

# Цирконий-гафниевый геотермометр для А-гранитов Приполярного Урала

Ю.В. Денисова

Институт геологии имени академика Н.П. Юшкина  
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,  
г. Сыктывкар  
yulden777@yandex.ru

## Аннотация

Взаимосвязь колебаний циркония и гафния в магматическом цирконе и граните позволила Л.Я. Арановичу и Н.С. Бортникову разработать геотермометр на базе этого маркерного соотношения. Изучение данных силикатного анализа для породы и микрозондового анализа для циркона из гранитов А- типов севера Приполярного Урала дало возможность определить температуры формирования породы изученных массивов. Согласно проведенным расчетам, граниты Кожимского массива сформировались при температурах от 799 до 914° С (в среднем 863° С), граниты Бадьяюского массива - от 763° до 928° С (в среднем 851° С), граниты Яротского массива - от 768° до 932° С и при средней температуре 851° С. Анализ распределения на геологической схеме полученных максимальных температур подтвердил принадлежность Бадьяюского и Яротского массивов к явно выраженным трещинным плутонам, Кожимского массива к условно трещинному плутону.

## Ключевые слова:

циркон, гранит, геотермометр, Кожимский массив, Бадьяюский массив, Яротский массив, Приполярный Урал

## Введение

Схожесть атомных и ионных радиусов Hf с Zr объясняет постоянное нахождение гафния в качестве изоморфной примеси в составе минералов циркония. В большинстве таких минералов содержание гафния обычно находится в пределах от 1 до 7 мас. % [1] (для цирконов А-гранитов Приполярного Урала содержание Hf колеблется от 1,0 до 1,6 мас. % [2]). Однако гафний может заместить цирконий в составе минерала не более чем на 20 % от общего содержания Zr. При нарушении соотношения Zr/Hf < 20 происходит распад минерала [3], что и объясняет отсутствие в природе минералов гафния. Этот элемент, подобно Zr, обладает повышенной устойчивостью при изменении давления, температуры, щелочности в расплаве. Склонность гафния к постепенному накоплению относительно циркония в процессе формирования породы позволяет использовать Zr-Hf отношение в качестве индикаторного [4, 5]. Анализ такого маркера дает возможность определить сте-

# Zirconium-hafnium geothermometer for A-granites of the Subpolar Urals

Yu.V. Denisova

Institute of Geology named after academician N. P. Yuskin, Komi Science Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar  
yulden777@yandex.ru

## Abstract

Studying the relationship of fluctuations of zirconium and hafnium in magmatic zircon and mineral-containing rock allowed L.Y. Aranovich and N.S. Bortnikov to develop a geothermometer based on this marker ratio. The study of silicate and microprobe analyses from granites of A-types in the north of the Subpolar Urals made it possible to determine the rock formation temperatures of the studied massifs. According to the calculations, the granites of the Kozhim massif were formed at temperatures from 799 to 914° C, the granites of the Badyayu massif - from 763° C to 928° C, the granites of the Yarot massif - from 768° C to 932° C. The analysis of the distribution of the obtained maximum temperatures on the geological scheme confirmed that the Badyayu and Yarot massifs belong to pronounced fractured plutons, while the Kozhim massif belongs to conditionally fractured plutons.

## Keywords:

zircon, granite, geothermometer, the Kozhim massif, the Badyayu massif, the Yarot massif, the Subpolar Urals

пень фракционирования и рудоперспективности гранитов, разделить цирконы на ранние и поздние генерации [6, 7]. Комплексное изучение этих цирконий-гафниевых соотношений дает возможность определить термодиапазон для циркона и породы его содержащей.

Цель работы - выяснение температур формирования гранитов Кожимского, Бадьяюского и Яротского массивов с помощью Zr-Hf геотермометра.

## Объект исследования

На сегодняшний момент наиболее признанной классификацией гранитоидов считается так называемая «алфавитная классификация» Б. Чаппелла и А. Вайта [8], согласно которой на основе выделения петрографических, геохимических и изотопных особенностей все граниты условно разделяются на четыре типа. Отличительной особенностью S - типа, образующегося в результате переплавления осадоч-

ного материала, является высокая глиноземистость. I – тип, формирующийся за счет преобразования магматогенных субстратов, представлен преимущественно породами известково-щелочного типа. М-гранитоиды, являющиеся производными мантийных расплавов, – это обычно кварцевые диориты и тоналиты. В противовес рассмотренным типам, имеющим орогенную природу, в четвертый тип выделяются граниты анорогенных областей (А-тип), выявленные в рифтовых зонах и стабильных блоках земной коры, характеризующиеся умеренной щелочностью и высокими значениями  $Na_2O + K_2O$ ,  $FeO/Mg$ ,  $Ga/Al$ .

Для Приполярного Урала характерно преобладание как по количеству интрузивных тел, так и суммарному объему массивов гранитов А-типа. Большинство таких массивов, к которым относятся Кожимский, Бадьяюский, Яротский и др., приурочено к Центрально-Уральскому поднятию (рис. 1). Кожимский массив расположен на берегах р. Кожим в бассейнах ручьев Понью, Осю и Епкошор, представляет собой группу гранитных тел, прорывающую отложения пуйвинской свиты среднего рифея. На северо-востоке от Кожимского массива лежат Яротский и Бадьяюский массивы. Первый массив пересекает долину р. Малая Ярота и прорывает верхнерифейские отложения моринской свиты так же, как рядом лежащий Бадьяюский массив, который пересекает долины рек Малая и Большая Бадьяю в их верховьях. Рассмотренные массивы сложены розоватыми лейкократовыми гранитами, подвергавшимися процессам катаклаза [9–11].

