УДК 549. 514:552.321 DOI: 10.19110/2221-1381-2016-12-37-44

ТЕРМОМЕТРИЯ ЦИРКОНА ИЗ ГРАНИТОИДОВ ПРИПОЛЯРНОГО УРАЛА

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

В настоящее время накоплен значительный опыт применения циркона в качестве геотермометра. Это позволяет, применяя различные методики, определить более точный температурный режим формирования той или иной породы. В данной работе представлены результаты изучения акцессорного циркона из гранитоидных массивов Приполярного Урала (Бадьяюского, Яротского, Кожимского и Николайшорского массивов). Определены температуры кристаллизации минерала с использованием термометрии насыщения и классического эволюционно-морфологического анализа. Проведено сравнение данных, полученных разными способами. Уточнены температуры формирования гранитов изученных массивов Приполярного Урала.

Ключевые слова: акцессорный циркон, гранитоид, Бадьяюский массив, Яротский массив, Кожимский массив, Николайшорский массив, Приполярный Урал, Пюпин, Ватсон.

TEMPERATURE SURVEY OF ZIRCON FROM THE GRANITOIDS OF THE SUBPOLAR URALS

Yu. V. Denisova
Institute of geology of Komi SC UB RAS, Syktyvkar

Now significant experience of use of zircon as geothermometer was accumulated. This allows applying different methodologies to determine a more accurate temperature mode of formation of the given rocks. The study results of accessory granitoids zircon of the Subpolar Urals (the Badjaju, Yarot, Kozhim and Nikolaihsor massifs) are presented in this paper. The temperatures of crystallization of the mineral using thermometry of zircon saturation and the classic evolutionary — morphological analysis were determined. The comparison of data, obtained in different ways, was carriedout. The temperatures of formation of the studied massifs of the Subpolar Urals were specified.

Keywords: accessory zircon, granitoid, the Badjaju massif, the Yarot massif, the Kozhim massif, the Nikolaihsor massif, the Subpolar Urals, Pupin, Watson.

Введение

Изучение геохимических и морфологических особенностей циркона, являющегося одним из наиболее важных минералов-индикаторов, позволяют получить различного рода информацию (возраст формирования породы и наложенных процессов, кислотность-щелочность среды минералообразования, источники сноса, расчленение и корреляция стратиграфических подразделений), а также использовать этот минерал в качестве геотермометра. На данный момент применяются различные методы термометрии циркона, охватывающие различные уровни организации вещества. Так, термометрия насыщения циркона [8, 9] базируется на исследовании химического состава породы, эволюционно-кристалломорфологический анализ — на изучении морфологических особенностей минерала [6, 7], в основе метода Ti-in-zircon лежит определение содержаний титана в кристалле.

Целью настоящей работы является определение температурного режима кристаллизации циркона из Бадьяюского, Яротского, Кожимского и Николайшорского массивов, что позволит уточнить температуры образования гранитов, полученные группой исследователей под руководством М. В. Фишмана.

Объекты изучения

На Приполярном Урале отмечается более тридцати массивов гранитоидов различного состава и морфологии, часть из них показана на рис. 1. На основе геологических и геохронологических данных они разделяются на три гранитоидных комплекса: раннепротерозойский николайшорский, предположительно среднерифейский кожимский и вендский (или венд-ско-раннекембрийский) сальнеро-маньхамбовский [4].

В представленной работе в качестве объектов исследования были выбраны четыре массива, представляющие все три перечисленных выше комплекса. Самым древним из них является Николайшорский массив, относящийся к николайшорскому комплексу. В свою очередь, Кожимский массив относится к кожимскому, а Бадьяюский и Яротский массивы — к сальнеро-маньхамбовскому комплексам.

Бадьяюский массив расположен в долинах рек Малая и Большая Бадьяю. Это согласное пластообразное тело, сложенное светло-серыми массивными среднезернистыми лейкогранитами. Для гранитов Бадьяюского массива характерно повсеместное проявление катаклаза. Считается, что этот массив является непосредственным продолжением расположенного севернее Лемвинского гранитного массива.

Яротский массив также представляет собой узкое пластинообразное тело, которое пересекает долину реки Малая Ярота и приурочено к тому же протяженному дизъюнктиву, в зоне которого расположены Бадьяюский и Лемвинский массивы. Если в случае Бадьяюского массива умеренно катаклазированные граниты, практически сохранившие свой минеральный состав, слагают не менее половины объема тела, то в яротских эти породы занимают не более 15 % и представляют собой светло-серые массивные среднезернистые лейкократовые разности. Вмещающими породами для Бадьяюского и Яротского массивов являются верхнерифейские отложения мороинской свиты.

На левом и правом берегах Кожима в бассейнах рек Осею и Понью находится **Кожимский массив.** Это группа вытянутых изолированных тел, состоящих из плотных слегка гнейсовидных среднезернистых лейкократовых гранитов розоватого цвета. Граниты этого массива всегда катаклазированы и рассланцованы.

