

**Ю. В. Денисова**

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар

## ТЕРМОМЕТРИЯ НАСЫЩЕНИЯ АПАТИТА (КУЗЬПУАЮСКИЙ МАССИВ, ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

Изучение аксессуарных минералов позволяет решить многие вопросы геологии. Апатит может быть использован как геохронометр (трековый метод), так и геотермометр (apatит-биотитовый геотермометр Ладдингтона, апатитовый геотермометр Ватсона-Харрисона). Термометрия насыщения Е. Ватсона и Т. Харрисона с корректировкой Ф. Беа позволяет выявить температурные условия формирования породы на основе данных силикатного метода. Анализ содержаний петрогенных элементов гранитов Кузьпуаюского массива (Приполярный Урал) установил температурный режим ранней магматической стадии формирования рассмотренных гранитов с средней температурой 825°C.

*Ключевые слова:* апатит, гранит, термометрия, Кузьпуаюский массив, Приполярный Урал.

**DOI: 10.17072/chirvinsky.2024.3**

Апатит широко распространен в породах Приполярного Урала различного состава, возраста и генезиса. Наиболее высокие содержания этого минерала отмечаются в породах эффузивного и габбро-диоритового комплексов, в частности, в гранитоидах сальнеро-маньхамбовского комплекса концентрация этого фосфата может достигать до 800 г/т [6, 9]. Изучение апатита позволяет получить не только данные о возрасте, но и информацию о температурном режиме породы, его содержащей [1].

Цель настоящей работы определение температурного режима образования гранитов Кузьпуаюского массива на основе термометрии насыщения по апатиту.

В пределах западного склона Приполярного Урала отмечаются магматические образования, возраст которых может варьироваться от раннепротерозойского до раннекембрийского. К венд-раннекембрийским интрузиям относятся, в том числе, граниты сальнеро-маньхамбовского комплекса, часть которого является и Кузьпуаюский массив (рис. 1). Массив, отмечаемый в бассейне руч. Кузьпуаю, представляет собой штокообразное гранитное тело, прорывающее верхнерифейские отложения хобеинской и мороинской свит, представленные преимущественно хлорит-мусковит-альбит-кварцевыми сланцами [5].

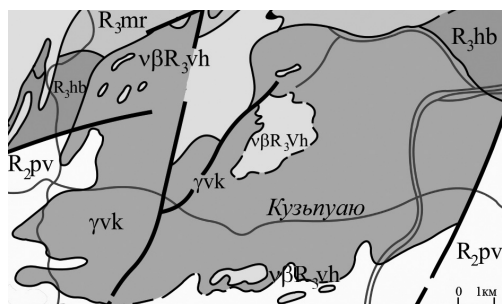


Рис. 1. Кузнецкий гранитный массив [4].  $R_3mr$  – мороинская свита (хлорит-мусковит-альбит-кварцевые сланцы, прослои ортосланцев, мраморов, доломитов),  $R_3hb$  – хобейнская свита (хлорит-мусковит-альбит-кварцевые сланцы, прослои мраморов),  $R_2pv$  – пуйвинская свита (хлорит-мусковит-альбит-кварцевые сланцы, метапорфиры, прослои мраморов и кварцитов),  $vBR_3vh$  – габбродиабазы хаталамбинского комплекса,  $\gamma vk$  – биотитовые граниты сальнеро-маньхамбовского комплекса

Породы изученного гранитного массива представляют собой розово-серые среднезернистые лейкократовые образования. Структура гранитов преимущественно гипидиоморфная (гранитная), реже отмечается аллотриоморфная [3, 7]. По всей площади массива отмечается сильное влияние катаклаза. Среди породообразующих минералов отмечается калиево-натриевый полевой шпат (до 50 %), плагиоклаз (до 20 %), кварц (до 30 %), слюды (до 5 %) (преимущественно биотит). В качестве аксессуарных минералов отмечаются циркон, апатит, титанит, гранат, ортит и др. Для гранитов Кузнецкого массива характерны высокие содержания апатита, которые могут достигать 400 г/т, отмечаемые в приконтактных зонах массива.

В исследованных породах наблюдаются белые и желто-серые преимущественно полупрозрачные кристаллы апатита, размер которых составляет 0,1–0,5 мм при коэффициенте удлинения 2–4. Облик этого фосфата может быть как гексагональный призматический, так и гексогональный дипирамидально-призматический. Первый вид апатита характеризуется полным отсутствием пинакоида или его слабым развитием, вследствие чего наблюдаются зерна с призмой (1010) и пирамидой (1011), а также зерна с неявно выраженным пинакоидом (0001). Характерными включениями для этих призматических и длиннопризматических кристаллов являются биотит, кварц, плагиоклаз. У второго вида минерала отмечается хорошо развитый пинакоид при полном отсутствии каких-либо пирамид или очень слабом развитии пирамиды (1121). Зерна апатита преимущественно короткопризматические с включениями циркона, апатита, биотита, кварца.

