

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

УДК [553.98.041:550.834.52.05]:(574.511)

U-Pb РЕЗУЛЬТАТЫ ДАТИРОВАНИЯ ЦИРКОНА И БАДДЕЛЕИТА
УЛЬТРАМАФИТ-МАФИТОВОГО ИНТРУЗИВА НОРИЛЬСК-1 (Россия)

К.Н. Малич^{1,2}, И.Ю. Баданина¹, Е.А. Белоусова², **Е.В. Туганова³**

¹ Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН,
620151, Екатеринбург, Почтовый пер., 7, Россия

² The ARC National Key Centre for Geochemical Evolution and Metallogeny of Continents (GEMOC),
Macquarie University, Sydney, Australia

³ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского,
199106, Санкт-Петербург, Средний просп., 74, Россия

Впервые рассмотрены минералогические и изотопно-геохимические особенности циркона и бадделеита из различных пород промышленно-рудноносного интрузива Норильск-1, расположенного в северо-западной части Сибирской платформы. С данным интрузивом тесно связаны промышленные платиноидно-медно-никелевые сульфидные месторождения.

На основании детального изучения морфологии и внутреннего строения выявлены четыре популяции цирконов, которые характеризуются разными U-Pb (SHRIMP-II) возрастными группами. Возраст бадделеита и четырех групп циркона охватывает значительный промежуток времени (от 290 ± 2.8 до 226.7 ± 0.9 млн лет). Полученные результаты позволяют предположить, что кристаллизация бадделеита и четырех групп цирконов промышленно-рудноносного интрузива Норильск-1 происходила в несколько стадий (290 ± 2.8 , 261.3 ± 1.6 , 245.7 ± 1.1 , 236.5 ± 1.8 и 226.7 ± 0.9 млн лет соответственно). Выявленная длительность развития магматической системы, по-видимому, была благоприятным фактором для формирования уникальных по объемам магм, обогащенных рудными компонентами.

Циркон, бадделеит, U-Pb возраст, ультрамафит-мафитовый интрузив Норильск-1, длительная эволюция.

RESULTS OF U-Pb DATING OF ZIRCON AND BADDELEYITE
FROM THE NORIL'SK-1 ULTRAMAFIC-MAFIC INTRUSION (Russia)

K.N. Malich, I.Yu. Badanina, E.A. Belousova, and **E.V. Tuganova**

We present for the first time the mineralogical and isotope-geochemical peculiarities of zircon and baddeleyite from various rocks of the economic ore-bearing Noril'sk-1 intrusion located in the northwestern part of the Siberian Platform. The ultramafic-mafic Noril'sk-1 intrusion hosts one of the world's major economic platinum-group-element (PGE)-Cu-Ni sulphide deposits.

A detailed study of crystal morphology and internal structure identify four zircon populations characterized by different U-Pb (SHRIMP-II) ages. The U-Pb ages of baddeleyite and the defined zircon populations cover a significant time span (from 290 ± 2.8 to 226.7 ± 0.9 Ma). The established U-Pb ages imply that crystallization of baddeleyite and zircon populations corresponds to several stages of protracted evolution of the ore-forming magmatic system (290 ± 2.8 , 261.3 ± 1.6 , 245.7 ± 1.1 , 236.5 ± 1.8 , and 226.7 ± 0.9 Ma, respectively) that served as a favorable factor for the accumulation of magmas and ores of unique scales and concentrations.

Zircon, baddeleyite, U-Pb age, Noril'sk-1 ultramafic-mafic intrusion, protracted evolution

ВВЕДЕНИЕ

Уникальные месторождения платиноидов, никеля и меди, тесно связанные с ультрамафит-мафитовыми интрузивами норильского типа, расположены в пределах Игарско-Норильской палеорифтогенной системы на северо-западе Восточной Сибири [Геология..., 2002]. Они приурочены к трем промышленно-рудноносным интрузивам (Талнахский, Харалахский и Норильск-1) мощностью до 360 м и протяженностью до 20 км.

Несмотря на значительный металлогенический потенциал, возрастные данные для подавляющего большинства ультрамафит-мафитовых интрузивов Норильской провинции, включая промышленно-ру-

доносные Талнахский и Хараелахский интрузивы, до недавнего времени [Малич и др., 2010; Malitch et al., 2010; Malitch, Petrov, 2010] были охарактеризованы недостаточно. Также слабо освещены вопросы, связанные с определением продолжительности процессов магматической кристаллизации и рудного концентрирования, необходимого для образования промышленного месторождения. Часто цитируемые U-Pb данные по циркону и бадделеиту (248.0 ± 3.7 млн лет [Campbell et al., 1992] и 251.1 ± 3.6 млн лет [Kato et al., 1996]) характеризуют пегматоидное лейкогаббро, которое является резко подчиненной петрографической разновидностью пород интрузива Норильск-1.

ОБРАЗЦЫ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В нашем сообщении впервые обсуждаются результаты уран-свинцового датирования цирконов (129 определений) и бадделитов (8 определений), которые были выделены по технологии rpm-минералогии (см. подробнее на <http://www.natires.com>) из всех разновидностей пород интрузива Норильск-1 (рис. 1). Разрез интрузива образован (сверху вниз, см. рис. 1) габбро-диоритами (горизонт N1-1), лейкогаббро (N1-3), безоливиновым габбро (N1-2, N1-4), оливинсодержащим габбро (N1-5), оливиновым габбро (N1-6), горизонтом ультраосновных пород, представленных плагиооливинитами, плагиоверлитами и меланотроктолитами (N1-7), «такситовыми» разновидностями ультраосновных (N1-8) и основных (N1-9) пород и контактовыми габбро-долеритами (N1-10). Примечательно соответствие между концентрациями циркония, урана, тория и гафния в породах и количеством выделенных акцессорных минералов (см. рис. 1). Наиболее вероятно, что характер распределения Zr, U, Th и Hf в породах интрузива контролируется акцессорными минералами (цирконом и бадделеитом).