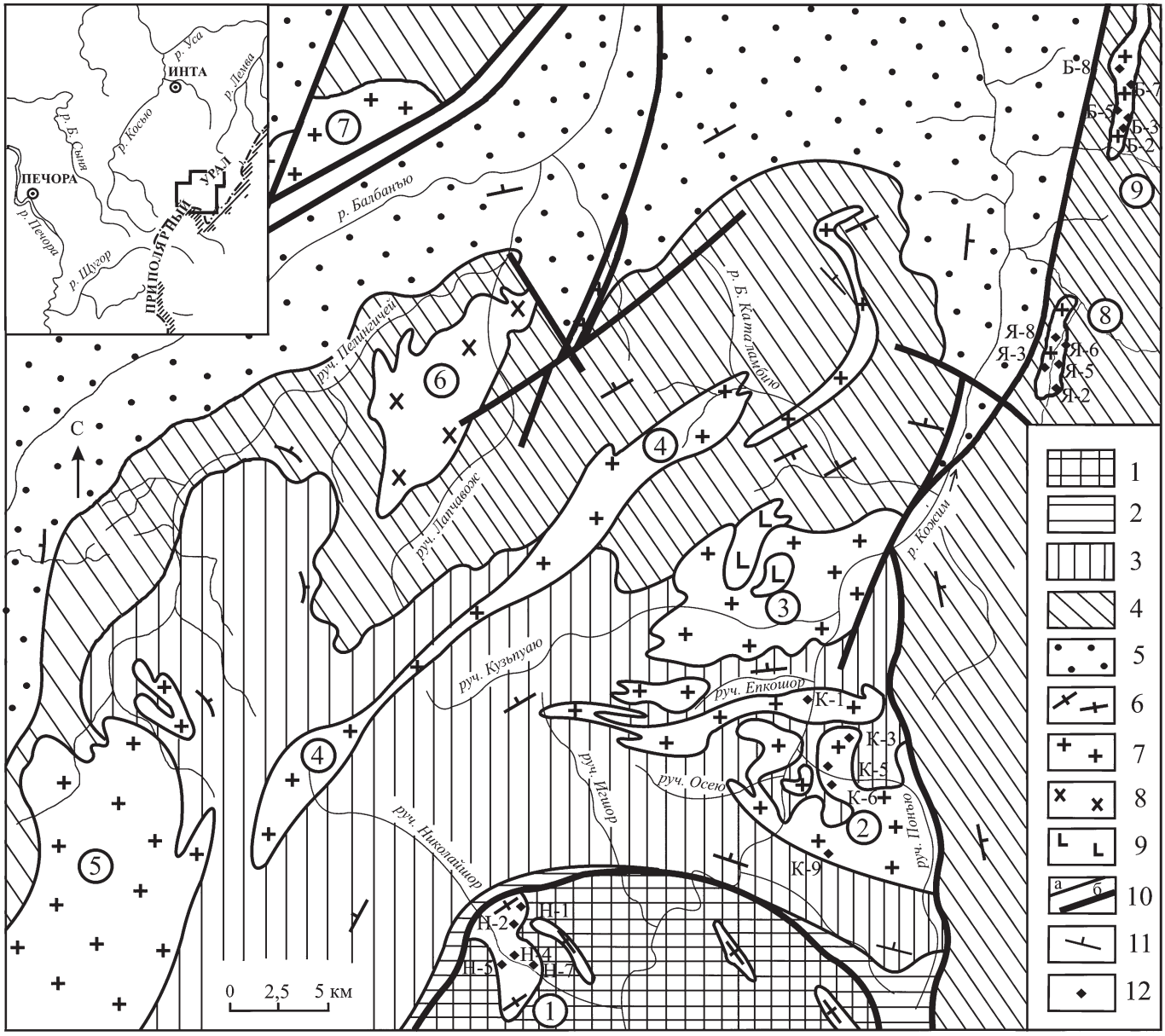

Рис. 1. Схема геологического строения северной части Приполярного Урала по А. М. Пыстину (Пыстин, 2008): 1 — няртинский гнейсовый комплекс (PR_1): биотитовые и двуслюдяные гнейсы с простоями амфиболитов; 2 — щокурьинская свита (RF_1): известковистые кристаллические сланцы, мраморы, кварциты, амфиболовые сланцы; 3 — пуйвинская свита (RF_2): слюдянокварцевые сланцы, зеленые ортосланцы, метапорфиры, кварциты; 4 — хобеинская (RF_3), мороинская (RF_3) и саблегорская (RF_3 _ V) свиты нерасчлененные: слюдянокварцевые сланцы, порфиры, порфириты, прослои мраморов и кварцитов; 5 — нижнепалеозойские терригенно-карбонатные отложения; 6 — гранитогнейсы Николайшорского массива (PR_1); 7 — граниты кожимского (RF_2) и сальнеро-маньхамбовского комплексов (V — $Є_1$) нерасчлененные; 8 — гранодиориты сальнеро-маньхамбовского комплекса (V — $Є_1$); 9 — массивы габбро (RF_3 — V); 10 — геологические границы: а — стратиграфические и магматические, б — тектонические; 11 — элементы залегания плоскостных структур; 12 — точки отбора проб.
Массивы (цифры в кружочках): 1 — Николайшорский; 2 — Кожимский; 3 — Кузьпуаюский; 4 — Хаталамба-Лапчинский; 5 — Народинский; 6 — Лапчавожский; 7 — Малдынырский; 8 — Яротский; 9 — Бадьяюский

