

УДК 550.4(546.21)

## ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ КИСЛОРОДА МИНЕРАЛОВ КОРУНДОНОСНЫХ ПЕГМАТИТОВ И МЕТАСОМАТИТОВ УРАЛА И ПРИБАЙКАЛЬЯ

© 2014 г. В. В. Яковенко, С. В. Высоцкий, А. А. Карабцов

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН  
690022, г. Владивосток, просп. 100-летия Владивостока, 159  
E-mail: office@fegi.ru

Поступила в редакцию 04.09.2013 г.

В данной статье изложены результаты исследования изотопии кислорода корундов некоторых коренных пегматитовых месторождений России. Согласно нашим данным, изученные уральские корунды из полевошпатовых (сиенитовых) пегматитов, демонстрируют тесную связь с магмами основного состава. В тоже время, источником корундов из Тажеранского массива (пегматиты в десилицированных сиенитах) являются расплавы, образовавшиеся в результате ультраметаморфизма и плавления осадочных пород, т.е. граниты S-типа. Значения изотопов кислорода для корундоносных плагиоклазитов и слюдитов в ультраосновных породах месторождения Рай-Из укладываются в промежуток от  $+4.8\% < \delta^{18}\text{O} < +7.4\%$ , что соответствует диапазону мантийных магм. По результатам исследования был сделан вывод о том, что изотопный состав кислорода корунда определяется генетическим типом пегматита.

Ключевые слова: пегматиты, корунды, изотопы кислорода, Ильменские горы (Урал), массив Рай-Из (Урал), Тажеранский массив (Прибайкалье).

Определение коренного источника минералов в россыпях является довольно сложной задачей. Особенно, если это касается таких полигенных минералов, как корунд [4]. Недостаточное понимание генезиса ювелирных корундов, добытых из россыпей, сильно ограничивает возможность поиска коренных месторождений этих драгоценных камней. В последние годы одним из дополнительных методов решения этой проблемы стало определение изотопного состава кислорода корунда и сопутствующих минералов [2, 3, 12, 14]. Зная изотопный состав кислорода в минералах из коренных месторождений, можно с большой степенью достоверности определить генезис благородных корундов из россыпей.

В данной работе рассмотрены корунды коренных месторождений разных типов пегматитов России. Среди них – полевошпатовые (сиенитовые) пегматиты Ильменских гор, плагиоклазиты и слюдиты в ультраосновных породах массива Рай-Из на Урале и пегматиты в десилицированных сиенитах Тажеранского массива (Прибайкалье).

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изотопный анализ кислорода проводился в ДВГИ ДВО РАН на высоковакуумной установке с лазерным методом разложения. Для нагрева образца использован инфракрасный CO<sub>2</sub>-лазер (MIR-30). Изотопный состав кислорода определялся на массах 32 и 34 на масс-спектрометре Finnigan MAT-

253. Стандартный газ был откалиброван по шкале SMOW, используя NBS-28 ( $^{18}\text{O} = 10.9\%$ ). Внешняя погрешность метода менее чем  $\pm 0.2\%$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### Минералогия

**Ильменские горы (Урал).** Изученные корунды Ильменских гор отобраны из миаскитовых и сиенитовых пегматитов, залегающих в сиенитах и гнейсах. Форма пегматитовых тел четковидная с раздувами и пережимами или линзовидная с апофизами. Обычная длина жил 10–15 м, мощность 0.5–1.5 м. Кристаллы корунда заключены в полевом шпате и образуют гнездообразные скопления [5]. В корундово-полевошпатовых пегматитах наиболее обычны призматические, бочонковидные и остродипирамидальные кристаллы корунда длиной 2–8 см, реже – до 20–39 см [5]. По цвету преобладают голубовато-серые, бронзово-серые, темно-серые разновидности корунда. Окраска корунда комбинированная: аллохроматическая из-за минеральных микровключений и идиохроматическая с хромофорными центрами Fe и Ti (синяя, голубая, желтая). Отмечена синтаксия корунда с биотитом, мусковитом и полевым шпатом. Корунды разбиты трещинами, по трещинам развиваются мусковит и биотит (рис. 1). На контакте корундов с вмещающей породой также наблюдается тонкая – 10 мкм кайма мусковита. Корунды содержат железо в ко-