### Методика исследования

Изучение морфологии, химического состава, включений акцессорных минералов позволяет получить разнообразную информацию о петрогенезе той или иной породы, в том числе выявить температурный режим образования этой породы на момент кристаллизации акцессория. Наиболее часто в качестве минерала-геотермометра используется циркон. До последнего времени для определения температуры минерала и цирконсодержащей породы применялись такие методики, как эволюционный анализ Дж.П. Пюпена, термометрия насыщения Е.Б. Ватсона, титановая термометрия Е.Б. Ватсона [12, 13]. В 2018 г. Л.Я. Аранович и Н.С. Бортников разработали дополнительный геотермометр, который получил название «Zr-Hf геотермометр» [14]. Данный термометр не зависит ни от колебаний количества петрогенных элементов породы, ни от достоверности определения содержания  $TiO_2$  в цирконе. Эта методика, основываясь на данных о содержаниях циркония и гафния в минерале и породе, позволяет рассчитать температуру образования для отдель-

ного кристалла, тем самым подходить к определению температурного режима дифференцированно.

Анализ разнообразных экспериментальных данных позволил Л.Я. Арановичу и Н.С. Бортникову установить взаимосвязь между температурой образования магматического циркона и породы, его содержащей, и коэффициентом распределения циркония и гафния в минерале и породе:

$$T(K) = \frac{1531}{(\ln K_d + 0.883)}, \quad K_d = \frac{(X_{Zr}^z X_{Hf}^m)}{(X_{Zr}^m X_{Hf}^z)}$$

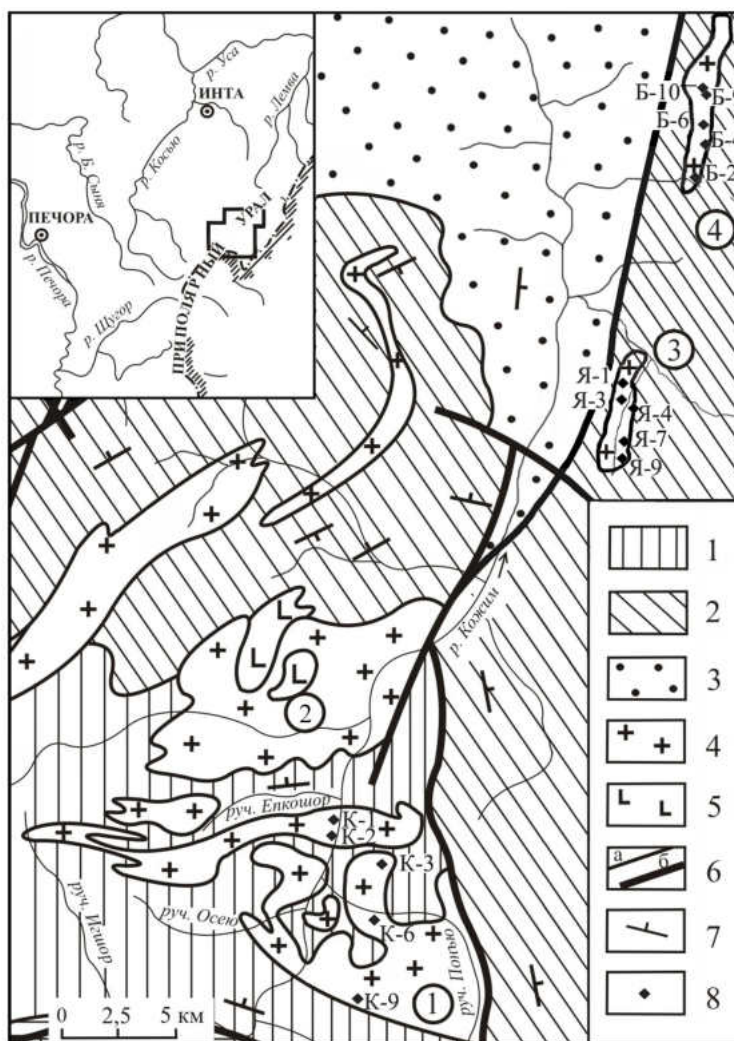


Рисунок 1. А-граниты севера Приполярного Урала (по [11] с дополнениями автора): 1 – слюдяно-кварцевые сланцы, зеленые ортосланцы, метапорфиры, кварциты; 2 – слюдяно-кварцевые сланцы, порфиры, порфириты, прослои мраморов и кварцитов; 3 – нижнепалеозойские терригенно-карбонатные отложения; 4 – граниты; 5 – габбро; 6 – геологические границы: а – стратиграфические и магматические, б – тектонические; 7 – элементы залегания плоскостных структур; 8 – точки отбора проб.

Массивы (цифры в кружочках): 1 – Кожимский; 2 – Кузьпуянский; 3 – Яротский; 4 – Бадьяюский.

Figure 1. A- granites of the north of the Subpolar Urals (with additions by the author up to [11]) 1 – mica-quartz shales, green orthoschists, metaporphyrates, quartzites; 2 – mica-quartz shales, porphyrys, porphyrites, interlayers of marbles and quartzites; 3 – Lower Paleozoic terrigenous-carbonate deposits; 4 – granites; 5 – gabbro; 6 – geological boundaries: a – stratigraphic and igneous, b – tectonic; 7 – elements of the occurrence of planar structures; 8 – sampling points.

