

## Геотермометр Арановича-Бортникова для пород Николайшорского массива (Приполярный Урал)

Денисова Ю.В.

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

**Аннотация.** Циркон, являющийся одним из самых распространенных минералов в различных породах, активно используется исследователями в качестве геотермометра. На сегодняшний момент для этого минерала разработан ряд методик, позволяющих определить температурные условия формирования пород на основе изучения морфологии (метод Ж.П. Пюпина и Г. Тюрко) (Pupin, 1980) и химического состава циркона (метод «Ti-in-zircon») (Fu, Page et al., 2008). Определить температурные условия для оптимальной кристаллизации минерала можно так же и на основе изучения химического состава самой породы (метод Е. Ватсона) (Watson, Harrison, 1983). Метод Л.Я. Арановича и Н.С. Бортникова (Аранович, Бортников, 2018) позволяет выявить температуру формирования гранитов по цирконий-гафниевым отношениям гранита и циркона. Применение последнего геотермометра для пород Николайшорского массива позволило определить, что изученные гранито-гнейсы сформировались при двух температурных режимах: от 635 °С до 696 °С (в среднем 662 °С) и от 751 °С до 883 °С (в среднем 833 °С).

**Ключевые слова:** циркон, гранит, геотермометр, Николайшорский массив, Приполярный Урал.

## Aranovich-Bortnikov geothermometer for rocks of the Nikolaishor massif (the Subpolar Urals)

Denisova Yu.V.

*Institute of Geology of Komi SC UB RAS, Syktyvkar, yulden777@yandex.ru*

**Abstract.** Zircon, which is one of the most common minerals in various rocks, is actively used by researchers as a geothermometer. To date, a number of methods have been developed for this mineral to determine the temperature conditions of rock formation based on the study of morphology (the method of J.P. Pupin and G. Turko, see Pupin, 1980) and the chemical composition of zircon (the «Ti-in-zircon» method, see Fu, Page et al., 2008). It is also possible to determine the temperature conditions for optimal crystallization of a mineral on the basis of studying the chemical composition of the rock itself (method of E. Watson). The method of L.Y. Aranovich and N.S. Bortnikov (Aranovich, Bortnikov, 2018) makes it possible to identify the temperature of granite formation by the zirconium-hafnium ratios of granite and zircon. The use of the latest geothermometer for the rocks of the Nikolaishor massif allowed us to determine that the studied granite-gneisses were formed at two temperature regimes: from 635 °C to 696 °C (average 662 °C) and from 751 °C to 883 °C (average 833 °C).

**Keywords:** zircon, granite, geothermometer, Nikolaishor massif, Subpolar Urals.

### Введение

Циркон, представляющий собой ортосиликат циркония ( $ZrSiO_4$ ), всегда в своем составе содержит примесь гафния. Такое постоянство объясняется тем, что цирконий встречается только в валентности +4, что ограничивает его в изоморфных замещениях элементами  $TR^{3+}$ ,  $Hf^{4+}$ ,  $Ti^{4+}$ ,  $Th^{4+}$ ,  $U^{4+}$ ,  $Nb^{5+}$ . Наиболее близким по ионному радиусу циркония, оказался гафний, что привело к выделению пары Zr (элемент-хозяин) – Hf (элемент-спутник). Эти тяжелые литофилы являются катионогенными (наиболее подвижными в кислых средах) и некогерентными (не входит изоморфно в породообразующие минералы) элементами, которые накапливаются в остаточных расплавах. Кроме того, скорость накопления гафния относительно циркония усиливается с течением времени в процессе формирования породы, что позволяет рассматривать соотношение этих элементов как индикаторное. Среди прочего, благодаря разработке Л.Ю. Арановича и Н.С. Бортникова стало возможным использование Zr – Hf отношения в качестве геотермометра (Багдасаров, 1989; Ляхович, 2000; Денисова, 2015).

В представленной работе показан результат применения цирконий-гафниевого геотермометра для пород Николайшорского массива.