Fig. 1. Structure map of the northern part of Subpolar Urals according to A. M. Pystin (Pystin, 2008). 1 — nyartinsky gneiss complex (PR_1): biotite and two-mica gneisses with amphibolites layers; 2 — schokurinskaya suite (RF_1): calcareous shales, marbles, quartzites, amphibole shales; 3 — puyvinskaya suite (RF_2): mica-quartz shales, green orthoshales, metaporfyry, quartzites; 4 — hobeinskaya (RF_3), moroinskaya (RF_3) and sablegorskaya (RF_3 — V) poorly defined suites: mica-quartz shales, porphyry, porphyrites, marble and quartzite layers; 5 — Lower Paleozoic terrigenous carbonate deposits; 6- granitoid gneisses of Nikolayshorsky massif (PR_1); 7 — granites of kozhimsky (RF_2) and salnero-manhambovsky complexes (V — $Є_1$) poorly defined; 8 — granodiorites of salnero-manhambovsky complex (V — $Є_1$); 9 — massifs of gabbro (RF_3 — V); 10 — geological boundaries: a — stratigraphic and magmatic, б — tectonic; 11 — elements of occurrence of planar structures. 12 — sampling points.
Massifs (numbers in circles): 1 — Nikolayshorsky; 2 — Kozhimsky; 3 — Kuzpuayusky; 4 — Khatalamba- Lapchinsky; 5 — Narodinsky; 6 — Lapchavozhsky; 7 — Maldynyrsky; 8 — Yarotsky; 9 — Badyayusky

Кожимский массив располагается среди отложений пуйвинской свиты среднего рифея.

Николайшорский массив, приуроченный к Няртинскому блоку, образует вытянутое узкое согласное пластовое тело, в пределах которого отмечаются плагиограниты и нормальные калишпатовые граниты. Последние представляют собой серовато-зеленые мелкозернистые породы, иногда порфировидные. Эти граниты в основном имеют гнейсовидный облик и взаимные переходы к гнейсам и кристаллическим сланцам. Породы сильно катаклазированы. Николайшорский автохтонный массив пространственно ассоциирует с гнейсами няртинского метаморфического комплекса раннепротерозойского возраста. Изученные гранитные массивы, согласно классификации Б. Чаппела, относятся к А-типу, исключение составляет Николайшорский массив, сложенный S-гранитами [3].

Опробование гранитоидных массивов проводилось точечным методом с отбором 5 частных проб по каждому массиву. Для каждой пробы отбирались куски неизмененной породы общим весом в среднем 10—15 кг, содержание циркона в которых для Бадьяюского и Яротского массивов составило в среднем 22—28 г/т. Для гранитов Кожимского и Николайшорского массивов характерны более низкие содержания циркона (8—12 г/т).

Методы исследования

В работе использованы методы оценки температур образования гранитов на основе степени насыщения циркония в породе (термометрия насыщения Е. Ватсона) и морфологических особенностей циркона (классический эволюционно-морфологический анализ Ж. Пюпина и Г. Тюрко).

На основе исследований циркона, проведенных с использованием термометрии насыщения (определяющей температуры кристаллизации по распределению содержания циркония между собственно цирконом и цирконсодержащей породой), Е. Ватсон определил, что уровень насыщения циркония в породе, необходимый для образования минерала, находится в сильной зависимости от молярной пропорции ($Na_2O + K_2O/Al_2O$) в расплаве и в слабой — от температуры и содержаний Si_2O и Na_2O/K_2O. Используя данные, полученные в ходе различных экспериментов, Е. Ватсон совместно с Т. Хариссоном пришли к выводу, что степень насыщения циркония в породе можно представить в виде функции от температуры и состава расплава:

$$\ln D_{Zr}^{zircon/melt} = (-3.80 - [0.85\times(M - 1)] + 12900 /T,$$

где $D_{Zr}^{zircon/melt}$ — соотношение концентрации Zr в цирконе и расплаве, M — соотношение катионов (Na + K + 2Ca)/ (Al×Si), T — температура в кельвинах.

Согласно морфологическим исследованиям циркона, проведенным Ж. Пюпином и Г. Тюрко, наличие и развитие призм (100) и (110) у кристалла циркона зависит от изменения температуры кристаллизации минерала, а появление и преобладание дипирамид (311), (111) и (331) связано с особенностями химизма среды минералообразования. Выявленная взаимосвязь позволила исследователям составить диаграмму основных типологических форм циркона, иллюстрирующую двумерную зависимость кристалломорфологии циркона от температуры и щелочности.

Результаты исследования

На основе термометрии насыщения для циркона Е. Ватсона и классического эволюционно-морфологического анализа Ж. Пюпина и Г. Тюрко автором были рассчитаны температуры формирования гранитов Приполярного Урала.

С использованием данных по химическому составу гранитов Приполярного Урала (табл. 1) и программы GCDkit 2.3 [10] нами были получены температуры насыщения для циркона (табл. 2).