U-Pb анализы цирконов выполнены на вторично ионном масс-спектрометре SHRIMP-II (ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург). Бадделеиты были исследованы в лаборатории Национального центра изучения геохимической эволюции и металлогении континентов (Университет Маквори, Сидней, Австралия) с помощью лазерно-абляционной системы LUV213 ($\lambda = 213$ нм) (New Wave/Merchantek) в сочетании с Agilent 7500cs ICP-MS. Аналитические процедуры детально рассмотрены в ряде работ [Williams, 1998; Jackson et al., 2004; Malitch et al., 2010]. Особенности внутреннего строения цирконов, U-Pb изотопные результаты и характер распределения тория и урана отображены на рис. 2—6 и в табл. 1, 2. Данные сравнения возрастов цирконов промышленно-рудноносных интрузивов Норильской провинции обобщены в табл. 3.

МОРФОЛОГИЯ И ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ

В прозрачно-полированных шлифах цирконы обнаружены в виде моно- или полифазных зерен в ассоциации с клинопироксеном и плагиоклазом (см. рис. 2, А, Б), а также амфиболом, биотитом и апатитом. Редкие примеры выявили ассоциацию циркона с бадделеитом, где последний образует затравки, по которым формируется циркон.

Выделенные из пород цирконы представлены идиоморфными и субидиоморфными прозрачными и полупрозрачными, иногда трещиноватыми кристаллами призматического габитуса, окрашенными в бледно-бежевые тона; коэффициент удлинения цирконов варьирует от 1:1 до 3:1 (иногда до (6—7):1). Подавляющая выборка цирконов не превышает размера 125 мкм в наименьшем сечении. На диаграмме Д.П. Пюпена [Pupin, 1980] среди изученных цирконов доминируют 80 % кристаллы типа D, указывающие на высокотемпературные и субщелочные условия среды минералообразования. Петрографическое изучение позволило выявить цирконы с полифазным и монофазным внутренним строением.

Полифазные зерна состоят из различных (до четырех) типов циркона (Zr1, Zr2, Zr3 и Zr4). Цирконы Zr1 и Zr2 образуют ядра, иногда корродированные (см. рис. 2, В, Г), содержащие флюидные и расплавные включения с кристаллической фазой не менее 80 %. Цирконы Zr3 и Zr4 представлены субидиоморфными и идиоморфными оторочками, иногда обладающими различно проявленной тонкой зональностью (см. рис. 2, В). Zr3 и Zr4 содержат расплавные включения, состоящие преимущественно из силикатного стекла. Анализ распределения расплавных включений в цирконах позволяет предположить, что ядра и оторочки последних образовались при различных физико-химических условиях. Полифазные зерна имеют подчиненное значение по сравнению с монофазными индивидами циркона, отнесенными к тому или иному типу.

Большинству цирконов вне зависимости от выделенных типов свойствен «размытый» (дымчатый) характер катодоллюминесценции при практически полном отсутствии катодоллюминесцентной зональности, типичной для цирконов основных магматических пород.

U-Pb ВОЗРАСТНЫЕ ДАННЫЕ

Тщательный минералогический анализ с точки зрения методологии локального U-Pb датирования позволил выбрать необходимые участки для измерений в пределах полифазных и монофазных зерен

Место отбора пробы для изотопного анализа	Место отбора образца	Глубина, м	Литоги-ческая колонка	Мощ., м	Порода
Zr-114	51_330.6	321.7	"L-"		Толентовый базальт сыверминской свиты (T _{1sv})
	52_330.7				
Zr-23, Bd-3 Zr-6, Bd-7	53a_338.4	327.9	Габбро-диорит	2.9	Габбро-диорит
	53b_338.65				
	54_339.6				
	54_339.6				
Zr-16, Bd-45	55_343.2	336.7	Лейкогаббро	5.9	Лейкогаббро
	56_346.4				
Zr-22	57_352.4	338.8	Безоливиновое габбро	2.1	Безоливиновое габбро
	58_353.3				
Zr-33	59_357.7	339.8	Оливиносодержащее габбро	10.2	Оливиносодержащее габбро
	60_359.2				
Zr-24	61_360.5	350.0	Оливиновое габбро	5.0	Оливиновое габбро
	62-67				
Zr-20	68_366.3	355.0	Плагиоверлит	8.7	Плагиоверлит
	69a_366.8				
Zr-27	70_367.6	363.7	Лейкогаббро безоливиновое, оливиносодержащее, и оливиновое с участками троктолитов, габбро-троктолитов с реликтами плагиоверлитов	14.0	Лейкогаббро безоливиновое, оливиносодержащее, и оливиновое с участками троктолитов, габбро-троктолитов с реликтами плагиоверлитов
	71_369.1				
Zr-7	72-75	366.0	Контактовое габбро	1.4	Контактовое габбро
	76_373.55				
Zr-7	77_379.2	380.0	Субщелочной базальт ивакинской свиты (P ₂ V)	1.4	Субщелочной базальт ивакинской свиты (P ₂ V)
	78_381.3				

