0,04}\text{OH}_{0,77})$	1,65
	21	$(\text{Ca}_{9,91}\text{Na}_{0,01}\text{Fe}^{2+}_{0,10}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{6,04}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,42}\text{Cl}_{0,04}\text{OH}_{0,62})$	2,29
	22	$(\text{Ca}_{10,01}\text{Na}_{0,02}\text{Fe}^{2+}_{0,08}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{5,92}\text{Si}_{0,04})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,33}\text{Cl}_{0,04}\text{OH}_{0,71})$	1,87
	23	$(\text{Ca}_{9,86}\text{Na}_{0,01}\text{Fe}^{2+}_{0,08}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,02})(\text{P}_{6,05}\text{Si}_{0,04})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,43}\text{Cl}_{0,04}\text{OH}_{0,61})$	2,34
	24	$(\text{Ca}_{9,80}\text{Na}_{0,02}\text{Fe}^{2+}_{0,10}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{6,00}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,40}\text{Cl}_{0,04}\text{OH}_{0,64})$	2,19
5	25	$(\text{Ca}_{9,85}\text{Na}_{0,01}\text{Fe}^{2+}_{0,10}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,02})(\text{P}_{5,97}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,41}\text{Cl}_{0,04}\text{OH}_{0,63})$	2,24
	26	$(\text{Ca}_{9,92}\text{Na}_{0,02}\text{Fe}^{2+}_{0,09}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{5,97}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,54}\text{Cl}_{0,05}\text{OH}_{0,49})$	3,14
	27	$(\text{Ca}_{9,88}\text{Na}_{0,01}\text{Fe}^{2+}_{0,08}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,02})(\text{P}_{5,99}\text{Si}_{0,04})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,50}\text{Cl}_{0,05}\text{OH}_{0,53})$	2,83
	28	$(\text{Ca}_{9,86}\text{Na}_{0,02}\text{Fe}^{2+}_{0,13}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{5,97}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,55}\text{Cl}_{0,05}\text{OH}_{0,48})$	3,23
	29	$(\text{Ca}_{9,84}\text{Na}_{0,01}\text{Fe}^{2+}_{0,10}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,02})(\text{P}_{5,97}\text{Si}_{0,04})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,56}\text{Cl}_{0,04}\text{OH}_{0,48})$	3,25
	30	$(\text{Ca}_{9,77}\text{Na}_{0,02}\text{Fe}^{2+}_{0,11}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,03})(\text{P}_{6,00}\text{Si}_{0,05})\text{O}_{25}(\text{F}_{1,58}\text{Cl}_{0,04}\text{OH}_{0,47})$	3,36

Примечание. [F]/[ОН] – отношение стехиометрических индексов фтора и гидроксилальной группы.

Наблюдаемая для апатита подтипа 5 высокая активность HF при низкой активности ОН в системе во время кристаллизации указывает на кристаллизацию из магмы с высоким содержанием фтора при дефиците H₂O. Это может быть связано с фракционной кристаллизацией, приведшей к концентрации F в остаточном расплаве, с частичным плавлением фторсодержащего корового источника. Учитывая, что кристаллизация минерала, относящегося

к фторапатиту (см. рис. 5), происходила практически без участия внешних водных флюидов, что типично для ранней магматической стадии гранитогенеза А-гранитов [Hughes, Cameron, Crowley, 1991; Webster, Piccoli, 2015].

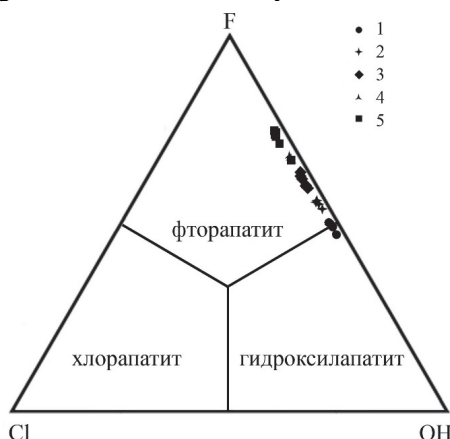


Рис. 5. Диаграмма F–Cl–OH для апатита Кузьпуаюского массива (Приполярный Урал)