The massifs (numbers in circles): 1 – the Kozhim massif; 2 – the Kuz'puyau massif; 3 – the Yarot massif; 4 – the Badiyau massif.

где  $K_d$  – коэффициент распределения Zr и Hf между цирконом (z) и расплавом (m),  $T(K)$  – температура, Кельвин,  $X_{Zr}^m$ ,  $X_{Hf}^m$  – содержание Zr и Hf в расплаве, мас. %,  $X_{Zr}^z$ ,  $X_{Hf}^z$  – содержание Zr и Hf в цирконе, мас. %.

### Цирконий-гафниева термометрия для гранитов Приполярного Урала

Определение температуры формирования пород Кожимского, Бадьяюского и Яротского массивов проходило по пяти пробам, отобранным по всей площади массивов. Показатели были рассчитаны на основе данных ICP-MS анализа для гранита (Институт геологии и геохимии, г. Екатеринбург, аналитик Ю.Л. Ронкин) и микрозондового анализа для циркона (ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, аналитик С.С. Шевчук) (табл. 1-3).

Для породы и циркона Кожимского гранитного массива были получены следующие сведения: проба К-1 – температуры находятся в пределе от 734 до 891 °С и в среднем составляют 814 °С, К-2 – от 823 до 874 °С и в среднем – 853 °С, К-4 – от 855 до 904 °С, в среднем – 880 °С, К-6 – от 852 до 914 °С и в среднем – 879 °С, проба К-9 – от 799 до 886 °С и в среднем – 827 °С. Полученные температуры показывают, что при образовании Кожимского массива материнский расплав был нагрет равномерно по всему объему, при этом его температура колебалась от 799 до 914 °С и в среднем составляла 863 °С. Согласно проведенным вычислениям, для гранита и циркона Бадьяюского массива отмечают-

ся такие температурные диапазоны, как: проба Б-2 – от 790 до 903 °С и в среднем – 848 °С, Б-4 – от 763 до 881 °С и в среднем – 826 °С, Б-6 – от 834 до 928 °С и в среднем – 890 °С, Б-9 – от 821 до 908 °С и в среднем – 868 °С, Б-10 – от 785 до 899 °С и в среднем – 825 °С. Становление Бадьяюского гранитного массива, согласно геотермометру Арановича-Бортникова, происходило при температурах от 763 до 928 °С при средней температуре 851 °С. Для породы и циркона Яротского массива также характерны высокие температуры образования: проба Я-1 – от 813 до 904 °С и в среднем – 866 °С, Я-3 – от 798 до 889 °С и в среднем – 832 °С, Я-4 – от 831 до 933 °С и в среднем – 876 °С, Я-9 – от 768 до 914 °С и в среднем – 850 °С, Я-7 – от 838 до 932 °С и в среднем – 881 °С. Общий температурный диапазон для яротских гранитов имеет вид: от 768 до 932 °С и при средней температуре 851 °С.

Для гранитов Кожимского массива характерен больший разброс температур, что и сказывается на итоговой средней, которая оказывается чуть меньше средних температур для пород Бадьяюского и Яротского массивов. Согласно гистограммам (рис. 2–4), 60 % полученных температур для Кожимского массива приходятся на интервал 850–900 °С, для пород Бадьяюского и Яротского массивов температуры сконцентрировались в интервалах 800–850 °С (36 и 36 % соответственно) и 850–900 °С (36 и 40 % соответственно). Общая температура расплавов, сформировавших Кожимский массив, была более высокая, чем расплавов, образовавших Бадьяюский и Яротский массивы.

Таблица 1

Zr- Hf - геотермометрия для гранитов Кожимского массива

Table 1

Zr- Hf- geothermometry for granites of the Kozhim massif

№ зерна	Проба	Содержание элемента в цирконе, мас. %		Содержание элемента в граните, мас. %		T, °C	№ зерна	Проба	Содержание элемента в цирконе, мас. %		Содержание элемента в граните, мас. %		T, °C
		Zr <sub>pp</sub>	Hf <sub>pp</sub>	Zr <sub>gr</sub>	Hf <sub>gr</sub>				Zr <sub>pp</sub>	Hf <sub>pp</sub>	Zr <sub>gr</sub>	Hf <sub>gr</sub>	
1	К-1	46,78	1,52	60,62	3,38	803	26	К-4	47,60	1,35	82,23	3,67	872
2		46,49	1,37	60,62	3,38	734	27		47,35	1,35	82,23	3,67	877
3		47,99	1,54	60,62	3,38	799	28		47,99	1,39	82,23	3,67	891
4		47,47	1,62	60,62	3,38	841	29		46,15	1,33	82,23	3,67	886
5		46,88	1,45	60,62	3,38	767	30		46,98	1,33	82,23	3,67	871
6		47,52	1,72	60,62	3,38	891	31		48,00	1,13	102,23	3,78	875
7		46,32	1,51	60,62	3,38	805	32		47,52	1,12	102,23	3,78	875
8		47,56	1,69	60,62	3,38	875	33		46,95	1,16	102,23	3,78	914
9		46,22	1,44	60,62	3,38	772	34		47,52	1,15	102,23	3,78	896
10		47,45	1,65	60,62	3,38	857	35		47,03	1,11	102,23	3,78	876
11	К-2	46,92	1,45	99,77	4,88	868	36	К-6	47,44	1,09	102,23	3,78	852
12		46,21	1,41	99,77	4,88	857	37		47,77	1,14	102,23	3,78	885
13		46,12	1,41	99,77	4,88	858	38		47,28	1,13	102,23	3,78	887
14		46,12	1,41	99,77	4,88	858	39		47,55	1,11	102,23	3,78	870
15		47,22	1,47	99,77	4,88	874	40		48,74	1,13	102,23	3,78	861
16		48,21	1,45	99,77	4,88	845	41		47,44	1,44	88,15	4,45	827
17		48,87	1,49	99,77	4,88	856	42		46,39	1,45	88,15	4,45	851
18		48,85	1,43	99,77	4,88	823	43		47,12	1,38	88,15	4,45	799
19		46,75	1,42	99,77	4,88	853	44		46,35	1,51	88,15	4,45	886
20		46,73	1,39	99,77	4,88	836	45		45,67	1,41	88,15	4,45	841
21	К-4	47,37	1,37	82,23	3,67	889	46	К-9	47,15	1,38	88,15	4,45	799
22		47,44	1,33	82,23	3,67	863	47		47,89	1,45	88,15	4,45	825
23		48,53	1,41	82,23	3,67	894	48		47,44	1,43	88,15	4,45	821
24		46,78	1,30	82,23	3,67	855	49		46,33	1,38	88,15	4,45	812
25		46,95	1,38	82,23	3,67	904	50		46,45	1,38	88,15	4,45	810