Таким образом, применение термометрии насыщения Ватсона для циркона позволяет сделать вывод, что формирование гранитов Бадьяюского (773—912 °С) и Яротского (806—926 °С) массивов проходило в среднем при температуре 841 °С. Температура Кожимского массива немного ниже, находится в диапазоне 749—816 °С и в среднем составляет 780 °С. Самой низкотемпературной породой является гранит Николайшорского массива (от 606 до 648 °С при средней температуре 626 °С).

Также для сравнения были определены температуры образования гранитов Приполярного Урала с помощью эволюционно-морфологического анализа. Изучение монофракций акцессорного циркона показало, что для исследованных гранитов Приполярного Урала характерны преимущественно высокотемпературные типы цирконов по Пюпину и Тюрко (рис. 2, 3).

Согласно проведенному исследованию, цирконы Бадьяюского и Яротского массивов по своей морфологии соответствуют таким типам, как D, P_3, P_4, P_5, F (рис. 3, А, Б). Это позволяет утверждать, что кристаллы Бадьяюского и Яротского массивов образовались при высокой температуре кристаллизации, находящейся в диапазоне от 750 до 900 °С. Среди цирконов Кожимского массива отмечаются дополнительно типы J_5 и P_3 (рис. 3, В), что говорит о формировании породы при температуре 700—900 °С. Наибольшее разнообразие морфотипов циркона наблюдается в гранитах Николайшорского массива (рис. 3, Г). Кроме морфотипов D, J_5, P_3, P_4, P_5 в монофракции циркона отмечаются типы R_1, R_2. Это указывает на кристаллизацию минерала при достаточно широком температурном диапазоне, включающем два температурных режима (650—700 и 800—900 °С), при повышенной щелочности минералообразующей среды [1]. Расплавы, затвердевающие в виде S-гранитов, обогащены водой и имеют относительно низкую начальную температуру, но наличие высокотемпературных синпетрогенных цирконов показывает, что в процессе формирования Николайшорского массива температура расплава могла достигать и 800—900 °С, что происходило, вероятно, в процессе повторного гранитогенезиса.

При сравнении данных, полученных с использованием термометрии насыщения и классического эволюционно-морфологического анализа (табл. 3), видим, что для Бадьяюского, Яротского и Кожимского

Таблица 1

Химический состав гранитов Приполярного Урала

Table 1

Chemical composition of Subpolar Urals granites

Массив / Massif	Николайшорский / Nikolayshorsky					Кожимский / Kozhimsky				
Компонент, мас. % Component, wt.%	Н-1	Н-2	Н-4	Н-5	Н-7	К-1	К-3	К-5	К-6	К-9
SiO_2	74.20	75.50	76.11	76.14	75.76	77.78	75.95	76.49	78.12	77.48
TiO_2	0.13	0.16	0.05	0.10	0.10	0.16	0.48	0.48	0.11	0.31
Al_2O_3	13.53	13.72	13.67	12.57	13.14	11.88	12.69	10.05	11.34	11.09
FeO	1.65	1.21	0.48	0.42	0.75	1.72	1.15	0.56	0.50	0.61
Fe_2O_3	0.61	0.72	1.01	0.89	0.97	0.84	0.52	0.92	1.21	0.89
MnO	0.03	0.01	0.02	0.04	0.02	0.02	0.00	0.02	0.01	0.03
MgO	0.05	0.30	0.35	0.18	0.42	0.16	0.17	0.38	0.39	0.19
CaO	2.01	1.55	0.46	1.22	0.59	0.31	0.22	0.59	0.28	0.37
Na_2O	4.28	3.84	3.11	3.28	3.33	3.65	4.22	3.08	3.15	3.01
K_2O	2.53	3.53	4.89	4.31	5.14	3.88	4.09	4.15	5.17	4.65
P_2O_5	0.04	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03
ппп	0.74	0.32	0.23	1.08	0.62	0.05	0.59	0.75	0.62	1.02
Σ	99.80	100.87	100.39	100.25	100.86	100.46	100.10	97.50	100.92	99.68
Zr, г/ т	26.37	19.87	11.65	15.69	14.59	60.62	98.26	75.26	102.23	88.15
Массив / Massif	Бадьяюский / Badyayusky					Яротский / Yarotsky				
Компонент, мас. % Component, wt%	Б-2	Б-3	Б-5	Б-6	Б-7	Я-2	Я-3	Я-5	Я-6	Я-8
SiO_2	74.92	75.42	76.82	75.45	74.42	75.02	74.59	74.86	75.69	75.27
TiO_2	0.35	0.33	0.22	0.11	0.18	0.37	0.16	0.29	0.18	0.21
Al_2O_3	11.27	11.72	11.05	11.56	12.48	11.59	13.27	11.78	12.57	12.25
FeO	1.90	0.95	1.82	0.88	0.67	0.66	0.40	1.22	0.72	0.67
Fe_2O_3	1.32	0.89	0.55	0.92	1.01	1.63	1.69	1.49	1.01	1.04
MnO	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.05	0.02	0.01	0.01	0.03
MgO	0.28	0.31	0.28	0.35	0.26	0.24	0.15	0.33	0.25	0.19
CaO	1.04	1.02	0.59	0.58	1.02	0.89	0.61	0.59	0.56	0.55
Na_2O	2.54	3.37	2.96	2.89	3.33	3.02	3.33	3.17	3.27	3.61
K_2O	5.26	4.57	4.12	4.91	5.02	4.65	4.52	4.91	4.62	4.52
P_2O_5	0.03	0.03	0.05	0.00	0.01	0.06	0.01	0.01	0.00	0.01
ппп	0.82	0.82	1.20	0.81	1.21	1.22	1.29	0.43	0.80	1.54
Σ	99.76	99.45	99.67	98.49	99.64	99.4	100.04	99.09	99.68	99.89
Zr, г/ т	134.41	143.90	325.9	552.6	412.6	194.6	180.41	620.4	335.30	212.9