### **Объект исследований**

На территории Западного склона Приполярного Урала, рассматриваемого исследователями как область наиболее древней периферической части Уральского подвижного пояса, фиксируются разновозрастные гранитные образования. Раннепротерозойские интрузии представлены гнейсовидными гранитами николайшорского комплекса, к которому относятся и изученный Николайшорский массив. Этот массив, пространственно связанный с гнейсами няртинского метаморфического комплекса, расположен в бассейне рр. Николай-Шор и Иг-Шор и представлен двумя гранитными телами:

вытянутым в северо-северо-западном направлении пластовым телом и более компактным образованием, расположенным южнее. Породы этого массива представлены плагиогранитами и нормальными кали-шпатовыми гранитами, имеющими преимущественно гнейсовидный облик и взаимные переходы к гнейсам и кристаллическим сланцам, что позволило А.М. Пыстину обозначить их как плагиогранито-гнейсы и гранито-гнейсы. Для определения температурных особенностей формирования массива в качестве объекта исследования были рассмотрены гранито-гнейсы. Эти граниты представляют собой среднезернистые, иногда порфировидные, породы, цвет которых меняется от розовато-серого (пробы Н-3, Н-6, Н-8) до серовато-зеленого (проба Н-1, Н-2). Все вариации гранитов сильно катаклазированы. Минеральный состав гранито-гнейсов Николайшорского массива представлен плагиоклазом (35 %), калиевым полевым шпатом (35 %), кварцем (25 %) и слюдами. Если количество первых трех породообразующих минералов для все изученных проб примерно одинаковое, то содержание слюд различается: проба Н-1, Н-2 представляет собой двуслюдяные граниты – биотит (3–4 %), мусковит (1–2 %), пробы Н-3, Н-6, Н-8 – биотитовые граниты – биотит (5 %) (Фишман, Голдин, 1963; Махлаев, 1996; Пыстин, 1994; Пыстин, Пыстина, 2008; 2019; Денисова, 2021).

### **Методика исследования**

Геотермометр Арановича-Бортникова базируется на измерении колебаний содержания циркония и гафния не только в цирконе, но и в магматической породе. Петрохимические особенности самого гранита и содержание оксида титана в цирконе не оказывают влияния на расчетные температуры. Установленная тесная связь между температурой образования циркона и породы, и коэффициентом распределения циркония и гафния в минерале и породе позволяет определить температуру кристаллизации каждого кристалла циркона в пределах изученной пробы, тем самым делая возможным выявление температурного диапазона для этой точки отбора.

Расчетная формула имеет вид:

$$T(K) = 1531 / (\ln K_d + 0.883),$$
$$K_d = (Zr_{ц} / Hf_{ц}) * (Hf_{гр} / Zr_{гр}).$$

где  $K_d$  – коэффициент распределения Zr и Hf между цирконом и гранитом,  $T(K)$  – температура, Кельвин,  $Zr_{ц}$ ,  $Hf_{ц}$  – содержание Zr и Hf в цирконе, мас. %,  $Zr_{гр}$ ,  $Hf_{гр}$  – содержание Zr и Hf в граните, мас. %.

### **Геотермометр Арановича-Бортникова для пород Николайшорского массива**

Опробование Николайшорского массива проводилось точечным методом с отбором 5 проб. В каждой пробе были отобраны 10 цирконов. Содержания циркония и гафния в гранито-гнейсе получены с помощью ICP-MS метода в Институте геологии и геохимии (Екатеринбург, аналитик Ю.Л. Ронкин). Содержания циркония и гафния в цирконе определены на энергодисперсионном спектрометре Vega3 в ЦКП «Наука» Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар, аналитик А.С. Шуйский). Используя геотермометр Арановича-Бортникова, автором были определены температурные диапазоны для каждой изученной пробы (табл., рис. 1).