Полученные выводы позволяют пересмотреть ранее сделанное предположение о позднем апатите (подтип 5) с включением раннего апатита (подтип 1) (см. рис. 3). На основании вышеизложенного можно предположить, что первоначально кристаллизовался апатит подтипа 5. Позднее минерал, вероятно, был частично растворен химически агрессивным флюидом, насыщенным натрием и достаточным количеством фтора, что позволило кристаллизоваться более позднему апатиту подтипа 1, что может быть объяснено высокой реакционной способностью фтора, который образует растворимые комплексы с кальцием, и общим метасоматическим воздействием агрессивного постмагматического флюида на первичные магматические минералы [Юдович, Кетрис, Рыбина, 2022].

Термометрия апатита и гранита Кузьпуаюского массива

Применение термометрии насыщения к данным силикатного анализа позволило определить температурный режим, благоприятный для кристаллизации рассмотренных апатитов (табл. 6). Методика, задействованная в ходе исследования, предполагает использование формулы Т. Харрисона и Е. Уотсона с корректировочными коэффициентами Ф. Беа и М. Пишавана. Согласно основной формуле Е. Уотсона и Т. Харрисона, апатит кристаллизовался при температурах от 779 до 863 °С и в среднем 825 °С. С учетом дополнения Ф. Беа нижняя граница температур снижается более чем на 100 °С и диапазон принимает вид от 668 до 858 °С и в среднем 776 °С. Оба температурных диапазона позволяют рассматривать кузьпуаюские граниты как высокотемпературные образования. Дополнение М. Пишавана дает более широкий диапазон температур (от 332 до 825 °С и в среднем 531 °С), согласно которому рассмотренные породы являются преимущественно низкотемпературными

(332–511 °С). Однако это противоречит данным ранее полученным М. В. Фишманом с коллегами и автором статьи, согласно которым образование гранитов Кузьпуаюского массива происходило при температурах более 700 °С (геотермометр Т. Барта – $T > 720$ °С [Минералогия ... , 1968], геотермометр Ж. П. Пюпена – 700–900 °С, геотермометр Дж. Монтеля – 703–801 °С) [Денисова, 2020, 2021]. Оценка температур по двуполевошпатовому геотермометру (рис. 6) [Brown, Parsons, 1981] также позволяет сделать вывод, что рассмотренные граниты образовались при высоких температурах (700–825 °С). Таким образом, дополнение к исходной формуле Е. Уотсона и Т. Харрисона, предложенное М. Пишаваном, к изученным гранитам, скорее всего, не применимо.

Таблица 6

Температуры насыщения для апатита и гранита Кузьпуаюского массива, °С

Температуры насыщения	Номер пробы									
	КЗ-1	КЗ-2	КЗ-3	КЗ-4	КЗ-5	КЗ-6	КЗ-7	КЗ-8	КЗ-9	КЗ-10
по Е. Уотсону и Т. Харрисону	822	825	859	827	861	863	845	782	784	779
по Ф. Беа	–	–	822	754	796	858	727	668	734	751
по М. Пишавану	–	–	511	413	458	756	380	332	388	429

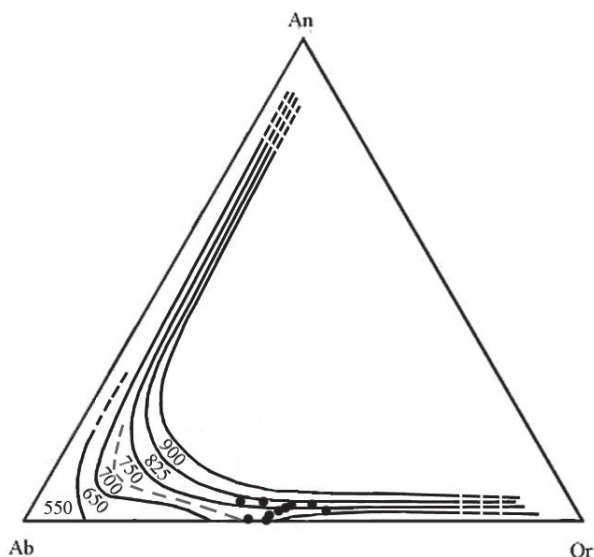


Рис. 6. Двуполевошпатовый геотермометр [Seck, 1971] для гранитов Кузьпуаюского массива (Приполярный Урал)