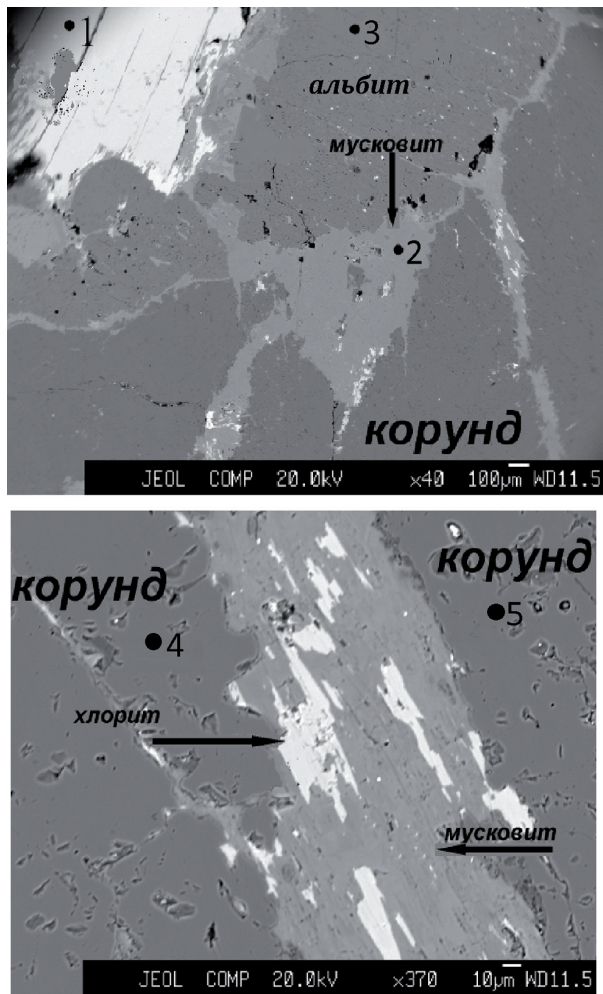


Рис. 1. Корунд из полевошпатового пегматита, Ильменские горы, образец УР-1.

Точками показаны участки выполнения локального анализа на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-8100. Результаты анализов точек 1–5 приведены в табл. 1.

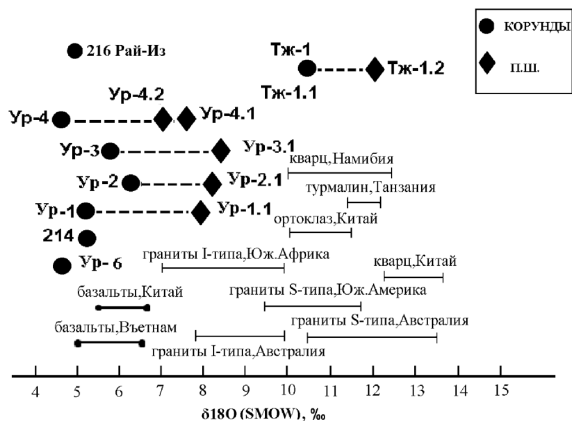


Рис. 2. Изотопный состав кислорода пород и минералов.

Помимо авторских данных, приведенных в табл. 2, использованы результаты анализов изотопного состава кислорода по гранитам [6], остальное – по [11, 15].

Таблица 1. Состав существующих минералов в корундоносных породах изученных месторождений, мас. %.