Цирконы из проб Н-1 и Н-2 кристаллизовались при относительно низких температурах. Характерные диапазоны температур: для пробы № 1 – от 654 °С до 696 °С и в среднем 669 °С, для пробы № 2 – от 635 °С до 648 °С и в среднем 643 °С. В пробах же Н-3, Н-6 и Н-8 отмечаются

два температурных режима, выявленных ранее с помощью методики Ж.П. Пюпена и Г. Тюрко. Для пробы № 3 первый термический диапазон – от 656 °С до 694 °С и в среднем 682 °С, второй – от 751 °С до 859 °С и в среднем 796 °С. Подобные диапазоны отмечаются для пробы Н-6 (первый – от 662 °С до 693 °С и в среднем 683 °С, второй – от 826 °С до 883 °С и в среднем 858 °С) и Н-8 (первый – от 660 °С до 679 °С и в среднем 670 °С, второй – от 804 °С до 874 °С и в среднем 825 °С).

Таблица. Zr- Hf- геотермометр для гранитов Николайшорского массива.  
 Table. Zr-Hf geothermometer for granites of the Nikolaishor massif.

№	Проба	Содержание элемента в цирконе. мас. %		Содержание элемента в граните. мас. %		T. °C	№	Проба	Содержание элемента в цирконе. мас. %		Содержание элемента в граните. мас. %		T °C	
		Zr <sub>ц</sub>	Hf <sub>ц</sub>	Zr <sub>гр</sub>	Hf <sub>гр</sub>				Zr <sub>ц</sub>	Hf <sub>ц</sub>	Zr <sub>гр</sub>	Hf <sub>гр</sub>		
1	Н-1	49.66	2.24	26.37	2.52	664	26	Н-3	47.87	1.49	35.02	2.01	751	
2		47.37	2.12	26.37	2.52	659	27		47.27	1.67	35.02	2.01	846	
3		50.02	2.22	26.37	2.52	655	28		46.89	1.48	35.02	2.01	761	
4		48.29	2.25	26.37	2.52	683	29		46.81	1.68	35.02	2.01	859	
5		48.02	2.21	26.37	2.52	676	30		49.56	1.39	35.02	2.01	684	
6		46.70	2.12	26.37	2.52	668	31		Н-6	47.55	1.77	35.75	2.11	866
7		47.37	2.19	26.37	2.52	678	32			49.81	1.89	35.75	2.11	883
8		49.88	2.21	26.37	2.52	654	33			47.52	1.78	35.75	2.11	871
9		45.06	2.02	26.37	2.52	660	34			49.87	1.89	35.75	2.11	881
10		48.97	2.33	26.37	2.52	696	35			47.56	1.32	35.75	2.11	662
11	Н-2	46.15	2.32	19.87	2.21	640	36	46.91		1.37	35.75	2.11	692	
12		48.22	2.45	19.87	2.21	646	37	49.88		1.44	35.75	2.11	683	
13		48.56	2.48	19.87	2.21	648	38	48.27		1.71	35.75	2.11	826	
14		48.55	2.42	19.87	2.21	635	39	49.65		1.45	35.75	2.11	693	
15		46.11	2.33	19.87	2.21	643	40	49.78		1.75	35.75	2.11	820	
16		46.25	2.35	19.87	2.21	646	41	Н-8	47.80	1.16	39.78	2.01	672	
17		46.44	2.35	19.87	2.21	643	42		48.31	1.18	39.78	2.01	679	
18		50.12	2.55	19.87	2.21	646	43		48.19	1.55	39.78	2.01	874	
19		46.21	2.34	19.87	2.21	644	44		47.37	1.12	39.78	2.01	660	
20		46.15	2.34	19.87	2.21	644	45		47.06	1.43	39.78	2.01	826	
21	Н-3	47.52	1.32	35.02	2.01	679	46		47.53	1.41	39.78	2.01	809	
22		46.63	1.45	35.02	2.01	750	47		47.05	1.40	39.78	2.01	812	
23		46.45	1.33	35.02	2.01	694	48		46.81	1.42	39.78	2.01	826	
24		46.08	1.23	35.02	2.01	656	49		47.27	1.39	39.78	2.01	804	
25		47.79	1.51	35.02	2.01	761	50		48.14	1.57	39.78	2.01	886	