Таблица 2

## Zr- Hf - геотермометрия для гранитов Бадьяюского массива

Table 2

## Zr- Hf- geothermometry for granites of the Badiayu massif

№ зерна	Проба	Содержание элемента в цирконе, мас. %		Содержание элемента в граните, мас. %		T, °C	№ зерна	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	Б-2	48,03	1,35	102,15	4,66	847	26	Б-6	48,23	1,28	98,55	4,12	872
2		47,06	1,38	102,15	4,66	871	27		47,25	1,31	98,55	4,12	910
3		46,15	1,37	102,15	4,66	893	28		47,52	1,29	98,55	4,12	891
4		47,28	1,33	102,15	4,66	847	29		46,81	1,28	98,55	4,12	898
5		47,40	1,43	102,15	4,66	903	30		46,73	1,32	98,55	4,12	928
6		46,78	1,29	102,15	4,66	830	31		47,03	1,32	111,19	5,11	838
7		47,79	1,41	102,15	4,66	886	32		48,11	1,32	111,19	5,11	820
8		47,23	1,29	102,15	4,66	824	33		46,81	1,35	111,19	5,11	863
9		46,49	1,22	102,15	4,66	790	34		47,37	1,37	111,19	5,11	863
10		44,55	1,17	102,15	4,66	791	35		48,31	1,42	111,19	5,11	878
11	Б-4	46,31	1,22	109,12	4,92	802	36	Б-9	48,88	1,43	111,19	5,11	873
12		47,32	1,34	109,12	4,92	864	37		46,30	1,29	111,19	5,11	833
13		47,37	1,37	109,12	4,92	880	38		48,13	1,45	111,19	5,11	902
14		47,78	1,33	109,12	4,92	846	39		48,03	1,46	111,19	5,11	908
15		47,91	1,37	109,12	4,92	870	40		47,03	1,41	111,19	5,11	895
16		48,01	1,32	109,12	4,92	838	41		46,81	1,22	112,61	4,89	825
17		47,45	1,18	109,12	4,92	763	42		48,26	1,28	112,61	4,89	842
18		48,30	1,27	109,12	4,92	803	43		47,34	1,07	112,61	4,89	724
19		48,14	1,21	109,12	4,92	770	44		47,93	1,22	112,61	4,89	810
20		48,02	1,29	109,12	4,92	821	45		47,08	1,18	112,61	4,89	797
21	Б-6	46,81	1,22	98,55	4,12	856	46	Б-10	48,01	1,21	112,61	4,89	798
22		46,46	1,27	98,55	4,12	897	47		48,13	1,22	112,61	4,89	804
23		46,81	1,30	98,55	4,12	912	48		48,29	1,25	112,61	4,89	820
24		48,52	1,23	98,55	4,12	834	49		48,11	1,33	112,61	4,89	874
25		47,83	1,32	98,55	4,12	906	50		47,47	1,35	112,61	4,89	899