Применение апатита в качестве геотермометра стало возможным благодаря исследованиям Е. Ватсона и Т. Харрисона [10], результатом которых стало выявление связи между температурой образования апатита и содержащей минерал породы и степенью накопления фосфора (для  $A/CNK < 1$ ).

Для расчета температурного режима с помощью термометрии насыщения по апатиту была определена следующая формула:

$$\ln D_p = (8400 + 26400 * (SiO_2 - 0.5)) / T^K - 3.1 - 12.4 * (SiO_2 - 0.5),$$

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

$$T^K = (8400 + 26400 * (SiO_2 - 0.5)) / (\ln(42 / P_2O_5 (HW)) + 3.1 + 12.4 * (SiO_2 - 0.5)) - 273.15,$$

где  $D_p$  – соотношение концентрации фосфора в апатите и расплаве,

$P_2O_5$ ;  $SiO_2$  – весовая доля оксида фосфора, кремния в расплаве, мас. %,

$T^K$  – температура, Кельвин,

$T^C$  – температура, Цельсий.

Ф. Беа с коллегами [11] внесли в исходную формулу Е. Ватсона и Т. Харрисона уточнение по уровню содержания оксида фосфора (для пород с  $A/CNK > 1$ ).

$$P_2O_5 (B) = P_2O_5 (HW) * \exp(6429(A/CNK) / (T^C - 273.15)),$$

$$\text{где } A/CNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O).$$

Формула расчета температуры насыщения для апатита и апатит-содержащей породы с учетом предложенной корректировки приобрела следующий вид:

$$T^C = (8400 + 26400(SiO_2 - 0.5)) /$$

$$(\ln(42 / P_2O_5 (HW)(6429(A/CNK) / (T^C - 273.15)) + 3.1 + 12.4(SiO_2 - 0.5)) - 273.15).$$

Полученные с помощью силикатного метода содержания петрогенных элементов (ЦКП «Наука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН, аналитик О. В. Кокшарова), позволили определить температуры насыщения для апатита и апатитсодержащей породы (табл.).

Расчетные температуры насыщения по апатиту позволяют утверждать, что кристаллизация апатита проходила при высоких температурах, а именно от 779°C до 863°C и в среднем 825°C. Согласно исследованиям М.В. Фишмана и его коллег, в период становления гранитоидов салльнеро-маньхамбовского комплекса [8], а в частности, гранитов Кузьпуняуского массива, основная масса апатита кристаллизовалась на раннем магматическом этапе. Причем выделение минерала происходило равномерно в течении всего указанного периода, согласно гистограмме температур насыщения (рис. 2).

Применение геотермометра Е. Ватсона и Т. Харрисона с корректировкой Ф. Беа к гранитам Кузьпуняуского массива позволяют сделать

Таблица

*Химический состав и температура образования гранитов  
Кузьпуняуского массива*

| Ком-<br>по-<br>нент,<br>мас.<br>% | Номер пробы |        |        |       |       |        |       |       |        |        |
|-----------------------------------|-------------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|
|                                   | КЗ-1        | КЗ-2   | КЗ-3   | КЗ-4  | КЗ-5  | КЗ-6   | КЗ-7  | КЗ-8  | КЗ-9   | КЗ-10  |
| SiO <sub>2</sub>                  | 76,33       | 76,56  | 76,81  | 76,87 | 77,08 | 77,24  | 78,88 | 77,59 | 77,81  | 77,33  |
| TiO <sub>2</sub>                  | 0,16        | 0,22   | 0,34   | 0,52  | 0,45  | 0,14   | 0,55  | 0,39  | 0,31   | 0,24   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 12,18       | 11,63  | 12,47  | 11,87 | 11,75 | 12,02  | 11,28 | 11,48 | 11,78  | 12,08  |
| FeO                               | 1,08        | 0,45   | 1,09   | 1,11  | 0,95  | 1,07   | 1,04  | 0,99  | 1,10   | 0,92   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 0,82        | 1,88   | 0,75   | 1,55  | 0,92  | 0,98   | 0,78  | 1,38  | 0,89   | 0,52   |
| MnO                               | 0,02        | 0,02   | 0,02   | 0,02  | 0,03  | 0,00   | 0,02  | 0,03  | 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   |
| CaO                               | 0,59        | 0,29   | 0,22   | 0,38  | 0,51  | 0,49   | 0,39  | 0,22  | 0,23   | 0,45   |
| Na <sub>2</sub> O                 | 4,34        | 4,03   | 4,22   | 3,48  | 3,18  | 3,65   | 3,13  | 3,15  | 3,01   | 3,22   |
| K <sub>2</sub> O                  | 3,88        | 4,51   | 4,09   | 3,89  | 4,15  | 4,65   | 3,33  | 3,78  | 5,08   | 4,99   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>     | 0,02        | 0,02   | 0,03   | 0,02  | 0,03  | 0,03   | 0,02  | 0,01  | 0,01   | 0,01   |
| ппп                               | 0,25        | 0,19   | 0,02   | 0,06  | 0,73  | 0,03   | 0,32  | 0,72  | 0,03   | 0,09   |
| ∑                                 | 99,91       | 100,01 | 100,25 | 100,1 | 99,99 | 100,51 | 99,92 | 99,96 | 100,46 | 100,05 |
| T, °C                             | 822         | 825    | 859    | 827   | 861   | 863    | 845   | 782   | 784    | 779    |