Таким образом, породы Николайшорского массива в период своего становления подвергались воздействию двух температурных режимов: от 635 °С до 696 °С и в среднем 662 °С и от 751 °С до 883 °С и в среднем 833 °С. Проведенные расчеты подтверждают выводы по температурам формирования гранитов Николайшорского массива, основанным на исследовании морфологии акцессорного циркона. Данные автора соотносятся с результатами О.В. Удоратиной и ее коллег

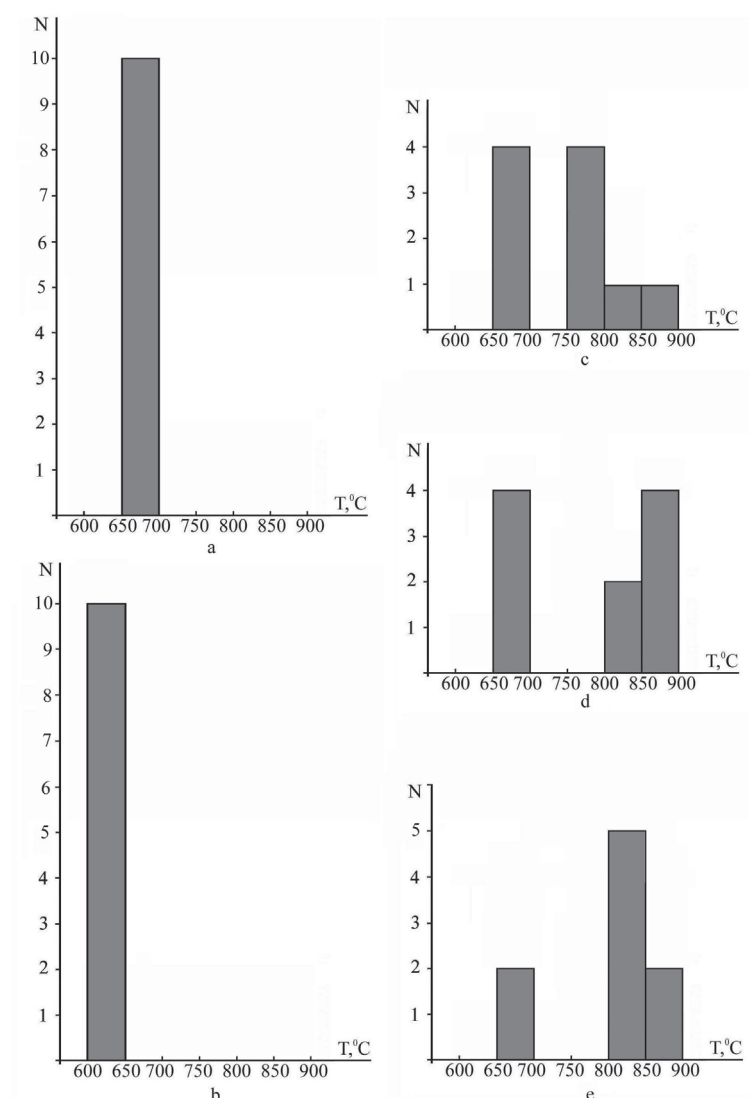


Рис. 1. Температуры образования гранито-гнейсов Николайшорского массива по Zr- Hf геотермометру: а) проба Н-1, б) проба Н-2, с) проба Н-3, д) проба Н-6, е) проба Н-8.

Fig. 1. Temperatures of granite-gneisses formation in the Nikolaishor massif according to the Zr-Hf geothermometer: a) sample N-1, b) sample N-2, c) sample N-3, e) sample N-6, f) sample N-8.

(Удоратина и др., 2019), которые на основе метода «Ti-in-zircon» определили, что в исследуемых гранитах имеет место две интервала температур: 684–702 °С и 737–795 °С.

