

УДК 550.42

Н.М. Кудряшов, С.Г. Скублов, А.В. Мокрушин, Л.М. Лялина

Минералогические и геохимические характеристики циркона в архейских габбро-анортозитах Кольского региона

N.M. Kudryashov, S.G. Skublov, A.V. Mokrushin, L.M. Lyalina

Mineralogical and geochemical characteristics of zircon from Archaean gabbro-anorthosites of the Kola region

Аннотация. Проведено минералого-геохимическое исследование циркона из габбро-анортозитов Цагинского массива неоархейского возраста (2659 ± 3 млн лет) и массива Северный мезоархейского возраста (2935 ± 8 млн лет). Изучение морфологии циркона, внутреннего строения в катодолуминесценции и отраженных электронах, а также содержания и распределения редкоземельных элементов позволило получить важную информацию об условиях роста циркона при формировании разновозрастных габбро-анортозитовых массивов. Циркон из обоих массивов обладает всеми признаками магматического происхождения с общими чертами распределения REE. Установлены различия в содержании ряда редких элементов (Th, U, Ti) в цирконе изученных массивов, что свидетельствует о разных условиях и составе кристаллизующей среды циркона. Расчетные температуры кристаллизации циркона в Цагинском массиве составили 673-714 °С, в Северном массиве – 730-813 °С.

Abstract. Mineralogical and geochemical research of zircon from the gabbro-anorthosites of Tsaginski (2659 ± 3 Ma) and Severny (2935 ± 8 Ma) intrusions has been conducted. Study of the zircon morphology, its internal structure in the cathodoluminescence and backscattered electron, as well as studying the content and distribution of rare earth elements provided important information on the conditions of the zircon growth. Zircon from both intrusions has all the features of magmatic origin with similar REE patterns. The differences in the content of trace elements (Th, U, Ti) in zircons of the studied intrusions have been established, indicating the different conditions of zircon crystallization. Calculated zircon crystallization temperature in the Tsaginski intrusion is in the range of 673-714 °C, in the Severny intrusion – 730-813 °C.

Ключевые слова: архей, габбро-анортозит, циркон, геохимия, минералогия, Кольский регион
Key words: Archaean, gabbro-anorthosite, zircon, geochemistry, mineralogy, the Kola region

1. Введение

Кольская габбро-анортозитовая провинция объединяет десятки крупных и небольших массивов разного возраста, формирование которых происходило на протяжении длительного (~ 1 млрд лет) времени, от мезоархея до среднего протерозоя. Их размещение связано с разновременными тектоническими структурами Кольского региона. Неоархейский этап габбро-анортозитового магматизма проявлен, главным образом, в обрамлении Кейвского составного террейна и представлен большой группой массивов, объединенных в единый Кейвско-Колмозерский комплекс (Шарков, 1984). В состав этого комплекса были включены Цагинский, Медвежье-Щучьеозерский, Ачинский, Пачинский, Патчемварекский, Северный, а также массивы Северо-Кейвской группы. U-Pb изотопно-геохронологическое датирование циркона и бадделеита из габбро-норитов и анортозитов Цагинского, Ачинского и Медвежье-Щучьеозерского массивов установило возрасты, укладывающиеся в диапазон 2.68-2.66 млрд лет (Баянова, 2004). Позднее для Патчемварекского и Северного массивов, расположенных на сочленении Кейвского террейна с зеленокаменным поясом Колмозеро-Воронья и Мурманским доменом, по циркону были получены значения возраста 2.93-2.92 млрд лет (Кудряшов, Мокрушин, 2011). Эти значения отвечают более раннему, мезоархейскому, этапу анортозитового магматизма. Проведенные ранее изотопно-геохронологические и петрологические исследования позволили установить составы первоначальной магмы архейского анортозитового магматизма разного возраста и геодинамические обстановки их образования (Кудряшов, Мокрушин, 2011). Настоящая работа посвящена результатам изучения минералого-геохимических характеристик циркона из Цагинского массива неархейского возраста и массива Северный мезоархейского возраста с целью получения информации о генезисе и термодинамических условиях его кристаллизации.