Примечание. Химический состав получен с помощью силикатного метода в ЦКП «Наука» Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар, аналитик О. В. Кокшарова). Содержание циркония получены с помощью ICP-MS-метода в Институте геологии и геохимии (Екатеринбург, аналитик Ю. Л. Ронкин).

Note. Chemical composition was determined by silicate method in CCU Nauka of Institute of geology Komi SC UB RAS (Syktyvkar, analyst Koksharova O. V.). Zircon content was determined by ICP-MS in Institute of geology and geochemistry (Ekaterinburg, analyst Yu. L. Ronkin)

Таблица 2

Термометрия насыщения для циркона, °С

Table 2

Saturation temperature for zircon, °C

№ Анализа Analysis No.	Массив / Massif			
	Бадьяюский Badyayusky	Яротский Yarotsky	Кожимский Kozhimsky	Николайшорский Nikolayshorsky
1	786	806	749	648
2	773	797	816	634
3	846	926	801	606
4	912	861	771	629
5	886	813	784	614

Таблица 3

Температура формирования гранитов Приполярного Урала, °С

Table 3

Subpolar Urals granite formation temperature, °С

Массив / Massif	Температура / Temperature	
	по Ватсону / according to Watson	по Пюпину / according to Pupin
Бадьяюский / Badyayusky	773—912	750—900
Яротский / Yarotsky	806—926	750—900
Кожимский / Kozhimsky	749—816	700—900
Николайшорский / Nikolayshorsky	606—648	650—700 800—900

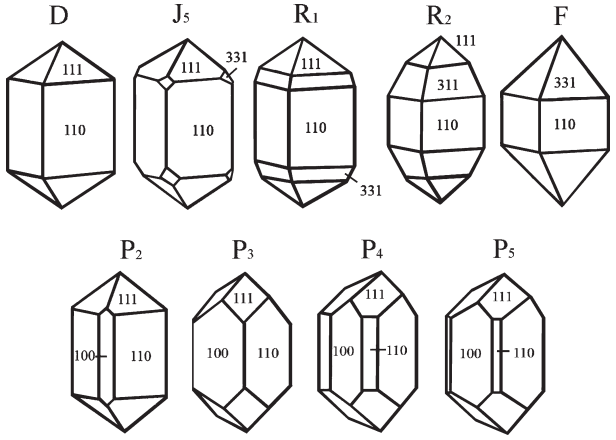

Рис. 2. Типы циркона Приполярного Урала по Ж. Пюпину и Г. Тюрко

Fig. 2. Types of zircon of Polar Urals according to J. Pupin and G. Turco

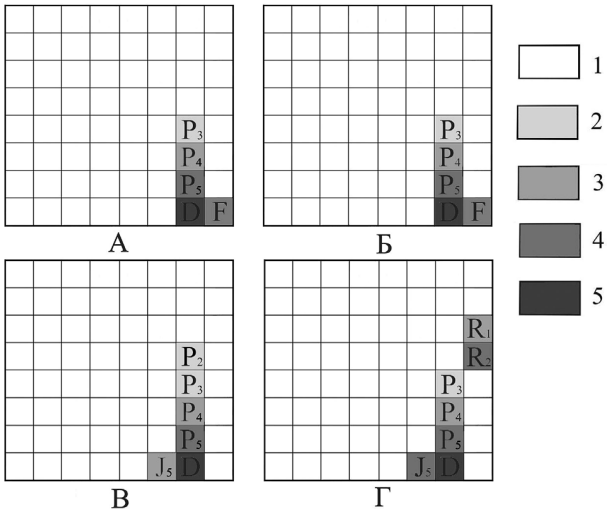

Рис. 3. Степень распространения типов цирконов Приполярного Урала (по Ж. Пюпину и Г. Тюрко): 1 — отсутствие, 2 — минимальное значение, 5 — максимальное значение. Массивы: А — Бадьяюский, Б — Яротский, В — Кожимский, Г — Николайшорский

Fig. 3. Distribution of zircons of Polar Urals (according to J. Pupin and G. Turco): 1 — absence, 2 — minimum value, 5 — maximum value. Massifs: А — Badyayusky, Б — Yarotsky, В — Kozhimsky, Г — Nikolayshorsky

массивов получены одинаковые диапазоны температур, т. к., учитывая погрешность методики по Ватсону, составляющую 5 %, имеющиеся расхождения значений температур кристаллизации гранитов можно считать незначительными. Для Николайшорского массива отмечается различие в температурах, полученных разными методами. Согласно Пюпину и Тюрко, для гранитов этого массива отмечаются два температурных режима. Согласно Ватсону, породы Николайшорского массива представляют собой низкотемпературные образования.