Месторождение	Минерал	SiO	TiO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма
Ильменские горы, Урал, Россия	биотит 1	32.4	1.7	21.1	–	29.4	0.8	–	1.8	0.48	9.9	97.2
	мусковит 5	44.8	–	36.9	–	1.9	–	1.1	–	10.6	10.6	94.7
	альбит 6	67.6	–	20.6	–	0.3	–	–	–	10.6	0.26	100.2
	корунд 7	–	0.07	99.6	–	0.6	–	–	–	–	–	100.0
	корунд 12	–	0.09	99.7	–	0.6	–	–	–	–	–	100.0
Массив Рай-Из, Полярный Урал, Россия	флогопит	35.8	–	21.2	1.9	4.4	18.3	2.3	7.3	–	2.9	94.1
	хромит	–	0.03	22.4	40.4	30.7	3.8	–	–	–	–	97.3
	рубин	–	–	97.1	2.7	0.4	–	–	–	–	–	100.1
	рубин	–	–	96.1	3.8	0.5	–	–	–	–	–	100.3
Тажеранский массив, Иркутская область, Россия	Плагиоклаз	63.6	–	23.3	–	2.6	–	3.9	–	9.5	10.9	100.3
	Мусковит	44.9	–	35.4	–	1.1	–	–	–	0.8	–	94.4
	Корунд	–	–	98.7	–	1.0	–	–	–	–	–	99.8
Корунд 12	–	–	98.8	–	1.0	–	–	–	–	–	99.8	

**Таблица 2.** Изотопный состав кислорода корундов и ассоциирующих минералов.

Тип месторождения	Месторождения	Образец	$\delta^{18}\text{O}$ (SMOW)
В сиенитовых и миекистовых пегматитах	Ильменские горы, Урал (Россия)	Ур-1(корунд, копь №334)	5.4
		Ур-1.1(пол.шпат, копь №334 )	7.8
		Ур-2(корунд, копь №298)	6.5
		Ур-2.1(пол.шпат, копь №298)	8.3
		Ур-3(корунд, копь №361)	5.9
		Ур-3.1(пол.шпат, копь №361 )	8.4
		Ур-4(корунд, копь №293 )	5.0
		Ур-4.2(пол.шпат,белый, копь №293)	7.0
		Ур-4.1(пол.шпат,оран., копь №293)	7.5
		214 (корунд из пегматита)	5.4
		Ур-6(корунд)	4.6
Пегматиты в десилицированных сиенитах	Тажеранский массив,Иркутская область (Россия).	Тж-1.1(слюда)	10.6
		Тж-1(корунд)	10.6
		Тж-1.2(п.ш.)	11.9
Полевошпатовые слюдиты в ультраосновных породах	Рай Из, Полярный Урал (Россия)	216, рубин (аппо-ультрамафитовый слюдит)	4.9

личестве от 0.3 до 0.56%, на границах с мусковитом появляется титан 0.07–0.09% (табл. 1).

**Массив Рай-Из (Урал).** Проявление корунда Макара-Рузь расположено на Полярном Урале, в юго-западном эндоконтакте расслоенного дунит-гарцбургитового массива Рай-Из. Выделяются два типа пространственно разобщенных рубин-содержащих тел: плагиоклаз-рубиновых и слюдит-рубиновых. Длина тел около 30 м, мощность 20–22 м. Характерная особенность этих тел – их симметрично-зональное строение [7]. В изученных образцах хорошо образованные кристаллы и сростки корунда в ассоциации с рассеянным хромитом распределены среди плагиоклаз-флогопитовой и флогопитовой массы. Корунды либо окружены каймой молочно-белого плагиоклаза, либо оказываются заключенными в слюдитый агрегат. Они обладают темно-красным цветом, среднее содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{FeO}$  3.2 и 0.4%, соответственно (табл. 1). Кристаллы рубина повсеместно содержат включения хромшпинелидов и слюды. В слюдитой зоне плагиоклаз-рубиновых проявлений отчетливо выделяются две разновидности слюд: крупночешуйчатый серовато-зеленый фуксит из плагиоклазитов и темно-коричневый флогопит, вмещающий рубины.

**Тажеранский массив (Прибайкалье).** Тажеранский массив прорывает докембрийские метаморфические породы Ольхонской серии. Щелочной интрузив представлен линзовидными и пластобразными телами щелочных и нефелиновых сиенитов, разобщенных многочисленными провесами кровли и крупными останцами вмещающих пород [1]. В районе Тажеранского массива корунд встречен в виде кристаллов белого, серого, темно-

коричневого, черного и синего цвета размером до 8 см. Формирование корундов обусловлено процессами постмагматической десиликации сиенитов и гранитных пегматитов [1]. Корунд имеет серую окраску, пронизан трещинами, заполненными вторичными минералами. Содержание железа – 1.1%. Наблюдается увеличение концентрации титана в корунде, от края к центру, до 0.18% (табл. 1). На контакте корунда с породой наблюдается полоска мусковита, шириной 100 мкм.