Необходимо уточнить, что двуполевошпатовый геотермометр показывает температуру, при которой порода, уже практически полностью закристаллизовавшаяся, остыла до состояния, когда дальнейшее перераспределение атомов Na^{2+} и K^{2+} практически останавливается и состав полевых шпатов фиксируется, что допускает применение этого геотермометра для реконструкции истории охлаждения массива. Геотермометр Дж. Монтеля позволя-

ет определить температуру образования монацита, кристаллизация которого в гранитах Приполярного Урала приходится на завершающей стадии магматического процесса. Соответственно, установленные температуры также будут характеризовать лишь часть общего температурного диапазона для породы. Растворимость апатита в силикатном расплаве зависит от температуры, давления и состава расплава. Чем выше температура гранитного расплава, тем большее количество растворенного фосфора он содержит без образования апатита. Снижение температуры расплава приводит к отторжению фосфора и кристаллизации этого минерала. Температуры, определяемые с помощью термометрии насыщения, фиксируют именно температуру первого появления апатита в расплаве [Harrison, Watson, 1984]. Апатит в гранитах Приполярного Урала кристаллизуется в течение всего гранитогенеза, т. е. температуры кристаллизации этого минерала, выделяющегося из расплава почти одновременно с цирконом [Минералогия ... , 1968], могут полноценно охарактеризовать общий температурный диапазон для гранита. С учетом всех имеющихся данных, общий диапазон образования апатита и гранита Кузьпуаюского массива примет следующий вид: от 727 °C (по Ф. Беа) до 863 °C (по Т. Харрисону, Е. Уотсону).

Заключение

Проведенное исследование кристаллов апатита выявляет их систематическую эволюцию в процессе гранитообразования, что позволяет использовать морфологию и состав этого минерала в качестве надежного индикатора стадийности магматического процесса.

Эволюция апатита представляет собой непрерывный ряд от ранних к поздним стадиям кристаллизации гранитного расплава. На ранней магматической стадии, в условиях дефицита водных флюидов, высокой концентрации фтора, высокой температуры (~893 °C), начинают свое формирование кристаллы II-типа (подтипы 3–5). Их таблитчатый габитус с преобладанием пинакоида и химический состав (высокое F/ОН, низкие содержания Na и H₂O) отражают кристаллизацию из собственно магматического фторсодержащего расплава. По мере эволюции магматической системы состав кристаллизующейся среды меняется. Увеличение активности H₂O ведет к снижению температуры, что способствует формированию апатитов I-типа (подтипы 1–2) при температурах не ниже 727 °C. Для них характерен призматический, вытянутый габитус с доминированием пирамидальных форм и состав, обогащенный гидроксидом и натрием при пониженных концентрациях фтора.

Таким образом, наблюдаемый парагенетический ряд апатитов – от фторапатитов с пинакоидальным габитусом к гидроксилапатитам с пирамидальным габитусом – наглядно фиксирует ключевую эволюционную тенденцию в процессе гранитообразования: переход от «сухой» магматической системы А-гранитов к системе, обогащенной водными флюидами. Апатит, являясь чутким регистратором изменений в флюидном режиме, служит ценным минералогическим критерием для реконструкции условий и последовательности кристаллизации гранитных интрузий.