Температурные режимы гранитообразования

Необходимо отметить, что с помощью анализа Ж. Пюпина и Г. Тюрко можно также получить информацию о температурных режимах для разных этапов гранитообразования. Для этого рассмотрим акцессорный циркон изученных пород Приполярного Урала для определения характерных морфологических типов минерала для каждого этапа формирования гранитов.

Цирконы Бадьяюского, Яротского, Кожимского и Николайшорского массивов представлены несколькими морфологическими типами.

Первый морфологический тип — светлоокрашенные (от бесцветного до светло-желтого) прозрачные короткопризматические цирконы. Габитус кристаллов обусловлен развитием призмы (110) и дипирамиды (111). Размер кристаллов 0.05—0.25 мм. Коэффициент удлинения 0.6—1.2. Поверхность граней гладкая, блестящая. Внутреннее строение зерен характеризуется наличием 2—3 зон. Содержание цирконов первого типа оставляет 60—70 % (85—95 % для Кожимского массива) от общего объема этого минерала в породе. Темно-коричневый короткопризматический прозрачный циркон выделен во **второй морфологический тип**. Развиты грани (100), (110), присутствует дипирамида (111). Размер таких кристаллов 0.1—0.25 мм. Коэффициент удлинения 0.8—1.3. Внутреннее строение, как правило, малозональное. Поверхность кристаллов гладкая, блестящая. Содержание цирконов второго типа в среднем 10—20 (25) % (1—5 % для Кожимского массива) от общего объема минерала в породе. **Третий морфологический тип** составляют бесцветные прозрачные цирконы длиннопризматического габитуса. Среди цирконов Бадьяюского массива в незначительном количестве отмечаются темноокрашенные разно-