### Изотопия кислорода корундов и ассоциирующих минералов

Результаты исследования изотопов кислорода в корундах и ассоциирующих минералах приведены в табл. 2. Все значения изотопов кислорода для корундов Ильменских гор и массива Рай-Из укладываются в диапазон от  $+4.6\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < +6.5\text{‰}$ , а для полевых шпатов от  $+7.0\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < 8.4\text{‰}$  относительно SMOW (рис. 2). В то же время корунды из пегматитов Тажеранского массива имеют значения для  $\delta^{18}\text{O} = 10.6\text{‰}$ , а полевой шпат и слюда – 11.9‰ и 10.6‰ относительно SMOW, соответственно (табл. 2).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что интервал значений  $\delta^{18}\text{O}$  для основных пород, как показано на рис. 2, достаточно узок и колеблется в пределах от +4.5 до +7.0‰ [15]. В пегматитах кислого состава этот интервал более широк. Это связано с тем, что диапазон образования кислых интрузивов более разнообразен. Анализ имеющихся

публикаций [6, 10, 13, 15] показывает, что все корунды, происхождение которых связывается с гранитными пегматитовыми месторождениями, попадают в интервал от  $+7.0\% < \delta^{18}\text{O} < +13.8\%$  относительно SMOW. В этот же интервал укладываются и изотопные соотношения как ассоциирующих с корундами минералов (кварц, ортоклаз, турмалин), так и собственно вмещающей породы в целом. Согласно классификации Б. Чаппела и А. Уайта [8, 9], состав гранитов отражает материал их источника. В дальнейшем О'Нил и др. [13] определили, что гранитные серии S-типа обогащены  $^{18}\text{O}$  по сравнению с гранитами I-типа. Значение  $\delta^{18}\text{O}$ , соответствующее границе между этими двумя типами гранитов, составляет  $10\%$  [6]. В целом, граниты S-типа ( $\delta^{18}\text{O} = 9.5\text{--}13.5\%$ ), образовавшиеся при плавлении осадочных пород, обогащены  $^{18}\text{O}$  по сравнению с гранитами I-типа ( $\delta^{18}\text{O} = 7\text{--}9.9\%$ ), образовавшимися при плавлении основных магматических пород.

Согласно нашим данным, корунды месторождений Рай-Из, из плагиоклазитов и слюдитов в массивах ультраосновных пород ( $\delta^{18}\text{O} = 4.9\%$ ) укладываются в диапазон  $+4.8\% < \delta^{18}\text{O} < +7.4\%$ , что соответствует диапазону мантийных магм. Исследованные уральские корунды ( $\delta^{18}\text{O} = 4.6\text{--}6.5\%$ ) демонстрируют тесную связь с магмами основного состава. В то же время, корунды из пегматитов Тажеранского массива имеют большие значения  $\delta^{18}\text{O}$  ( $10.6\%$ ). Это говорит о том, что источником этих корундов, как и массива в целом, являются расплавы, образовавшиеся в результате ультраметаморфизма и плавления осадочных пород, т.е. граниты S-типа.

Таким образом, изотопный состав кислорода корунда определяется генетическим типом пегматита, т.е. указывает на его формационную принадлежность и может служить критерием, определяющим генезис корундов из россыпей.

Авторы глубоко признательны В.А. Попову, А.А. Коневу, Е.В. Складову за предоставленные для исследования образцы.

*Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-05-31320 мол\_а.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байкал. Геология. Человек. / М.И. Грудинин, И.С. Чувашова. Иркутск : ИГУ, 2011. 239 с.
2. *Высоцкий С.В., Игнатьев А.В., Левицкий В.И., Будницкий С.Ю., Веливецкая Т.А.* Новые данные по стабильным изотопам минералов корундоносных образований Северной Карелии (Россия) // Докл. АН. 2011. Т. 439, № 1. С. 95–98.
3. *Высоцкий С.В., Яковенко В.В., Игнатьев А.В., Карабцов А.А.* Изотопные соотношения кислорода как индикатор генезиса “базальтовых” корундов. Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28, № 1. С. 66–71.
4. *Киевленко Е.Я., Сенкевич Н.Н., Гаврилов А.П.* Геология месторождений драгоценных камней. М.: Недра, 1982. 290 с.
5. *Попов В.А., Попова В.И.* Минералогия пегматитов Ильменских гор // Минералогический альманах. 2006. Т. 9. 152 с.
6. *Фор. Г.* Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.
7. *Щербакова С.В., Сутурин А.Н.* Геохимия и минералогия метасоматитов с рубином (массив Рай-Из, Полярный Урал) // Геохимические поиски самоцветов. Новосибирск: Наука, 1990. С. 167–198.
8. *Chappell B.W., White A.J.R.* Two contrasting granite types // Pacific Geologist. 1974. № 8. P. 173–174.
9. *Chappell B.W., White A.J.R.* I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia // Geology of Granites and Their Metallogenic Relations. Beijing: Science Press, 1984. P. 87–101.
10. *Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D.* Geochemical Classification for Granitic Rocks // J. Petrol. 2001. V. 42, № 11. P. 2033–2048.
11. *Criss R.E., Taylor H.P.* An  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  and D/H study of Tertiary hydrothermal systems in the southern half of the Idaho batholiths // Geol. Soc. Amer. Bull. 1983. V. 94. P. 640–663.
12. *Giuliani G., Fallick A., Garnier V., France-Lanord C., Ohnenstetter D., Schwarz D.* Oxygen isotope composition as a tracer for the origins of rubies and sapphires // Geology. 2005. V. 33. P. 249–252.
13. *O'Neil J.R., Shaw S.E., Flood R.H.* Oxygen and hydrogen isotope compositions as indicators of granite gneiss in the New England Batholith, Australia // Contrib. Mineral. Petrol. 1977. V. 62. P. 313–328.
14. *Sutherland F.L., Zaw K., Meffre S., Giuliani G., Fallick A.E., Graham I.T., Webb G.B.* Gem-corundum megacrysts from east Australian basalt fields: trace elements, oxygen isotopes and origins // Australian J. Earth Sci. 2009. V. 56, № 7. P. 1003–1022.
15. *Zi-Fu Zhao, Yong-Fei Zheng, Chun-Sheng Wei, Bing Gong* Temporal relationship between granite cooling and hydrothermal uranium mineralization at Dalongshan in China: a combined radiometric and oxygen isotopic study // Ore Geology Reviews. 2004. V. 25. P. 221–236.

*Рецензент Ю.В. Ерохин*

## Features of the oxygen isotopic composition of corundum bearing pegmatites and metasomatites in the Urals and Baikal

V. V. Yakovenko, S. V. Vysotskiy, A. A. Karabtsov

*Far East Geological Institute, Far East Branch of RAS*

The results of a study of the oxygen isotopes in corundum of some indigenous pegmatite deposits in the Russia are presented in paper. According to our data, all studied corundum from feldspar (syenite) pegmatites in the Urals show a close links with a magmas of basic composition. At the same time a source of corundum from pegmatites in desilicated syenites of Tazheransky massif (Baikal) are the melts which formed as a result of ultrametamorphism and melting of sediments, i.e. granites S-type. The values of oxygen isotopes of corundum in plagioclasites and micaceous from ultramafites in the Rai-Iz massif (Polar Ural) are within the range of  $+4.8\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < +7.4\text{‰}$ , which corresponds to a range of mantle-derived magmas. According to the study it was concluded that the oxygen isotopic composition of corundum is determined by the genetic type of the pegmatite.

Key words: *pegmatites, corundum, oxygen isotopes, Ilmeny mountains (Urals), Ry Iz massif (Urals), Tazheranskiy massif (Baikal).*