Список литературы

- Возрастные ограничения и возможные источники сноса базальных отложений рифея Приполярного Урала / А. М. Пыстин, О. В. Гракова, Ю. И. Пыстина [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2023. № 4. С. 4–17. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/4-17>
- Ефремова С. В., Стафеев К. Г. Петрохимические методы исследования горных пород. М. : Недра, 1985. 512 с.
- Денисова Ю. В. Температурный режим формирования гранитов Кузьпуаюского массива (Приполярный Урал) по циркону // Геологические исследования Урала и Поволжья. 2020. № 8. С. 43–45.
- Денисова Ю. В. Т-условия образования гранитов Кузьпуаюского массива (Приполярный Урал) по монациту // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента : материалы 30-й науч. конф. Сыктывкар, 2021. С. 60–62.
- Макрыгина В. А. Геохимия отдельных элементов. Новосибирск : Гео, 2011. 195 с.
- Математическая статистика, Математика в техническом университете. Вып. 17 / В. Б. Горяинов [и др.]. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 424 с.
- Махлаев Л. В. Гранитоиды севера Центрально-Уральского поднятия (Полярный и Приполярный Урал). Екатеринбург : УрО РАН, 1996. 189 с.
- Минералогия, типоморфизм и генезис акцессорных минералов изверженных пород севера Урала и Тимана / М. В. Фишман [и др.]. М. : Л. : Наука, 1968. 252 с.
- Остапенко П. Е. Технологическая оценка минерального сырья, нерудное сырье. СПб. : Наука, 1995. 261 с.
- Петрохимический анализ магматических горных пород / В. С. Дубинин, И. В. Куделина, Т. В. Леонтьева, Н. В. Черных. Оренбург : ГОУ ОГУ, 2008. 109 с.
- Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярноуральского сегмента земной коры // Литосфера. 2008. № 11. С. 25–38.
- Справочник по математическим методам в геологии / Д. А. Родионов [и др.]. М. : Недра, 1987. 233 с.
- Юдович Я. Э., Кетрис М. П., Рыбина Н. В. Обманщик-апатит – уникальный индикатор материнских горных пород и руд, а также петро-, лито- и рудогенеза // Уральский геологический журнал. 2022. № 1 (145). С. 3–87.
- Brown W. L., Parsons I. Towards a more practical two-feldspar geothermometer // Contr. Mineral. and Petrol. 1981. N 76, P. 369–377. <https://doi.org/10.1007/BF00371478>
- Chappel B. W., Whitte A- J. R. Two contrasting granite types // Pacif. Geol. 1974. Vol. 8. P. 173–174.
- Bea F., Fershtater G. B., Corretgé L. G. The geochemistry of phosphorus in granite rocks and the effects of aluminium // Lithos. 1992. N 48. P. 43–56.
- Harker A. The natural history of igneous rocks. London : Methuen, 1909. 452 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511920424>
- Harrison T. M., Watson E. B. The behavior of apatite during crustal anatexis: Equilibrium and kinetic considerations. // Geochim. Cosmochim. Acta. 1984. N 48. P. 1467–1477.
- Hornik K. The Comprehensive R Archive Network. WIREs // Comput Stat. 2012. N 4. P. 394–398. <https://doi.org/10.1002/wics.1212>.
- Hughes J. M., Cameron M., Crowley K. D. Crystal structures of natural ternary apatites: Ca₂REEs₃(SiO₄)₆O₂F₂ // American Mineralogist. 1991. N 76 (11-12). P. 1855–1860.
- Loiselle M. C., Wones D. R. Characteristics and origin of anorogenic granites // Abstracts of papers to be presented at the annual meetings of the Geological Society of America and Associated Societies. San Diego, California, 1979. Vol. 11. P. 468.
- 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. N 56. P. 3855–3861.
- Rakovan J. Growth and surface properties of apatite // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2002. N 48 (1). P. 51–86.

Rakovan J., Piatak N. M. Morphology and surface features of apatite from the Cerro de Mercado iron deposit // *Rocks & Minerals*. 2007. N 82 (1). P. 34–41.

Seck H. A. Der Einfluß des Drucks auf die Zusammensetzung koexistierender Alkalifeldspäte und Plagioclase in System $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{--KAlSi}_3\text{O}_8\text{--CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{--H}_2\text{O}$ // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1971. N 31. P. 67–86.