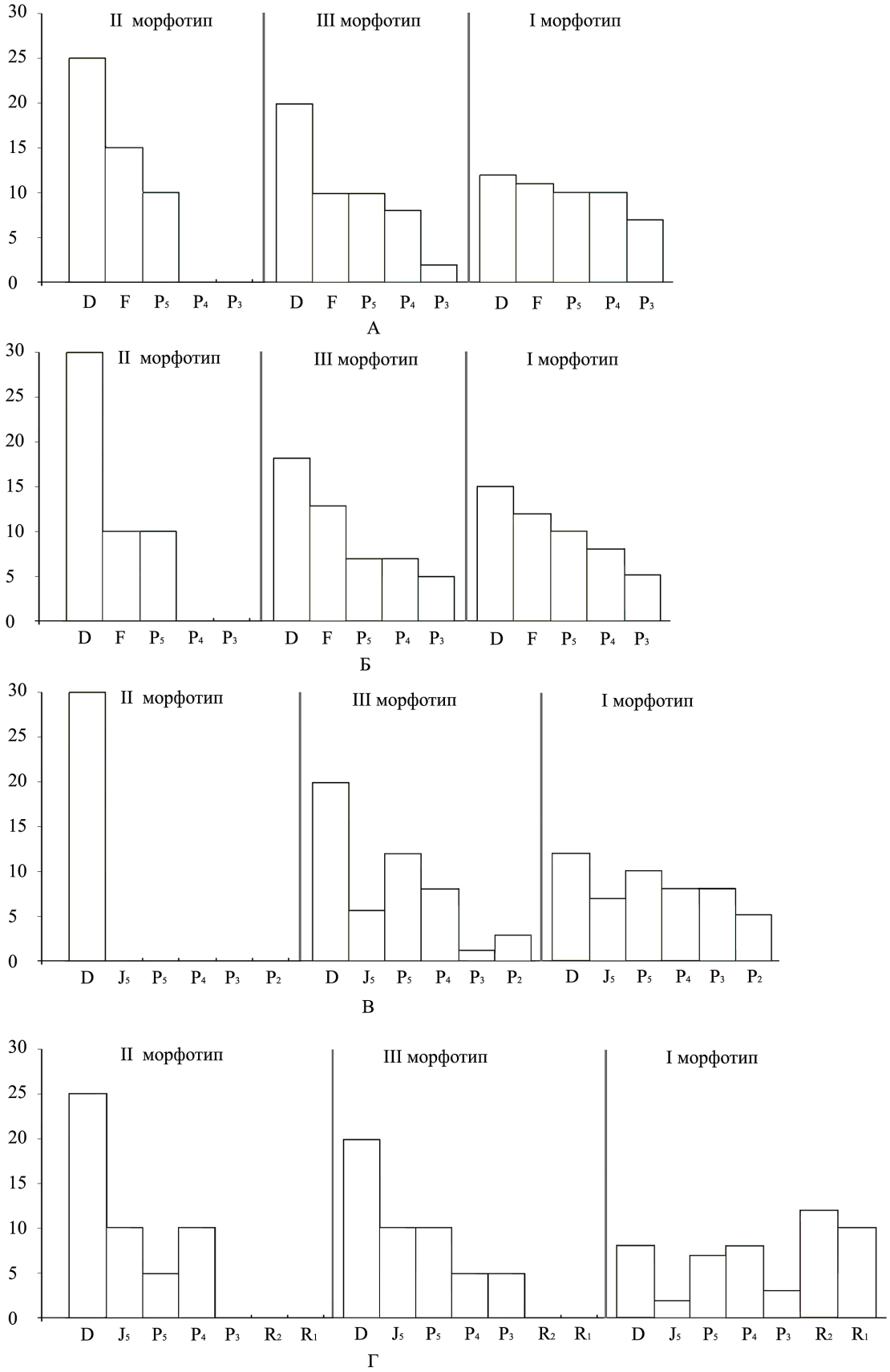

Рис. 4. Частота встречаемости типов цирконов по Ж. Пюпину и Г. Тюрко. Массивы: А — Бадьяюский, Б — Яротский, В — Кожимский, Г — Николайшорский

Fig. 4. Frequency of zircon occurrence according to J. Pupin and G. Turco. Massifs: А — Badyayusky, Б — Yarotsky, В — Kozhimsky, Г — Nikolayshorsky

Таблица 4

Средние температуры этапов формирования гранитов Приполярного Урала, °С

Table 4

Average temperatures of Subpolar Uralsgranite formation, °C

Массив / Massif	Морфотип циркона / Zircon morphotype		
	II	III	I
Бадьяюский / Badyayusky	890	868	849
Яротский / Yarotsky	890	864	859
Кожимский / Kozhimsky	900	857	830
Николайшорский / Nikolayshorsky	875	871	770

видности. Размер кристаллов 0.5—0.9 мм, коэффициент удлинения 1.5—4.0 (3.0—7.0 для цирконов Николайшорского массива). Габитус кристалла обусловлен развитием граней (100), (110). Внутреннее строение отдельных кристаллов малозональное. Содержание циркона данного морфологического типа 10—15 % (1—5 % для Кожимского массива) от общего состава минерала в породе.

Одним из основных элементов-примесей в цирконе является гафний, отличительной особенностью которого является постепенное накопление относительно циркония в процессе формирования породы. Для разделения рассматриваемых типов с помощью микрозондового анализа (выполнен в Институте геологии КНЦ УрО РАН, на Vega3 Tescan, аналитик С. С. Шевчук) были получены данные по содержанию гафния в каймах кристаллов. Это позволяет на основе средних содержаний гафния предположить последовательность выделения каждого морфологического типа циркона для изученных массивов Приполярного Урала и тем самым определить характерный морфотип минерала для каждого этапа гранитогенеза [2]:

Бадьяюский массив: II (1.18 мас. %) → III (1.25 мас. %) → I тип (1.49 мас. %);

Яротский массив: II (1.16 мас. %) → III (1.25 мас. %) → I тип (1.29 мас. %);

Кожимский массив: II (1.19 мас. %) → III (1.31 мас. %) → I тип (1.37 мас. %);

Николайшорский массив: II (1.25 мас. %) → III (1.31 мас. %) → I тип (1.39 мас. %).

Таким образом, на раннем этапе формирования изученных гранитов происходило образование темно-коричневого циркона, второй этап характеризуется выделением из силикатного расплава длиннопризматического циркона, кристаллизация светлоокрашенного короткопризматического циркона осуществлялась на завершающей стадии гранитогенеза.

Для выявления особенностей температурных режимов различных этапов гранитогенеза изученных гранитов Приполярного Урала были определены типы циркона по Пюпину и Тюрко (рис. 4) и рассчитаны средние температуры (табл. 4) для каждого определенного выше морфологического типа минерала. Как мы видим, темно-коричневый короткопризматический циркон всех исследованных массивов позволяет говорить о быстром завершении раннего этапа формирования рассматриваемых массивов. Для всех массивов начальная стадия гранитогенеза была самой высокотемпературной. Причем, если для А-гранитов это может быть объяснено высокой температурой начального силикатного расплава, то для S-гранитов, сформировавшихся из относительно низкотемпературных расплавов, наличие высокотемпературных синпетрогенных цирконов указывает, что уже в период ранней стадии граниты Николайшорского массива претерпевали дополнительное высокотемпературное воздействие. Кроме того, среди светлоокрашенных короткопризматических цирконов этого массива выделяется наибольшее количество типов цирконов по Пюпину и Тюрко (рис. 4, Г), что свидетельствует о значительной длительности заключительного этапа формирования Николайшорского массива.

Заключение

В результате проведенных исследований нами получены температуры формирования гранитов Приполярного Урала, относящихся к трем разновозрастным комплексам: николайшорскому (PR_2), кожимскому (RF_2) и сальнеро-маньхамбовскому (V — $Є_1$). Основываясь на температурах, полученных по методу Е. Ватсона, как более точных, можно утверждать, что граниты Бадьяюского и Яротского массивов образовались при высоких температурах — от 773 до 912 °С и от 806 до 926 °С соответственно. Для гранитов Кожимского массива характерен другой температурный диапазон, а именно 749—816 °С. Самыми низкотемпературными породами являются граниты Николайшорского массива (606—648 °С).