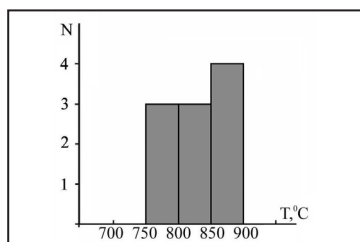


Рис. 2. Температуры насыщения апатита и гранита (Кузьпуняуский массив, Приполярный Урал)

диапазоном от 779°С до 863°С.

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

### *Библиографический список*

1. Денисова Ю. В. «Термометрия насыщения циркона, апатита, монацита (Кожимский массив, Приполярный Урал)» // Известия Коми научного центра УрО РАН, № 3 (39). 2019. С. 25–30. Doi: 10.19110/1994-5655-2019-3-47-52.
2. Денисова Ю. В. Температурный режим формирования гранитов Кузпуяуского массива (Приполярный Урал) по циркону // Геологические исследования Урала и Поволжья, № 8. Москва: Издательство «Перо», 2020. С. 43–45.
3. Махлаев Л. В. Гранитоиды севера Центрально-Уральского поднятия (Полярный и Приполярный Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 189 с.
4. Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярноуральского сегмента земной коры // Литосфера. 2008. № 11.
5. Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Новые данные о возрасте гранитоидов Приполярного Урала в связи с проблемой выделения кожимской среднерифейской гранит-риолитовой формации // Известия КНЦ УрО РАН. 2011. № 4 (8). С. 14–19.
6. Пыстина Ю. И. Типоморфизм апатитов метаморфических пород Приполярного Урала (бассейн реки Кожим) // Известия КНЦ УрО РАН. 2022. № 2 (54). С. 55–63.
7. Фишман М. В., Голдин Б. А. Гранитоиды центральной части Приполярного Урала. М.-Л.: АН СССР, 1963. 105 с.
8. 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.
9. Юдович Я. Э., Кетрис М. П., Рыбина Н. В. Состав апатита как универсальный индикатор геологических процессов. Новосибирск: Свиньян и сыновья, 2022. 140 с.
10. Harrison T. M., and Watson E. B. The behavior of apatite during crustal anatexis: Equilibrium and kinetic considerations // Geochim. Cosmochim. Acta. 1984. V. 48. P. 1467–1477.
11. 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.
12. Pupin J.-P. Zircon and granite petrology // Contrib. Miner. Petrol. 1980. Vol. 73. P.207–220.

### THERMOMETRY SATURATION OF APATITE (THE KUZPUYU MASSIF, THE SUBPOLAR URALS)

**Yu. V. Denisova**

*yulden777@yandex.ru*

The study of accessory minerals allows us to solve many questions of geology. Apatite can be used as a geochronometer (track method) and a geothermometer (apatite-biotite Ludington geothermometer, apatite Watson-Harrison geothermometer). Saturation thermometry of E. Watson and T. Harrison with the correction of F. Bea makes it possible to identify the temperature conditions of rock formation based on the data of the silicate method. The petrogenic elements contents analysis of the Kuzpuyu massif granite (the Subpolar Urals) established the temperature regime of the early magmatic stage of formation of the granites under consideration with an average temperature of 825°C.

*Key words: apatite, granite, thermometry, the Kuzpuy massif, the Subpolar Urals.*