2. Методики минералогических и геохимических исследований

Исследования циркона в режиме катодлюминесценции проведены на растровом электронном микроскопе "LEO1450", оснащенный приставкой "PANA CL". Рабочее расстояние – 13 мм, величина тока зонда – 75-300 пА, ускоряющее напряжение – 20 кВ. Визуализация осуществлялась с помощью фотоумножителя "GATAN" с диапазоном области спектра 400-700 нм. Окончательное катодлюминесцентное изображение циркона фиксировалось в цифровом виде.

Содержание редкоземельных (REE) и редких элементов в цирконах определялось на ионном микрозонде Cameca IMS-4f (ЯФ ФТИАН, аналитики С.Г. Симакин, Е.В. Потапов) по методикам, приведенным в (Hinton, Upton, 1991; Федотова и др., 2008). Размер исследуемого участка минерала не превышал в диаметре 15-20 мкм; относительная ошибка измерения для большинства элементов составляла 10-15 %; порог обнаружения элементов в среднем равен 10 ppb. При построении спектров распределения REE составы цирконов нормировались на состав хондрита C1 (McDonough, Sun, 1995). Оценка температуры кристаллизации циркона выполнена с помощью сольвусного Ti-в-цирконе термометра (Watson et al., 2006).

3. Результаты минералогических исследований

Акцессорный циркон, выделенный из габбро-анортозитов Цагинского массива, представлен прозрачными коричневыми зернами призматического габитуса с четкими ребрами (рис. 1). В огранке доминирует цирконовая призма {110}, из дипирамид развита {111}. Гиацинтовая призма {100} развита не всегда, если присутствует, то в виде узких граней. Трещиноватость крайне слабая, кристаллы практически без трещин. Внутрифазовая неоднородность представлена в виде тонкоритмичной (первые мкм) зональности, повторяющей контуры кристаллов. Фазовая неоднородность (включения) не выявлена.

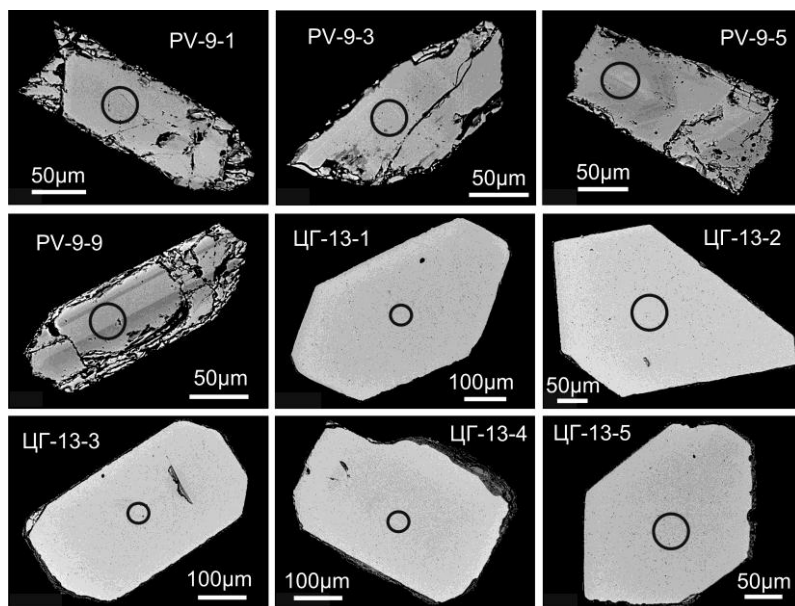


Рис. 1. Внутреннее строение циркона в отраженных электронах из габбро-анортозитов Северного (PV-9) и Цагинского массивов (ЦГ-13). Кружками отмечены места анализирования на ионном микрозонде

Акцессорный циркон, выделенный из габбро-анортозитов массива Северный, присутствует в виде непрозрачных призматических зерен розоватой и желтоватой окраски с хорошо сохранившимися ребрами (рис. 1). Кристаллы призматического (до длиннопризматического) габитуса, образованные гранями цирконовой призмы {110} с подчиненным развитием дипирамид {111} и {311}. Степень трещиноватости варьирует от слабой до сильной. В отдельных кристаллах наблюдаются две зоны: внутренняя, практически свободная от трещин, и внешняя – сильно трещиноватая. Внутрифазовая неоднородность представлена ритмичной зональностью. Мощность отдельных зон варьирует от 1 мкм до 50 мкм. Контуры зон указывают на смену габитусных форм кристаллов при кристаллизации циркона. Фазовая неоднородность представлена единичными включениями других минеральных фаз.