Необходимо также отметить, что при определении температуры образования гранитов Николайшорского массива с использованием метода Е. Ватсона был получен только один температурный режим. В то же время применение анализа Ж. Пюпина и Г. Тюрко показывает, что история Николайшорского массива более сложная и включает в себя два температурных режима (650—700 °С и 800—900 °С). На основании этого можно сделать вывод, что эволюционно-кристалломорфологический анализ Ж. Пюпина и Г. Тюрко позволяет получить более полную информацию об изменениях температурного режима гранитогенезиса.

Полученные результаты подтверждают ранние предположения, сделанные группой исследователей под руководством М. В. Фишмана [3], согласно которым граниты Кожимского массива являются более низкотемпературными, чем граниты Бадьяюского и Яротского массивов. При этом полученные автором термометрические данные показывают, что температуры формирования гранитов являются более высокими, чем предполагал М. В. Фишман и его коллеги, которые считали, что температура образования грани-

тов Кожимского массива не превышает 650 °С, а граниты Бадьяюского и Яротского массивов сформировались при 720 °С.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований РАН № 15-18-5-17.

Литература

1. Денисова Ю. В. Типоморфические и типохимические особенности акцессорных цирконов гранитоидов Приполярного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2014. № 5. С. 9—16.

2. Денисова Ю. В. Петрогенетическое значение ZrO_2/HfO_2-отношения в акцессорном цирконе гранитов Приполярного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2015. № 2. С. 23—31.

3. Махлаев Л. В. Гранитоиды севера Центрально-Уральского поднятия (Полярный и Приполярный Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 150 с.

4. Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярно-Уральского сегмента земной коры // Литосфера. 2008. № 11. С. 25—38.

5. 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.

6. Pupin J. P., Turco G. Le zircon accessoire en gйothermomйtrie // C.R. Acad. Sci. Paris. 1972. V. 274. № 2. P. 212—214.

7. Pupin J. P. Zircon and granite petrology // Contrib. Miner. Petrol. 1980. Vol. 73. P. 207—220.

8. Watson E.B. Zircon saturation in felsic liquids: experimental result and applications to trace element geochemistry / Contr. Mineral. and Petrol. 1979. V. 70. P. 407—419.

9. Watson E. B., Harrison T. M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types // Earth Planet Sci Lett. 1983. V. 64. P. 295—304.

10. The Comprehensive R Archive Nework: https://cran.r-project.org/

References

1. Denisova Yu. V. *Tipomorficheskie i tipohimicheskie osobennosti aktsessornyh tsirkonov granitoidov Pripolyarnogo Urala* (Typomorphic and typechemical features of accessory zircons from granitods of Subpolar Urals). Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar, No. 5, 2014, pp. 9—16.

2. Denisova Yu. V. *Petrogeneticheskoe znachenie ZrO_2/HfO_2 otnosheniya v aktsessornom tsirkone granitov Pripolyarnogo Urala* (Petrogenetic meaning of ZrO_2/HfO_2 ratio in accessory zircon of granites of Subpolar Urals). Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar, No. 2, 2015, pp. 23—31.

3. Mahlaev L. V. *Granitoidy severa Tsentralno- Uralskogo podnyatiya* (Polyarnyi i Pripolyarnyi Ural) (Granitoids of northern Central-Ural uplift (Polar and Subpolar Urals). Ekaterinburg, UB RAS, 1996, 150 pp.

4. Pystin A. M., Pystina Yu. I. *Metamorfizm i granitoobrazovanie v proterozoisko- rannepaleozoiskoi istorii formirovaniya Pripolyarnouralskogo segmenta zemnoi kory* (Metamorphism and granite formation in Proterozoic-Early Paleozoic history of formation of Subpolar Ural segment of Earth's crust). Litosfera, 2008, No. 11, pp. 25—38.

5. Fishman M. V., Yushkin N. P., Goldin B. A., Kalinin E. P. *Mineralogiya, tipomorfizm i genezis aktsessornyh mineralov izverzhennyh porod severa Urala i Timana* (Mineralogy, typomorphism and genesis of accessory minerals of igneous rocks of Northern Urals and Timan). Moscow-Leningrad, Nauka, 1968, 252 pp.

6. Pupin J. P., Turco G. Le zircon accessoire en gйothermomйtrie. C.R. Acad. Sci. Paris. 1972. V. 274, No. 2, pp. 212—214.

7. Pupin J. P. Zircon and granite petrology. Contrib. Miner. Petrol. 1980, Vol. 73, pp. 207—220.

8. Watson E. B. Zircon saturation in felsic liquids: experimental result and applications to trace element geochemistry. Contr. Mineral. and Petrol. 1979, V. 70, pp. 407—419.

9. Watson E. B., Harrison T. M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. Earth Planet Sci Lett. 1983, V. 64, pp. 295—304.

Internet source

10. https://cran.r-project.org/