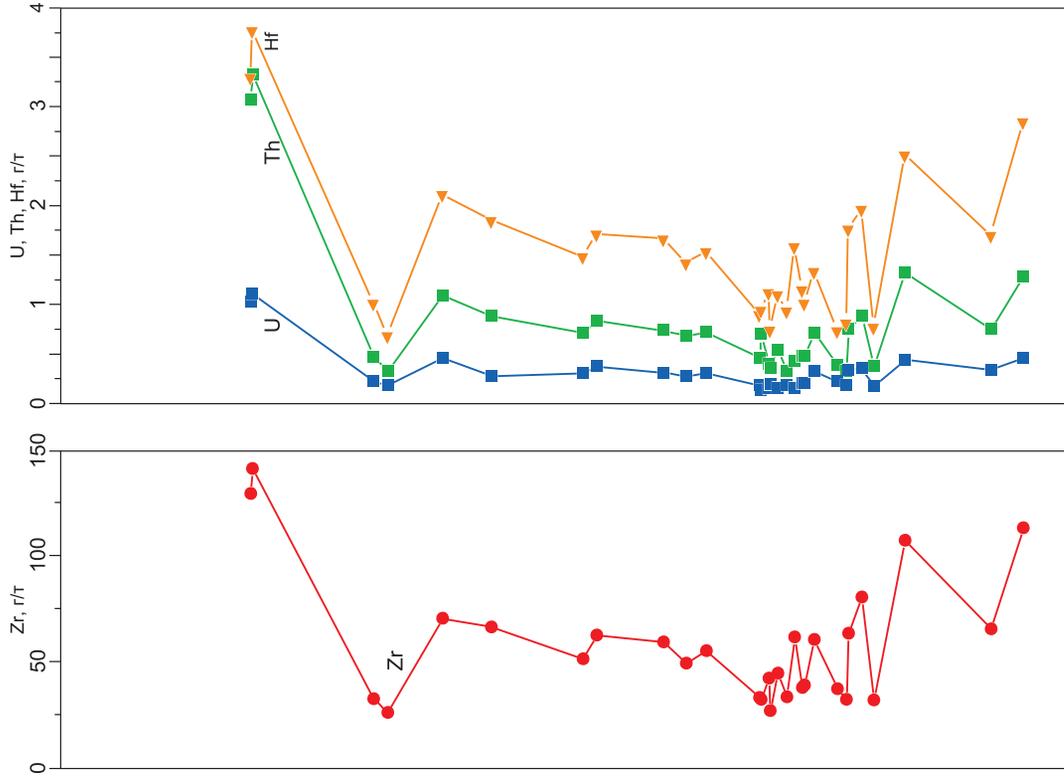


Рис. 1. Вариации концентраций Zr, U, Th и Hf и количество зерен циркона (Zr) и бадделента (Bd) в породах интрузива Норильск-1 (скв. MN-2).

Красные квадраты на разрезе обозначают вкрапленные сульфидные Cu-Ni руды. Zr-114, Bd-3 и т.д. — цифры показывают количество изученных зерен.

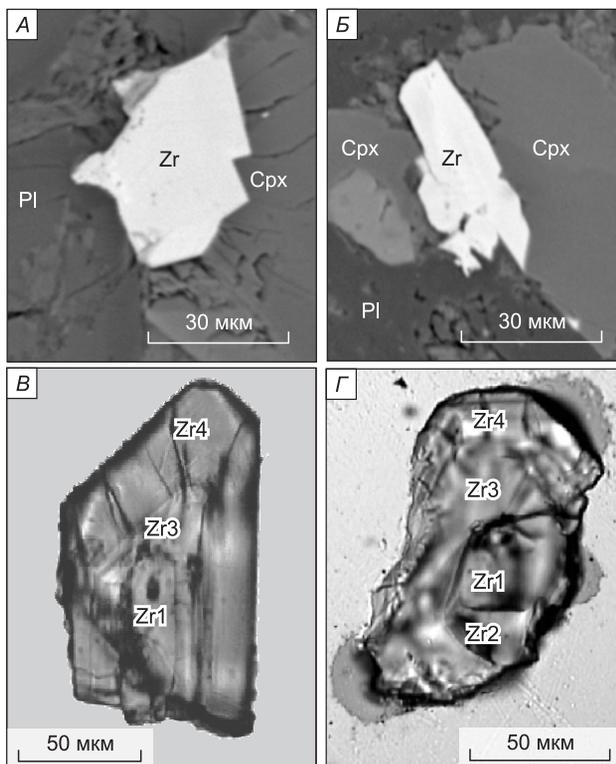


Рис. 2. Примеры цирконов *in situ* в шлифах (А, Б) и после выделения (Б, Г) из пород интрузива Норильск-1.

А, Б — ассоциации циркона и породообразующих минералов из оливинового габбро расслоенной серии (обр. 60) и такситового пироксенового лейкогаббро (обр. 74), Zr — циркон, Cpx — клинопироксен, Pl — плагиоклаз; Б, Г — внутреннее строение полифазных зерен, состоящих из «ядерных» (Zr1, Zr2) и «периферических» типов (Zr3 и Zr4) циркона. Изображения цирконов в обратнорассеянных электронах (А, Б) и проходящем свете (Б, Г).

цирконов и бадделитов. Таким образом, исключалась возможность смешения характеристик полихронных участков кристаллической решетки, обусловленных разными наборами и концентрациями микропримесных элементов, их валентным состоянием и структурными дефектами.

98 зерен циркона из пород интрузива Норильск-1, продатированные U-Pb методом, выявили четыре популяции конкордантных возрастов (см. рис. 3). Для ядерных частей полифазных зе-