Таблица 3

## Zr- Hf - геотермометрия для гранитов Яротского массива

Table 3

## Zr- Hf- geothermometry for granites of the Yarot massif

№ зерна	Проба	Содержание элемента в цирконе, мас. %		Содержание элемента в граните, мас. %		T, °C	№ зерна	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	Я-1	47,56	1,35	92,87	4,37	830	26	Я-4	48,22	1,51	113,23	5,22	933
2		49,22	1,53	92,87	4,37	907	27		48,31	1,38	113,23	5,22	851
3		47,37	1,45	92,87	4,37	893	28		48,35	1,44	113,23	5,22	887
4		46,99	1,42	92,87	4,37	882	29		49,55	1,38	113,23	5,22	831
5		49,77	1,52	92,87	4,37	891	30		48,69	1,41	113,23	5,22	863
6		46,76	1,30	92,87	4,37	813	31		47,41	1,31	99,13	4,39	857
7		47,27	1,44	92,87	4,37	889	32		46,81	1,39	99,13	4,39	920
8		47,15	1,37	92,87	4,37	848	33		46,95	1,39	99,13	4,39	918
9		48,43	1,42	92,87	4,37	856	34		47,37	1,33	99,13	4,39	870
10		46,33	1,35	92,87	4,37	851	35		47,52	1,33	99,13	4,39	868
11	Я-3	46,27	1,46	80,43	3,92	889	36	Я-7	47,77	1,29	99,13	4,39	838
12		47,55	1,37	80,43	3,92	814	37		47,27	1,29	99,13	4,39	847
13		47,56	1,43	80,43	3,92	848	38		46,88	1,41	99,13	4,39	932
14		46,33	1,39	80,43	3,92	846	39		48,09	1,32	99,13	4,39	851
15		47,53	1,38	80,43	3,92	820	40		46,19	1,35	99,13	4,39	906
16		48,51	1,41	80,43	3,92	821	41		47,37	1,34	110,15	4,97	861
17		48,02	1,39	80,43	3,92	817	42		48,06	1,31	110,15	4,97	831
18		47,28	1,37	80,43	3,92	818	43		47,78	1,37	110,15	4,97	872
19		47,13	1,33	80,43	3,92	798	44		48,34	1,39	110,15	4,97	875
20		46,15	1,39	80,43	3,92	849	45		48,76	1,37	110,15	4,97	855
21	Я-4	48,56	1,49	113,23	5,22	914	46	Я-9	47,44	1,19	110,15	4,97	768
22		48,13	1,47	113,23	5,22	909	47		47,03	1,27	110,15	4,97	823
23		47,51	1,35	113,23	5,22	847	48		47,44	1,25	110,15	4,97	804
24		48,26	1,42	113,23	5,22	876	49		47,25	1,39	110,15	4,97	895
25		47,79	1,37	113,23	5,22	854	50		47,28	1,42	110,15	4,97	914

Это подтверждают ранее полученные температуры, определенные с помощью кристалло-эволюционного анализа [15].

Изучение распределения точек максимальных средних температур образования пород рассмотренных массивов позволяет выявить область наибольших температур (рис. 5). Для Кожимского массива определена область наибольшего диаметра, указывающая на образование массива за счет мощного потока расплавов. В случае Яротского массива область максимальных температур полностью повторяет контур рассмотренного массива. Подобное расположение характерно для интрузий трещинного типа, когда материнский расплав движется по системе трещин в земной коре [16]. Бадьяюский массив имеет подобное залегание пород, как в случае яротских гранитов, но выявленная область имеет точечный характер. Этот массив также, вероятно, является интрузией трещинного типа, но формирующие его расплавы двигались по вторичной системе трещин, основание которых приурочено к источнику, находящемуся в районе Яротского массива.

## Заключение

Анализ содержаний циркония и гафния в граните и акцессорном цирконе для Кожимского, Бадьяюского и Яротского массивов позволил не только установить диапазоны температур формирования этих массивов, но и выявить способ продвижения материнского расплава сквозь вмещающие породы. Согласно геотермометру Арановича-Бортникова, температурный диапазон для пород Кожимского массива находится в пределах 799–914° С и в среднем составляет 863 °С. Для Бадьяюского массива термодиапазон, рассчитанный по количеству циркония и гафния, имеет вид: от 763 до 928° С при средней температуре 851° С. Формирование яротских гранитов происходило при подобных температурах: от 768 до 932 °С и при средней – 851° С.

Выявленная область максимальных температур подтверждает предположение Л.В. Махлаева, относившего Бадьяюский и Яротский массивы к явно выраженным трещинным плутонам [9]. Образование этих массивов произошло за счет прорывания расплавом пород мороинской свиты по линейной системе трещин. В случае Кожимского массива он может считаться трещинным плутоном. То же самое полагал Л.В. Махлаев, только при условии прорывания расплавом отложений пуйвинской свиты круговой системой трещин.

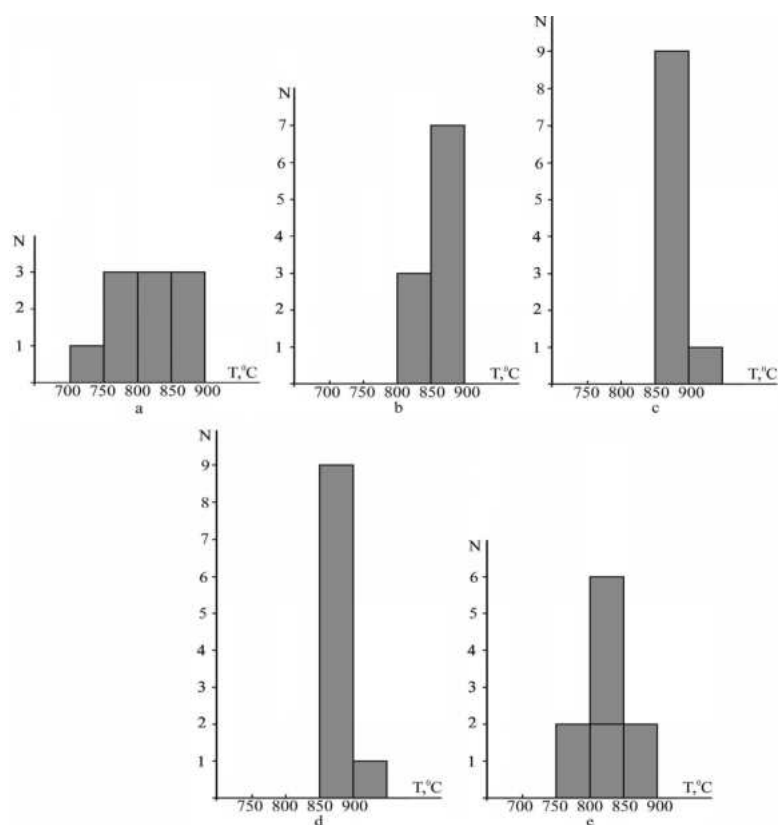


Рисунок 2. Температуры образования гранитов Кожимского массива, пробы: а) К-1; б) К-2; в) К-4; д) К-6; е) К-9.