### **Заключение**

Изучение содержаний циркония и гафния в гранито-гнейсах и цирконах Николайшорского массива показало, что для исследованных пород характерен высокотемпературный режим формирования. Геотермометр Арановича-Борникова показал наличие двух температурных режимов: от 635 °С до 696 °С (в среднем 662 °С) и от 751 °С до 883 °С (в среднем 833 °С). Полученная информация подтверждает ранние выводы автора. Применение геотермометра Ватсона для пород Николайшорского массива дает общий температурный диапазон от 622 °С до 877 °С. Геотермометр Пюпена-Тюрко так же отмечает два диапазона температур: от 650 °С до 700 °С и от 750 °С до 900 °С (Денисова, 2016, 2018).

Исследования проведены в рамках НИР ИГ Коми НЦ УрО РАН № 1021062211107-6-1.5.6; FUUU-2022-0085.

## Литература

1. Аранович Л.Я., Бортников Н.С. Новый Zr-Hf геотермометр для магматических цирконов // *Петрология*. 2018. Т. 26. № 2. С. 109–115.
2. Багдасаров Э.А. Индикаторное значение цирконий- гафниевого отношения цирконов // *Типоморфизм, синтез и использование циркона*. Киев. Изд-во: Наукова думка. 1989. С. 59–64.
3. Денисова Ю.В. Петрогенетическое значение  $ZrO_2/HfO_2$  отношения в акцессорном цирконе гранитов Приполярного Урала // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. Сыктывкар. 2015. № 2. С. 23–31.
4. Денисова Ю.В. Термометрия циркона из гранитоидов Приполярного Урала // *Вестник института геологии Коми НЦ УрО РАН*. Сыктывкар. 2016. № 12. С. 37–44.
5. Денисова Ю.В. Апатит Николайшорского гранитного массива (Приполярный Урал) // *Вестник института геологии Коми НЦ УрО РАН*. Сыктывкар. 2018. № 9. С. 24–29. doi: 10.19110/2221-1381-2018-9-24-29.
6. Денисова Ю.В. Петрохимические особенности гранито-гнейсов Николайшорского массива (Приполярный Урал) // *Известия Коми НЦ УрО РАН*. Сыктывкар. 2021. № 3. С. 32–40. doi: 10.19110/1994-5655-2021-3-32-40.
7. Ляхович В.В. «Цирконовый метод»: достоинства и недостатки. Статья II // *Вестник Воронежского университета. Серия геология*. 2000. Вып. 9. С. 124–127.
8. Махлаев Л.В. Гранитоиды севера Центрально- Уральского поднятия (Полярный и Приполярный Урал). Екатеринбург. Изд-во: УрО РАН. 1996. 189 с.
9. Пыстин А.М. Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. СПб. Изд-во: Наука. 1994. 208 с.
10. Пыстин А.М., Пыстина Ю.И. Докембрий Приполярного Урала: хроностратиграфический аспект // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2019. № 2. С. 34–52.
11. Пыстин А.М., Пыстина Ю.И. Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярноуральского сегмента земной коры // *Литосфера*. 2008. № 6. С. 25–38.
12. Удоратина О.В., Кобл М.А., Шуйский А.С., Капитанова В.А. Гранитоиды няртинского блока (Приполярный Урал): новые данные // *Вестник института геологии Коми НЦ УрО РАН*. Сыктывкар. 2019. № 9. С. 23–32. doi: 10.19110/2221-1381-2019-9-23-32.
13. Фишман М.В., Голдин Б.А. Гранитоиды центральной части Приполярного Урала. М.-Л. Изд-во: АН СССР. 1963. 105 с.
14. Fu B., Page F. et al. Ti-in-zircon thermometry: applications and limitations // *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2008. V. 156. P. 197–215. doi: 10.1007/s00410-008-0281-5.
15. Pupin J.P. Zircon and granite petrology // *Contrib. Miner. Petrol.* 1980. V. 73. P. 207–220.
16. Watson E.B., Harrison T.M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types // *Earth and Planetary Science Letters*. 1983. V. 64. P. 295 – 304.