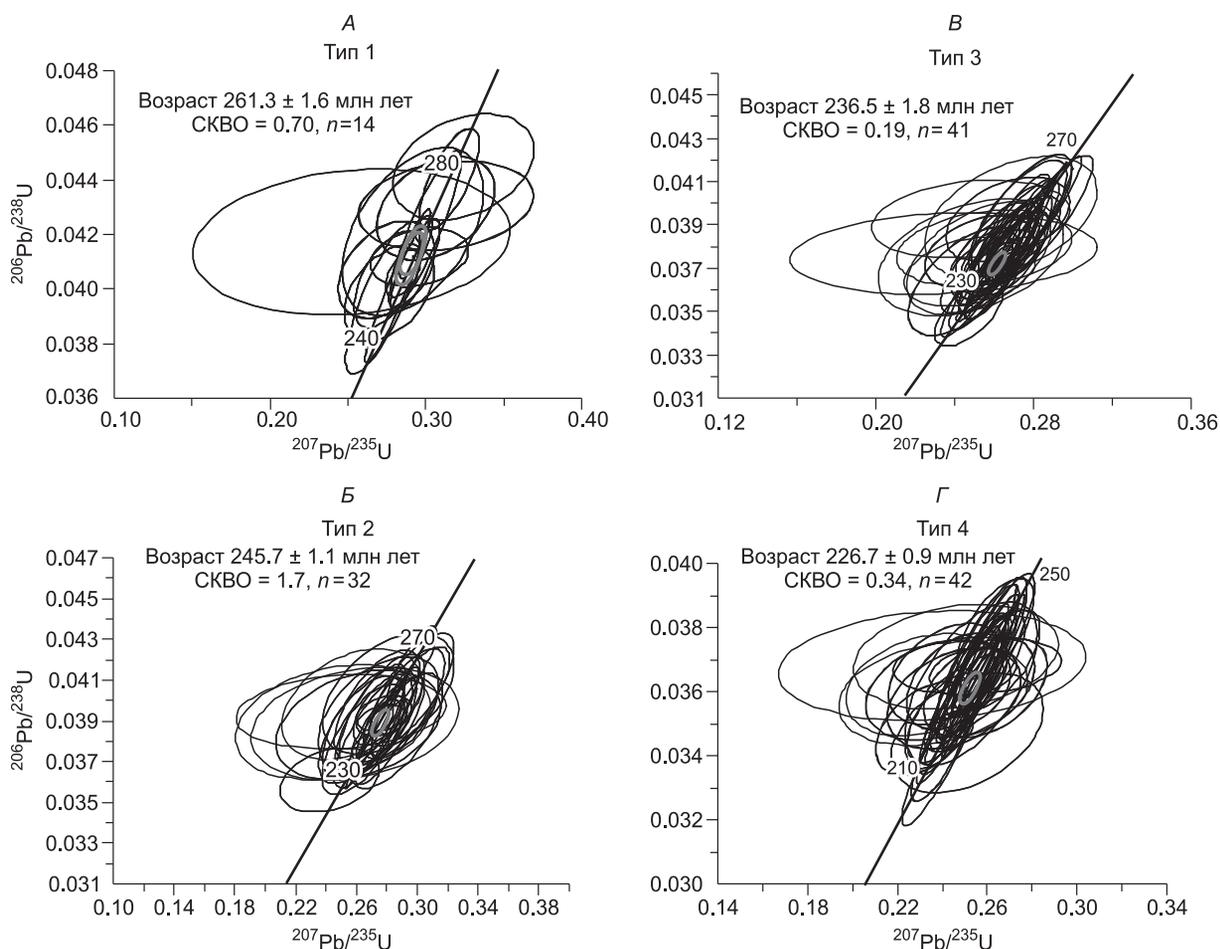


Рис. 3. U-Pb возраст цирконов различных типов интрузива Норильск-1.

А—Г — описание см. в тексте.

Таблица 1. Представительные U-Pb (SHRIMP-II) изотопные анализы цирконов интрузива Норильск-1

№ анализа	Тип циркона	²⁰⁶ Pb _c , %	U, г/т	Th, г/т	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U возраст	±	Атомные отношения						Rho
								²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb*	± %	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	± %	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	± %	
N1-5_1.1	1	0.14	1553	5016	3.23	277.7	7.6	0.0519	2.8	0.315	4.0	0.0440	2.8	0.701
N1-5_17.1	1	0.55	224	252	1.13	260.0	4.4	0.0521	6.8	0.296	7.0	0.0412	1.7	0.245
N1-7_1.1	1	0.40	692	1029	1.49	252.1	7.1	0.0503	6.2	0.276	6.8	0.0399	2.9	0.422
N1-7_3.1	1	0.65	184	403	2.19	265.9	12.5	0.0502	9.1	0.291	10.3	0.0421	4.8	0.468
N1-8_8.1	1	0.40	598	1145	1.91	257.2	7.3	0.0490	6.9	0.275	7.5	0.0407	2.9	0.388
N1-8_10.1	1	0.00	809	1775	2.19	256.4	3.5	0.0510	2.2	0.285	2.6	0.0406	1.4	0.539
N1-8_17.1	1	0.59	66	79	1.20	271.8	6.6	0.0527	11.6	0.313	11.9	0.0431	2.5	0.210
N1-3_5.2	2	0.03	1715	5077	2.96	246.9	3.0	0.0507	1.5	0.246	18.5	0.0394	3.0	0.164
N1-3_1.1	2	0.00	204	450	2.21	243.6	11.5	0.0532	5.4	0.282	7.2	0.0385	4.8	0.667
N1-4_6.1	2	0.04	2127	5052	2.38	253.6	11.5	0.0510	1.5	0.282	4.9	0.0401	4.6	0.951
N1-5_3.1	2	0.00	1141	3589	3.15	256.3	11.3	0.0524	4.2	0.293	6.2	0.0406	4.5	0.731
N1-5_8.1	2	0.00	957	3447	3.60	252.2	11.2	0.0531	3.6	0.292	5.8	0.0399	4.5	0.779
N1-6_11.1	2	0.39	494	813	1.65	249.0	3.6	0.0506	4.1	0.274	4.3	0.0394	1.5	0.340
N1-7_19.1	2	0.00	718	825	1.15	248.4	3.2	0.0508	2.0	0.275	2.4	0.0393	1.3	0.552
N1-7_8.1	2	0.47	536	1279	2.39	245.8	11.3	0.0495	6.1	0.265	7.7	0.0389	4.7	0.612
N1-8_10.1	2	0.22	510	567	1.11	250.0	7.1	0.0502	3.7	0.274	4.7	0.0395	2.9	0.612
N1-9_9.1	2	0.38	1571	4287	2.73	250.8	11.4	0.0498	3.5	0.273	5.8	0.0397	4.6	0.801
N1-9_17.2	2	0.50	1029	1564	1.52	246.7	3.1	0.0508	3.8	0.273	4.0	0.0390	1.3	0.326
N1-1_7.1	3	0.10	1674	2050	1.22	239.5	10.5	0.0515	2.2	0.269	5.0	0.0379	4.5	0.894
N1-3_5.1	3	0.18	2084	7682	3.69	237.9	3.0	0.0508	2.5	0.263	2.8	0.0376	1.3	0.450
N1-4_12.1	3	0.00	2846	16739	5.88	237.4	2.8	0.0509	1.1	0.263	1.6	0.0375	1.2	0.734
N1-5_2.1	3	0.16	1577	3029	1.92	245.7	6.7	0.0514	3.4	0.275	4.4	0.0388	2.8	0.629
N1-6_6.1	3	0.06	3108	6311	2.03	243.7	6.6	0.0504	1.5	0.265	3.2	0.0385	2.7	0.871
N1-7_18.1	3	0.00	598	3016	5.04	239.2	3.2	0.0519	2.7	0.269	3.0	0.0378	1.3	0.447
N1-8_3.1	3	1.18	194	289	1.49	239.3	7.6	0.0449	21.7	0.234	21.9	0.0378	3.3	0.148
N1-1_1.1	4	0.16	994	1669	1.68	232.6	10.3	0.0503	2.8	0.255	5.3	0.0367	4.5	0.850
N1-5_7.1	4	0.20	2266	8990	3.97	238.2	6.5	0.0503	3.3	0.261	4.3	0.0376	2.8	0.641
N1-6_11.2	4	0.37	644	1878	2.92	229.9	3.1	0.0501	4.9	0.251	5.1	0.0363	1.4	0.267
N1-6_1.4	4	0.01	1248	3343	2.68	231.4	6.4	0.0511	1.6	0.258	3.3	0.0365	2.8	0.871
N1-6_26.1	4	0.54	1457	2196	1.51	231.6	2.9	0.0511	3.3	0.258	3.5	0.0366	1.3	0.360
N1-9_25.1	4	0.16	2406	4368	1.82	229.1	2.8	0.0508	1.7	0.253	2.1	0.0362	1.2	0.581
N1-9_5.1	4	1.34	5974	7557	1.26	218.3	2.6	0.0506	2.7	0.240	3.0	0.0344	1.2	0.403