Figure 2. Temperatures of granite formation of the Kozhim massif: a) sample K-1, b) sample K-2, c) sample K-4, d) sample K-6, e) sample K-9.

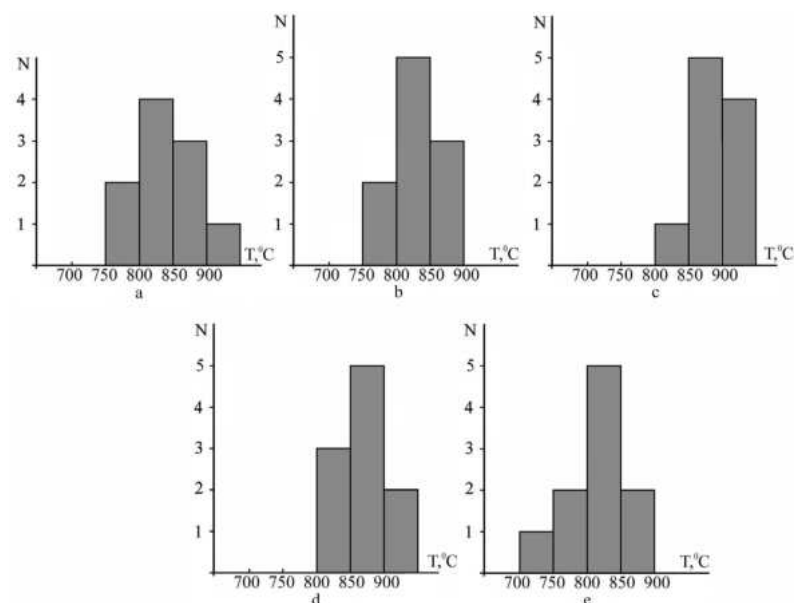


Рисунок 3. Температуры образования гранитов Бадьяюского массива, пробы: а) Б-2; б) Б-4; в) Б-6; д) Б-9; е) Б-10.

Figure 3. Temperatures of granite formation of the Badayuskiy massif: a) sample B-2, b) sample B-4, c) sample B-6, d) sample B-9, e) sample B-10.

## Литература

1. Путилин, Ю.М. Синтез минералов / Ю.М. Путилин, Ю.А. Белякова, В.П. Голенко. Т. 2. – Москва: Недра, 1987. – 256 с.

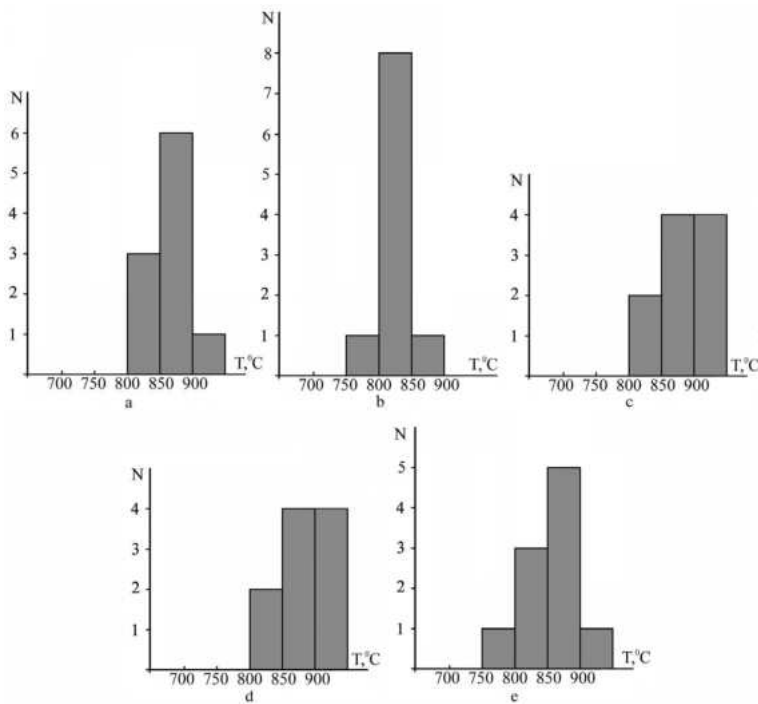


Рисунок 4. Температуры образования гранитов Яротского массива, пробы: а) Я-1; б) Я-3; в) Я-4; д) Я-7; е) Я-9.  
Figure 4. Temperatures of granite formation of the Yarot massif: а) sample Ya-1, б) sample Ya-3, в) sample Ya-4, д) sample Ya-7, е) sample Ya-9.