Webster J. D., Piccoli P. M. Magmatic Apatite: A Powerful yet Deceptive Mineral // *Elements*. 2015. N 11. P. 177–182. <https://doi.org/10.2113/gselements.11.3.177>

References

Pystin A.M., Grakova O.V., Pystina Yu.I., Kushmanova E.V., Popvasev K.S., Xubanov V.B. Vozrastny'e ogranicheniya i vozmozhny'e istochniki snosabazal'ny'x otlozhenij rifeya Pripolyarnogo Urala [Age restrictions and possible sources of demolition of the Riphean basal sediments of the Circumpolar Urals]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology], 2023, no. 4, pp. 4–17. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/4-17> (in Russian)

Efremova S.V., Stafeev K.G. *Petrokhimicheskie metody issledovaniya gornikh porod* [Petrochemical methods of rock research]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 512 p. (in Russian)

Denisova Yu.V. Temperaturnii rezhim formirovaniya granitov Kuzpuayuskogo massiva (Pripolyarnii Ural) po tsirkonu [Temperature regime of granite formation in the Kuzpuy massif (the Subpolar Urals) according to zircon]. *Geological studies of the Urals and the Volga region*, 2020, no. 8, pp. 43–45. (in Russian)

Denisova Yu.V. *T-usloviya obrazovaniya granitov Kuzpuayuskogo massiva (Pripolyarnii Ural) po monatsitu* [T-conditions of formation of granites of the Kuzpuy massif (the Subpolar Urals) according to monazite]. *Structure, substance and history of the lithosphere of the Timan-North Ural segment. Proceedings of the 30th Scientific Conference*, 2021, pp. 60–62. (in Russian)

Makrygina V.A. *Geoximiya otdeynykh elementov* [Geochemistry of individual elements]. Novosibirsk, Geo Publ., 2011, 195 p. (in Russian)

Goryainov V.B., Pavlov I.V., Czvetkova G.M., Teskin O.I. *Matematicheskaya statistika, Matematika v tekhnicheskoy universitete. Vyp. XVII* [Mathematical statistics, Mathematics at the Technical University. Iss. 17]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2001, 424 p. (in Russian)

Mahlaev L.V. *Granitoidy severa Cenralno-Uralskogo podnyatiya (Polyarnyj i Pripolyarnyj Ural)* [Granitoids of the north of the Central Ural Uplift (the Polar and the Subpolar Urals)]. Ekaterinburg, UrO RAS Publ., 1996, 189 p. (in Russian)

Fishman M.V., Yushkin N.P., Goldin B.A., Kalinin E.P. *Mineralogiya, tipomorfizm i genezis aktessornikh mineralov izverzhennikh porod severa Urala i Timana* [Mineralogy, typomorphism and genesis of accessory minerals from igneous rocks of the Northern Urals and Timan]. Moscow, Leningrad, Nauka Publ., 1968, 252 p. (in Russian)

Ostapenko P.E. *Texnologicheskaya ocenka mineralnogo syr'ya, nerudnoe syr'yo* [Technological assessment of mineral raw materials, non-metallic raw material]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1995, 261 p. (in Russian)

Dubinin V.S., Kudelina I.V., Leontieva T. V., Chernykh N.V. *Petroximicheskij analiz magmaticheskix gornykh porod* [Petrochemical analysis of igneous rocks]. Orenburg, GOU OGU Publ., 2008, 109 p. (in Russian)

Pystin A.M., Pystina Yu.I. Metamorfizm i granitoobrazovanie v proterozojsko- rannepaleozojskoj istorii formirovaniya Pripolyarnoural'skogo segmenta zemnoj kory [Metamorphism and granite formation in the Proterozoic- Early Paleozoic history of the formation of the Subpolar Urals segment of the Earth's crust]. *Litosfera* [Lithosphere], 2008. no. 11, pp. 25–38. (in Russian)