Примечание. Pb_c и Pb* — обыкновенный и радиогенный свинец соответственно. Погрешность калибровки относительно стандарта равна 1.09. Погрешности единичных анализов (отношений и возрастов) приводятся на уровне ±2σ. Возраст вычислен в координатах ²⁰⁷Pb/²³⁵U — ²⁰⁶Pb/²³⁸U, погрешность с учетом погрешностей определения константы распада. Rho — коэффициент корреляции отношений ²⁰⁷Pb*/²³⁵U — ²⁰⁶Pb*/²³⁸U. Обработка экспериментально полученных U-Pb данных и построение графиков с конкордией осуществлялась с использованием программы ISOPLOT/EX [Ludwig, 2003, 2005]. Аналитик С.Л. Пресняков.

Таблица 2. U-Pb изотопные анализы бадделитов интрузива Норильск-1

№ анализа	U, г/т	Th, г/т	Th/U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U возраст	±	Атомные отношения					
						²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±
N1-4_B1	543	16	0.029	293	6	0.0518	0.0008	0.3325	0.0054	0.0466	0.0005
N1-4_B3	297	5	0.017	289	8	0.0521	0.0011	0.3286	0.0069	0.0458	0.0006
N1-4_B5	738	24	0.033	289	6	0.0523	0.0008	0.3303	0.0053	0.0458	0.0005
N1-4_B7	474	7	0.015	289	6	0.0529	0.0009	0.3348	0.0056	0.0459	0.0006
N1-4_B8	432	15	0.035	291	8	0.0529	0.0009	0.3373	0.0059	0.0462	0.0006
N1-4_B9	251	5	0.020	287	8	0.0531	0.0011	0.3332	0.0070	0.0455	0.0006

Примечание. Погрешности единичных анализов (отношений и возрастов) приводятся на уровне ±2σ. Обработка экспериментально полученных U-Pb данных и построение графиков с конкордией осуществлялась с использованием программы GLITTER [Griffin et al., 2008]. Анализы выполнены Е.А. Белоусовой.

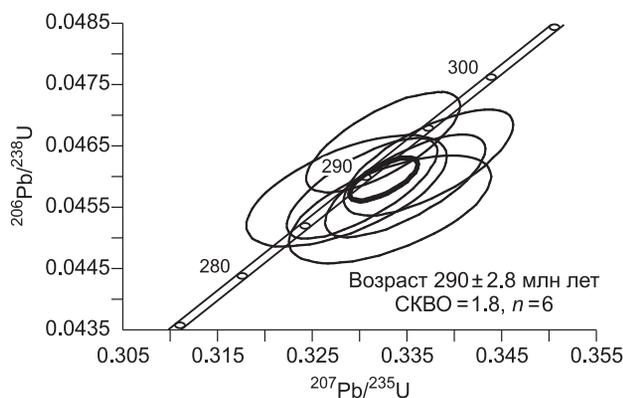


Рис. 4. График с конкордией для бадделейтов из безоливинового габбро интрузива Норильск-1.

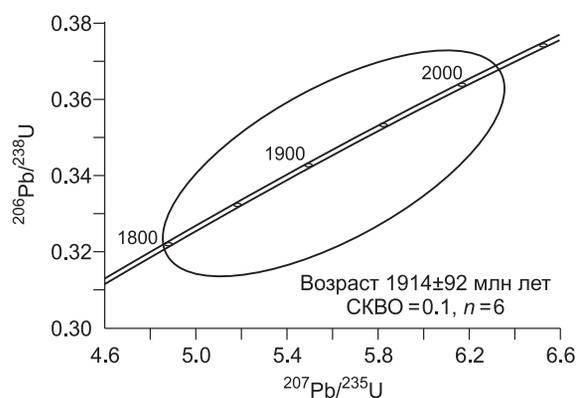


Рис. 5. График с конкордией для захваченного циркона из габбро-диорита интрузива Норильск-1.

рен, называемых ниже как тип 1 (Zr1) и тип 2 (Zr2), установлены $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возрасты соответственно 261.3 ± 1.6 млн лет (среднеквадратичное отклонение (СКВО) = 0.70, вероятность соответствия (P) 0.40, см. рис. 3, А) и 245.7 ± 1.1 млн лет (СКВО = 1.7, $P = 0.19$; см. рис. 3, Б). Ядерные типы цирконов являются более древними по отношению к их оторочкам. Действительно, цирконы из оторочек в полифазных зернах, а также значительная часть цирконов, представленных монофазными зернами, отличаются конкордантными U-Pb возрастными 236.5 ± 1.8 млн лет (СКВО = 0.19, $P = 0.66$, см. рис. 3, В) и 226.7 ± 0.9 млн лет (СКВО = 0.34, $P = 0.56$, см. рис. 3, Г). Мы выделяем популяции циркона с конкордантными возрастными 236.5 ± 1.8 и 226.7 ± 0.9 как типы 3 (Zr3) и 4 (Zr4) соответственно.

Восемь зерен бадделейта из безоливинового габбро (горизонт N1-4) определяют пятый $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возрастной кластер (290 ± 2.8 млн лет) (см. рис. 4). Значительный промежуток времени, соответствующий образованию бадделейта и четырех разновидностей циркона разного возраста, по-видимому, отвечает продолжительной временной эволюции магматического субстрата.

Единственный пример древнего циркона с конкордантным U-Pb возрастом 1914 ± 92 млн лет (СКВО = 0.1, $P = 0.75$, см. рис. 5) был выявлен в габбро-диорите гибридного происхождения в верхней части интрузива (горизонт N1-1, см. рис. 1). Вероятно, что циркон был захвачен из пород фундамента, характеризующихся возрастом 1.9 млрд лет, и может служить индикатором расположения глубинной магматической камеры.