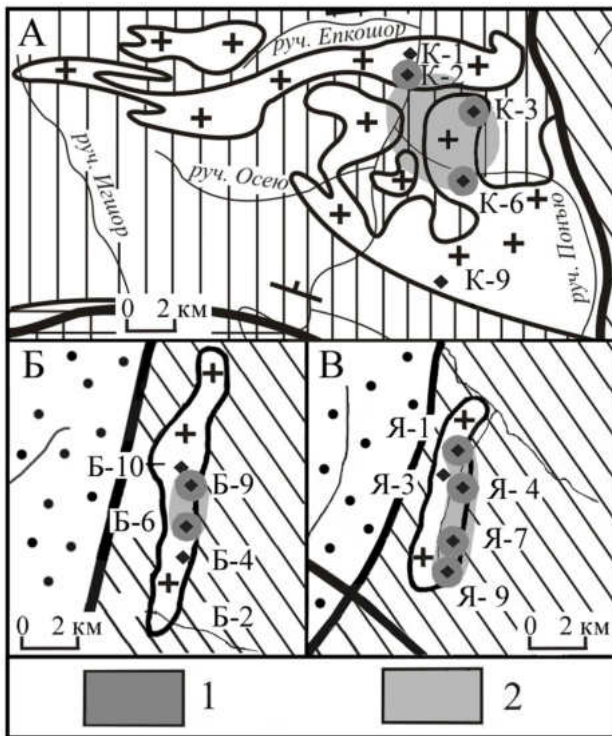


Рисунок 5. Изменение температурного режима образования породы в пределах Кожимского (А), Бадьяюского (Б) и Яротского (В) массивов. 1 – средняя температура образования гранита – от 850 до 900° С; 2 – область максимальных температур.  
Figure 5. Changes in the temperature regime of rock formation within the Kozhimsky (A), Badiayusky (B) and Yarotsky (V) massifs. 1 – the average temperature of granite formation from 850 °C to 900° C; 2 – the area of maximum temperatures.

- Денисова, Ю.В. Типоморфические и типохимические особенности акцессорных цирконов гранитоидов Приполярного Урала / Ю.В. Денисова // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2014. – № 5. – С. 9–16.
- Шека, И.А. Химия гафния / И.А. Шека, К.Ф. Карлышева. – Киев: Наукова думка, 1973. – 456 с.
- Багдасаров, Э.А. Индикаторное значение цирконий-гафниевого отношения цирконов / Э.А. Багдасаров // Типоморфизм, синтез и использование циркона. – Киев: Наукова думка, 1989, – С. 59–64.
- Ляхович, В.В. «Цирконовый метод»: достоинства и недостатки. Статья II / В.В. Ляхович // Вестник Воронежского университета. Серия геология. – 2000. – Вып. 9. – С. 124–127.
- Ляхович, В.В. Акцессорные минералы: их генезис, состав, классификация и индикаторные признаки / В.В. Ляхович. – Москва: Наука, 1968. – 276 с.
- Денисова, Ю.В. Петрогенетическое значение  $ZrO_2/HfO_2$  отношения в акцессорном цирконе гранитов Приполярного Урала / Ю.В. Денисова // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2015. – № 2. – С. 23–31.
- Chappel, B.W. Two contrasting granite types / B.W. Chappel, A.-J. R. Whitte // Pacif. Geol. – 1974. – V. 8. – P. 173–174.
- Махлаев, Л.В. Гранитоиды севера Центрально-Уральского поднятия (Полярный и Приполярный Урал) / Л.В. Махлаев. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 189 с.
- Фишман, М.В. Гранитоиды центральной части Приполярного Урала / М.В. Фишман, Б.А. Голдин. – Москва – Ленинград: АН СССР, 1963. – 105 с.
- Пыстин, А.М. Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярноуральского сегмента земной коры / А.М. Пыстин, Ю.И. Пыстина // Литосфера. – 2008. – № 11. – С. 25–38.
- Денисова, Ю.В. Акцессорные геотермометры гранитов. / Ю.В. Денисова // Тенденции развития науки и образования. – 2020. – № 61. – Ч. 2. – С. 12–15. DOI: 10.18411/ij-05-2020-22.
- Денисова, Ю.В. Термометрия насыщения циркона, апатита, монацита (Кожимский массив, Приполярный Урал) / Ю.В. Денисова // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2019. – № 3 (39). – С. 25–30. DOI: 10.19110/1994-5655-2019-3-47-52.
- Аранович, Л.Я. Новый Zr – Hf геотермометр для магматических цирконов / Л.Я. Аранович, Н.С. Бортников // Петрология. Т. 26. – 2018. – № 2. – С. 109–115.
- Денисова, Ю.В. Термометрия циркона из гранитоидов Приполярного Урала / Ю.В. Денисова // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2016. – № 12. – С. 37–44.

16. Горшков, Г.П. Общая геология / Г.П. Горшков, А.Ф. Якушова. – Москва: Изд-во МГУ, 1973. – 592 с.