Rodionov D.A., Kogan R.I., Golubeva V.A., Smirnov B.I., Sirotinskaya S.V. *Spravochnik po matematicheskim metodam v geologii* [Textbook of Mathematical Methods in Geology]. Moscow, Nedra Publ., 1987, 233 p. (in Russian)

Yudovich Ya.E., Ketris M.P., Rybina N.V. Obmanshchik- apatit – unikalnii indikator materinskikh gornikh porod i rud, a takzhe petro-, lito- i rudogeneza [The deceiver- apatite is a unique indicator of parent rocks and ores, as well as petro-, litho- and oreogenesis]. *Ural Geological Journal*, 2022, no. 1 (145), pp. 3–87. (in Russian)

- Brown W.L., Parsons, I. Towards a more practical two-feldspar geothermometer. *Contr. Mineral. and Petrol.*, 1981, no. 76, pp. 369-377. <https://doi.org/10.1007/BF00371478>
- Chappel B.W., Whitte A.-J. R. Two contrasting granite types. *Pacif. Geol.*, 1974, vol. 8, pp. 173-174.
- Bea F., Fershtater G.B., Corretgé L.G. *The geochemistry of phosphorus in granite rocks and the effects of aluminium*. *Lithos.*, 1992, no. 48, pp. 43-56.
- Harker A. *The natural history of igneous rocks*. Methuen. London, 1909, 452 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511920424>
- Harrison T.M., Watson E.B. The behavior of apatite during crustal anatexis: Equilibrium and kinetic considerations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, no. 48, pp. 1467-1477.
- Hornik K. The Comprehensive R Archive Network. *WIREs. Comput. Stat.*, 2012, no. 4, pp. 394-398. <https://doi.org/10.1002/wics.1212>
- Hughes J.M., Cameron M., Crowley K.D. Crystal structures of natural ternary apatites: $\text{Ca}_2\text{REEs}_3(\text{SiO}_4)_6\text{O}_2\text{F}_2$. *American Mineralogist*, 1991, no. 76 (11-12), pp. 1855-1860.
- Loiselle M.C., Wones D.R. Characteristics and origin of anorogenic granites. *Abstracts of papers to be presented at the annual meetings of the Geological Society of America and Associated Societies*. San Diego, California, 1979, vol. 11, p. 468.
- 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, no. 56, pp. 3855-3861.
- Rakovan J. Growth and surface properties of apatite. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, no. 48 (1), pp. 51-86.
- Rakovan J., Piatak N.M. Morphology and surface features of apatite from the Cerro de Mercado iron deposit. *Rocks & Minerals*, 2007, no. 82 (1), pp. 34-41.
- Seck H.A. Der Einfluß des Drucks auf die Zusammensetzung koexistierender Alkalifeldspäte und Plagioclase in System $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ – KAlSi_3O_8 – $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ – H_2O . *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1971, no. 31, pp. 67-86.
- Webster J.D., Piccoli P.M. Magmatic Apatite: A Powerful yet Deceptive Mineral. *Elements*, 2015, no. 11, pp. 177-182. <https://doi.org/10.2113/gselements.11.3.177>

Сведения об авторе

Денисова Юлия Вячеславовна
 младший научный сотрудник
 Институт геологии имени академика
 Н. П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН
 Россия, 167982, г. Сыктывкар,
 ул. Первомайская, 54
 e-mail: yulden777@yandex.ru

Information about the author

Denisova Yulia Vjacheslavovna
 Junior Research Scientist
 Institute of Geology Named after Academician
 N. P. Yuskin Komi SC UB RAS
 54, Pervomayskaya st., Syktyvkar, 167982,
 Russian Federation
 e-mail: yulden777@yandex.ru

Код научной специальности: **1.6.3**

Статья поступила в редакцию **14.05.2025**; одобрена после рецензирования **11.12.2025**; принята к публикации **12.12.2025**
 The article was submitted **May, 14, 2025**; approved after reviewing **December, 11, 2025**; accepted for publication **December, 12, 2025**