КОНЦЕНТРАЦИИ Th и U

Концентрации тория и урана в изученных цирконах варьируют в широких пределах: 79—31614 и 66—11423 г/т соответственно (см. рис. 6). В различных типах циркона установлено закономерное увеличение содержаний Th и U от более древних к молодым (см. рис. 6). Для Норильского интрузива средние значения Th и U в Zr1 характеризуются величинами 2434 и 964 г/т, в Zr2 — 3386 и 1435 г/т, в Zr3 — 4279 и 1614 г/т, а в Zr4 — 4649 и 2105 г/т соответственно (см. рис. 6). Значения Th/U отношения в выделенных типах циркона варьируют от 0.81 до 6.51, тогда как их средние близки (2.37, 2.31, 2.48 и 2.40). По сравнению с цирконами бадделейта свойственны (см. табл. 2) более умеренные концентрации урана (251—738 г/т), они значительно уступают первым по содержанию тория (5—24 г/т).

Th/U отношения в большинстве цирконов типичны для таковых в магматических цирконах [Velousova et al., 2002; Hoskin, Schaltegger, 2003]. Аномально высокие концентрации тория и урана в некоторых цирконах Zr4 (до 2.0 и 0.75 мас. % соответственно) в сочетании с повышенными отношениями Th/U (до 6.5) могут свидетельствовать в пользу фракционной кристаллизации расплава при их формировании.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

Циркон и бадделейт, ранее изученные с помощью SHRIMP [Campbell et al., 1992] и ID-TIMS [Kato et al., 1996], характеризуют одну петрографическую разновидность интрузива Норильск-1, представленную лейкогаббро. U-Pb результаты [Campbell et al., 1992] соответствуют диапазону $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возрастов от 243.8 ± 4.9 до 251.6 ± 5.0 млн лет (среднее 248 ± 3.7 млн лет). U-Pb данные, приведенные в работе [Kato et al., 1996], дали еще более значительный временной интервал возрастов (от 228.4 ± 0.6

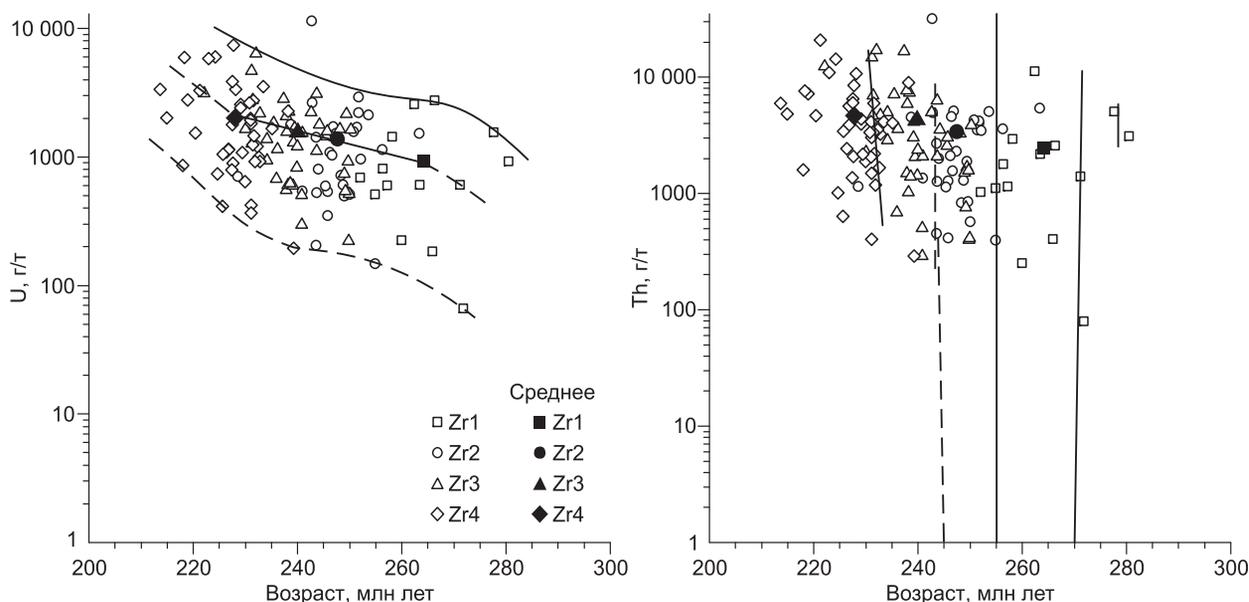


Рис. 6. Состав различных типов циркона интрузива Норильск-1 в координатах U—U-Pb возраст и Th—U-Pb возраст.

до 251.2 ± 0.3 млн лет), характеризующихся верхним пересечением с конкордией 256.5 ± 2.6 млн лет. Таким образом, возрастные вариации, воспроизведенные обоими методами для одной и той же породы, достаточно близки и могут быть обусловлены полифазной природой изученных цирконов. Полученные U-Pb данные для бадделейта и выделенных типов циркона из всех разновидностей пород отличаются значительным интервалом образования (290 ± 2.8 , 261.3 ± 1.6 , 245.7 ± 1.1 , 236.5 ± 1.8 и 226.7 ± 0.9 млн лет), свидетельствующим о длительном пульсационном развитии магматической системы. Выявленная длительность процессов магмообразования, по-видимому, была благоприятным фактором для формирования уникальных по объемам магм, обогащенных рудными компонентами.

Часто предполагается, что ультрамафит-мафитовые интрузивы Норильского региона составляют незначительный компонент одного из главных эпизодов магматической активности на рубеже палеозоя и мезозоя (~ 250 млн л.н.), в результате чего была сформирована одна из самых значительных провинций толеитовых платобазальтов на Земле [Ernst, Buchan, 2002; Reichow et al., 2009]. Если базальтовый магматизм был действительно приурочен к пермотриасовому временному рубежу (248.7 ± 0.6 — 250.3 ± 1.1 млн лет [Reichow et al., 2009]), то наши U-Pb данные свидетельствуют в пользу отсутствия генетической связи между базальтами, обедненными халькофильными элементами, и интрузивами норильского типа, обогащенными сульфидами, и тогда их сонахождение, вероятно, является случайным. Похожие выводы ранее обосновывались другими исследователями [Годлевский, 1959; Туганова, 1991; Szamanske et al., 1995; Latypov, 2002], оспаривавшими генетическую связь между толеитовыми базальтами и промышленными ультрамафит-мафитовыми интрузивами.