## References

1. Putilin, Yu.M. Sintez mineralov [Synthesis of minerals] / Yu.M. Putilin, Yu.A. Belyakova, V.P. Golenko. Vol. 2. – Moscow: Nedra, 1987. – 256 p.
2. Denisova, Yu.V. Tipomorficheskie i tipohimicheskie osobennosti aktsessornykh tsirkonov granitoidov Pripolyarnogo Urala [Typomorphic and typochemical features of accessory zircons of granitoids of the Subpolar Urals] / Yu.V. Denisova // Vestnik of the Institute of Geology, Komi Science Centre, Ural Branch of the RAS. – 2014. – No. 5. – P. 9-16.
3. Sheka, I.A. Khimiya gafniya [Chemistry of hafnium] / I.A. Sheka, K.F. Karlysheva. – Kiev: Naukova dumka, 1973. – 456 p.
4. Bagdasarov, E.A. Indikatornoe znachenie tsirkonij-gafnievogo otosheniya tsirkonov [Indicator value of zirconium-hafnium ratio of zircons] / E.A. Bagdasarov // Typomorphism, synthesis and use of zircon. Kiev: Naukova dumka, 1989. – P. 59-64.
5. Lyakhovich, V.V. «Tsirkonovyy metod»: dostoinstva i nedostatki. Statya II ["Zircon method": advantages and disadvantages. Article II] / V.V. Lyakhovich // Vestnik of Voronezh University. Geology series. – 2000. – Issue. 9. – P. 124-127.
6. Lyakhovich, V.V. Aktsessornyye mineraly: ih genезis, sostav, klassifikatsiya i indikatornye priznaki [Accessory minerals: their genesis, composition, classification and indicator features] / V.V. Lyakhovich. – Moscow: Nauka, 1968. – 276 p.
7. Denisova, Yu.V. Petrogeneticheskoe znachenie ZrO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> otosheniya v aktsessornom tsirkone granitov Pripolyarnogo Urala [Petrogenetic significance of the ZrO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> ratio in accessory zircon from granites of the Subpolar Urals] / Yu.V. Denisova // Vestnik of the Institute of Geology, Komi Science Centre, Ural Branch of the RAS. – 2015. – No. 2. – P. 23-31.
8. Chappel, B.W. Two contrasting granite types / B.W. Chappel, A.-J.R. Whitte // Pacif. Geol. – 1974. – Vol. 8. – P. 173-174.
9. Makhlaev, L.V. Granitoidy severa Centralno-Uralskogo podnyatiya (Polyarnyj i Pripolyarnyj Ural) [Granitoids of the north of the Central Ural uplift (Polar and Subpolar Urals)] / L.V. Makhlaev. – Yekaterinburg: Ural Branch of the RAS, 1996. – 189 p.
10. Fishman, M.V. Granitoidy centralnoj chasti Pripolyarnogo Urala [Granitoids of the central part of the Subpolar Urals] / M.V. Fishman, B.A. Goldin. – Moscow-Leningrad: the USSR Academy of Sciences, 1963. – 105 p.
11. Pystin, A.M. Metamorfizm i granitoobrazovanie v proterozojsko-rannepaleozojskoj istorii formirovaniya Pripolyarnouralskogo segmenta zemnoj kory [Metamorphism and granite formation in the Proterozoic-Early Paleozoic history of the formation of the Subpolar Ural segment of the earth's crust] / A.M. Pystin, Yu.I. Pystina // Lithosphere. – 2008. – No. 11. – P. 25-38.
12. Denisova, Yu.V. Aktsessornyye geotermometry granitov [Accessory geothermometers of granites] / Yu.V. Denisova // Trends in the development of science and education. – 2020. – No. 61. – Part 2. – P. 12-15. DOI: 10.18411/lj-05-2020-22.
13. Denisova, Yu.V. Termometriya насыshcheniya tsirkona, apatita, monatsita (Kozhimskij massiv, Pripolyarnyj Ural) [Saturation thermometry of zircon, apatite, monazite (Kozhim massif, Subpolar Urals)] / Yu.V. Denisova // Proceedings of the Komi Science Centre, Ural Branch of the RAS. – 2019. – No. 3 (39). – P. 25-30. DOI 10.19110/1994-5655-2019-3-47-52.
14. Aranovich, L.Ya. Novyy Zr – Hf geotermometr dlya magmaticheskikh tsirkonov [New Zr – Hf geothermometer for igneous zircons] / L.Ya. Aranovich, N.S. Bortnikov // Petrology. Vol. 26. – 2018. – No. 2. – P. 109-115.
15. Denisova, Yu.V. Termometriya tsirkona iz granitoidov Pripolyarnogo Urala [Thermometry of zircon from granitoids of the Subpolar Urals] / Yu.V. Denisova // Vestnik of the Institute of Geology, Komi Science Centre, Ural Branch of the RAS. – 2016. – No. 12. – P. 37-44.
16. Gorshkov, G.P. Obshchaya geologiya [General geology] / G.P. Gorshkov, A.F. Yakushova. – Moscow: Publishing house of Moscow State University, 1973. – 592 p.

## Благодарность (госзадание)

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

Геохимические исследования выполнены в лаборатории органической геохимии ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН на оборудовании ЦКП «Геонаука».

Автор выражает благодарность рецензенту за ценные критические замечания и рекомендации, которые способствовали улучшению содержания статьи.

## Информация об авторах:

Денисова Юлия Вячеславовна – младший научный сотрудник Института геологии имени академика Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН; <https://orcid.org/0000-0003-0832-1063> (Российская Федерация, 167982, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: yulden777@yandex.ru).

**About the authors:**

**Yulia V. Denisova** – Junior Researcher, Institute of Geology, Federal Research Centre Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; <https://orcid.org/0000-0003-0832-1063> (54 Pervomayskaya str., Syktyvkar, Komi Republic, 167982, Russian Federation; e-mail: [yulden777@yandex.ru](mailto:yulden777@yandex.ru)).

**Для цитирования:**

Денисова, Ю.В. Цирконий-гафниевый геотермометр для А-гранитов Приполярного Урала / Ю.В. Денисова // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия "Науки о Земле". – 2022. – № 2 (54). – С. 64-71. УДК 550.4,551.2, 552.3. DOI 10.19110/1994-5655-2022-2-64-71

**For citation:**

Denisova, Yu.V. Zirconium-hafnium geothermometer for A-granites of the Subpolar Urals / Yu.V. Denisova // Proceedings of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences Series. – 2022. – № 2 (54). – P. 64-71. УДК 550.4,551.2,552.3. DOI 10.19110/1994-5655-2022-2-64-71

Дата поступления рукописи: 16.12.2021

Прошла рецензирование: 01.02.2022

Принято решение о публикации: 04.04.2022

Received: 16.12.2021

Reviewed: 01.02.2022

Accepted: 04.04.2022