Мы полагаем, что мафит-ультрамафитовые магмы, родоначальные для промышленно-рудоносных интрузивов (в частности, интрузива Норильск-1), образовались, как минимум, за 10–40 млн лет до внедрения базальтов. Время магматического эпизода, представленного Zr2 (245.7 ± 1.1 млн лет), характеризует эволюцию магматического расплава в промежуточном глубинном очаге. Цирконы Zr3 и Zr4 могут служить индикаторами становления и термальной рекристаллизации пород после внедрения интрузива, значительно позднее извержения базальтов.

Результаты геохронологических исследований, а также детальное изучение морфологии и внутреннего строения цирконов из Талнахского и Хараелахского промышленно-рудоносных интрузивов выявили ранее неизвестные стадии магматической активности в регионе [Малич и др., 2010; Malitch et al., 2010; Malitch, Petrov, 2010]. Дискретность распределения возрастов в интервале 230–270 млн лет (см. табл. 3) позволяет предположить, что образование цирконов отвечает либо нескольким стадиям эволюции магматического расплава, либо характеризует гетерогенные магматические источники в процессе формирования и становления интрузивов норильского типа. Некоторые полифазные зерна также сохраняют геохронологическую информацию образования более древних цирконов, которые группируются около рубежей в 300 и 340 млн лет. В частности, для Хараелахского интрузива было установлено четы-

Таблица 3.

**Сравнительная геохронологическая характеристика цирконов
из промышленно-рудноносных интрузивов Норильской провинции**

Интрузив	Количество измерений	Возраст, млн лет				
		от	до	вероятностное распределение		конкордантный, наиболее распространенный
Норильск-1	129	213.7	280.5	232.6	252.3	261.3, 245.7, 236.5, 226.7
Талнахский	148	213.5	294.4	234.9	260.9	262.7, 256.2, 234.6
Хараелахский	24	229.4	355.0	252.2	346.5	347, 265, 253.9, 235.9

Примечание. Возрастные характеристики цирконов Талнахского и Хараелахского интрузивов приведены по [Malitch, Petrov, 2010; Malitch et al., 2010; Малич и др., 2010].

ре группы цирконов, обладающих различными морфологическими, геохимическими, U-Pb и Hf изотопными параметрами [Malitch et al., 2010]. U-Pb возраст этих групп охватывает значительный промежуток времени (от 347 ± 16 до 235.7 ± 6.1 млн лет), свидетельствуя о нескольких магматических событиях, которые группируются около 350 и 250 млн лет. Они соответствуют двум известным стадиям (D_3 — C_1 и P_2 — T_1) тектонического развития Сибирского кратона [Малич, 1975]. Характерно, что продолжительная магматическая эволюция длительностью 130 млн лет (в интервале 2.52—2.39 млрд лет) обосновывается [Bayanova et al., 2009] для платиноносного Кольского пояса на примере промышленно-рудноносных Федорово-панского и мончегорского интрузивных комплексов, интрузива горы Генеральской, Имандровского лополита и других. Полученные результаты могут найти объяснение в рамках гипотезы плюмов и суперплюмов [Добрецов и др., 2001; Добрецов, 2008; Dobretsov et al., 2008].

Несмотря на общее согласие с тем, что примитивные магмы образовались за счет плюмового источника, степень взаимодействия между этими магмами с веществом континентальной коры и субконтинентальной мантии является предметом длительной дискуссии [Sharma et al., 1992; Wooden et al., 1992; Lightfoot et al., 1993; Ivanov, 2007; Dobretsov et al., 2008; Zhang et al., 2008]. Первые результаты Lu-Hf изотопии [Malitch et al., 2008, 2010] показали, что преобладающие значения изотопного состава гафния цирконов промышленно-рудноносных интрузивов отвечают параметрам, типичным для ювенильного мантийного источника. Вместе с тем Hf изотопные свойства цирконов разных групп Хараелахского интрузива (ϵ_{Hf} в диапазоне от +2.3 до +16.3) отражают взаимодействие мантийных магм с литосферой, представленной либо веществом древней коры, либо субконтинентальной мантии [Griffin et al., 2000], которые по изотопному составу гафния характеризуются сходными параметрами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совмещенное применение специальной технологии минералогических работ (метода ppm-минералогии) для выделения цирконов и бадделейтов из пород и аналитические методы изотопного анализа *in situ* в нашем исследовании обеспечили новую, более детальную и точную информацию относительно длительности образования и происхождения пород промышленно-рудноносного интрузива Норильск-1. На основании детального изучения морфологии и внутреннего строения выявлены четыре популяции цирконов (Zr1, Zr2, Zr3 и Zr4). Возраст бадделеита и четырех групп циркона охватывает значительный промежуток времени (от 290 ± 2.8 до 226.7 ± 0.9 млн лет). Результаты исследований позволяют предположить, что кристаллизация бадделеита и четырех групп цирконов промышленно-рудноносного интрузива Норильск-1 происходила в несколько стадий (290 ± 2.8 , 261.3 ± 1.6 , 245.7 ± 1.1 , 236.5 ± 1.8 и 226.7 ± 0.9 млн лет соответственно). Полученные данные свидетельствуют о том, что промышленно-рудноносные интрузивы Норильского региона имели более сложную геологическую историю, чем это ранее предполагалось.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 09-05-12028-офи-м и 12-05-00746) и УрО РАН (грант 12-У-5-1038). Аналитические данные получены с помощью измерительных приборов в рамках государственного контракта № 7Ф-ТАО/2005 и системной инфраструктуры DEST, ARC LIEF, NCRIS и Университетом Маквори (статья № 720 ARC GEMOC, <http://www.gemoc.mq.edu.au>).

ЛИТЕРАТУРА

Геология и полезные ископаемые России. Т. 3. Восточная Сибирь / Под ред. Н.С. Малича, Е.П. Миронюка, Е.В. Тугановой. СПб., ВСЕГЕИ, 2002, 396 с.

Годлевский М.Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М., Гостехметиздат, 1959, 68 с.

- Добрецов Н.Л.** Геологические следствия термохимической модели плюмов // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (7), с. 587—604.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г.** Глубинная геодинамика. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001, 408 с.
- Малич К.Н., Баданина И.Ю., Туганова Е.В.** Магматическая эволюция ультрамафит-мафитовых интрузивов Норильской провинции (Россия): вещественные и геохронологические данные // Литосфера, 2010, № 5, с. 37—63.
- Малич Н.С.** Тектоническое развитие чехла Сибирской платформы. М., Недра, 1975, 216 с.
- Туганова Е.В.** Петролого-геодинамическая модель образования сульфидных медно-никелевых месторождений // Геология и геофизика, 1991 (6), с. 3—11.
- Bayanova T., Ludden J., Mitrofanov F.** Timing and duration of Palaeoproterozoic events producing ore-bearing layered intrusions of the Baltic Shield: metallogenic, petrological and geodynamic implications // Geol. Soc. London, Spec. Publ., 2009, v. 323, p. 165—198.
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I.** Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type // Contr. Miner. Petrol., 2002, v. 143, p. 602—622.
- Campbell I.H., Czamanske G.K., Fedorenko V.A., Hill R.I., Stepanov V.** Synchronism of the Siberian traps and the Permian-Triassic boundary // Science, 1992, v. 255, p. 1760—1763.
- Czamanske G.K., Zen'ko T.E., Fedorenko V.A., Calk L.C., Budahn J.R., Bullock J.H., Fries T.L., King B.S., Siems D.F.** Petrography and geochemical characterization of ore-bearing intrusions of the Noril'sk type, Siberia; with discussion of their origin // Res. Geol. Spec. Iss., 1995, v. 18, p. 1—48.
- Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A.G., Vernikovskiy V.A., Gladkov I.N.** Modelling of thermochemical plumes and implications for the origin of the Siberian traps // Lithos, 2008, v. 100, p. 66—92.
- Ernst R.E., Buchan K.L.** Maximum size and distribution in time and space of mantle plumes: evidence from large igneous provinces // J. Geodynam., 2002, v. 34, p. 309—342 (Erratum: J. Geodynam., 2002, v. 34, p. 711—714).
- Griffin W.L., Pearson N.J., Belousova E., Jackson S.E., O'Reilly S.Y., van Achterberg E., Shee S.R.** The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites // Geochim. Cosmochim. Acta, 2000, v. 64, p. 133—147.
- Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y.** Appendix 2. GLITTER: data reduction software for laser ablation ICP-MS // Laser Ablation—ICP—MS in the Earth Sciences, Mineralogical Association of Canada Short Course Series / Ed. P. Sylvester. 2008, v. 40, p. 204—207.
- Hoskin P.W.O., Schaltegger U.** The composition of zircon and igneous metamorphic petrogenesis // Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, v. 53, p. 27—55.
- Ivanov A.V.** Evaluation of different models for the origin of the Siberian traps // The origin of melting anomalies: plates, plumes and planetary processes / Eds. G.R. Fougler, D.M. Jurdy. Spec. Paper Geol. Soc. Amer., 2007, v. 430, p. 669—691.
- Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E.A.** The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology // Chem. Geol., 2004, v. 211, p. 47—69.
- Kamo S.L., Czamanske G.K., Krogh T.E.** A minimum U-Pb age for Siberian flood-basalt volcanism // Geochim. Cosmochim. Acta, 1996, v. 60, p. 3505—3511.
- Latypov R.M.** Phase equilibria constraints on relations of ore-bearing intrusions with flood basalts in the Noril'sk region, Russia // Contr. Miner. Petrol., 2002, v. 143, p. 438—449.
- Lightfoot P.C., Hawkesworth C.J., Hergt J., Naldrett A.J., Gorbachev N.S., Fedorenko V.A., Doherty W.** Remobilisation of the continental lithosphere by a mantle plume: major-, trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotope evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia // Contr. Miner. Petrol., 1993, v. 114, p. 171—188.
- Ludwig K.R.** User's manual for ISOPLOT/Ex 3.00. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication № 4, 2455 Ridge Road, Berkeley CA 94709, USA, 2003, 70 p.
- Ludwig K.R.** SQUID 1.12. A user's manual. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication. № 2, 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, USA, 2005, 22 p.
- Malitch K.N., Petrov O.V.** Geochronology and Hf-Nd-Sr-Os-S isotope systematics of the Noril'sk-type intrusions: new insights for prolonged evolution and source heterogeneity // Giant ore deposits down-under. 13th Quadrennial IAGOD Symposium Proceedings. Government of South Australia, 2010, p. 234—236.

Malitch K.N., Belousova E.A., Griffin W.L., Badanina I.Yu., Petrov O.V., Pearson N.J. Contrasting magma sources in ultramafic-mafic intrusions of the Noril'sk area (Russia): Hf isotope evidence from zircon // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2008, v. 72, № 12S, p. A589.

Malitch K.N., Belousova E.A., Griffin W.L., Badanina I.Yu., Pearson N.J., Presnyakov S.L., Tuganova E.V. Magmatic evolution of the ultramafic-mafic Kharaelakh intrusion (Siberian Craton, Russia): insights from trace-element, U-Pb and Hf-isotope data on zircon // *Contr. Miner. Petrol.*, 2010, v. 159, № 6, p. 753—768.

Pupin J.P. Zircon and granite petrology // *Contr. Miner. Petrol.*, 1980, v. 73, p. 207—220.

Reichow M.K., Pringle M.S., Al'mukhamedov A.I., Allen M.B., Andreichev V.L., Buslov M.M., Davies C.E., Fedoseev G.S., Fitton J.G., Inger S., Medvedev A.Ya., Mitchell C., Puchkov V.N., Safonova I.Yu., Scott R.A., Saunders A.D. The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: implications for the end-Permian environmental crisis // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2009, v. 277, p. 9—20.

Sharma M., Basu A.R., Nesterenko G.V. Temporal Sr-, Nd-, and Pb-isotopic variations in the Siberian flood basalts: implications for the plume-source characteristics // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1992, v. 113, p. 365—381.

Williams I.S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe // *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes* / Eds. M.A. McKibbe, W.C. Shanks, W.I. Ridley. *Reviews in Economic Geology*, 1998, v. 7, p. 1—35.

Wooden J.I., Czamanske G.K., Bouse R.M., Likhachev A.P., Kunilov V.E., Lyul'ko V. Pb isotope data indicate a complex mantle origin for the Norilsk-Talnakh ores, Siberia // *Econ. Geol.*, 1992, v. 87, p. 1153—1164.

Zhang M., O'Reilly S.Y., Wang K-L., Hronsky J., Griffin W.L. Flood basalts and metallogeny: the lithospheric connection // *Earth-Sci. Revs.*, 2008, v. 86, p. 145—174.

*Рекомендована к печати 15 июля 2011 г.
Н.Л. Добрецовым*

*Поступила в редакцию
6 апреля 2011 г.*