4. Результаты геохимических исследований

Цирконы из анортозитов Цагинского массива достаточно однородны, поэтому были проанализированы центральные части зерен. Спектры распределения REE в них практически сливаются в одну линию на рис. 2а и демонстрируют четко выраженную дифференциацию от легких к тяжелым REE (Lu_N/La_N отношение составляет в среднем 27 400, см. табл.), значительную по величине положительную Ce-аномалию (Ce/Ce^* в среднем около 100) и отрицательную Eu-аномалию (Eu/Eu^* в среднем 0.03). Общий уровень содержания REE можно охарактеризовать как высокий (суммарное содержание REE в среднем превышает 2000 ppm) со значительным преобладанием тяжелых REE над легкими REE (табл.). По характеру распределения REE цирконы из анортозитов Цагинского массива соответствуют типичным цирконам магматического генезиса (*Hoskin, Schaltegger, 2003*). Содержание ряда других редких элементов также достаточно выдержано – содержание U в среднем составляет около 1 200 ppm, Th – около 600 ppm, Th/U отношение варьирует от 0.39 до 0.66, в среднем – 0.51, что также указывает на магматическую природу изученных цирконов. Для них характерно повышенное, по сравнению с цирконами из других типов пород (*Belousova et al., 2002*), содержание Y (в среднем около 3500 ppm), Nb и Li (около 40 ppm), Hf (около 9 200 ppm). Содержание P также значительно по сравнению с цирконами из основных пород и составляет в среднем около 400 ppm (табл.). Содержание Ca и Ti, неформальных для циркона элементов, невелико – в среднем 14 и 6 ppm соответственно, что косвенно указывает на высокую степень кристалличности циркона и отсутствие наложенных гидротермально-метасоматических изменений (*Скублов и др., 2009*). Оценку температуры кристаллизации циркона по Ti-в-цирконе термометру (*Watson et al., 2006*), находящуюся в диапазоне 673-714 °C, можно принимать как нижнюю температурную границу их образования.

Таблица. Содержание редкоземельных и редких элементов (ppm) в цирконе

Точка анализа	ЦГ-13-1	ЦГ-13-2	ЦГ-13-3	ЦГ-13-4	ЦГ-13-5	PV-9-1	PV-9-3	PV-9-5	PV-9-9
	Цагинский массив					Северный массив			
La	0.04	0.08	0.06	0.07	0.06	0.16	0.09	0.20	0.09
Ce	53.3	67.3	84.0	46.6	64.7	15.9	27.9	9.66	3.20
Pr	0.37	0.40	0.50	0.61	0.27	0.17	0.13	0.17	0.10
Nd	6.06	6.86	7.72	11.9	5.21	2.67	2.69	2.96	2.07
Sm	15.0	12.2	14.5	19.0	10.6	8.21	10.5	8.62	6.74
Eu	0.49	0.20	0.23	0.29	0.19	0.31	0.06	0.36	0.45
Gd	85.3	61.6	69.9	89.6	58.7	68.9	103	69.9	52.3
Dy	380	240	279	324	247	371	572	370	225
Er	825	511	564	634	528	852	1 193	855	394
Yb	1 434	861	928	1 007	905	1 511	1 632	1 508	608
Lu	218	133	146	160	143	234	230	243	85.8
Li	49.7	37.5	45.3	15.9	61.5	23.7	151	16.1	10.1
P	382	436	442	305	474	692	1 548	491	154
Ca	11.0	11.7	23.8	13.6	10.2	9.91	57.5	11.4	21.8
Ti	4.25	7.16	6.90	5.26	6.52	20.9	8.62	18.2	4.58
Sr	2.14	1.62	1.77	2.03	1.76	1.80	2.11	1.87	0.89
Y	4 716	2 932	3 258	3 794	3 028	4 826	7 636	4 851	2 438
Nb	50.7	36.7	47.4	27.0	45.1	43.5	37.8	48.2	47.9
Ba	1.87	2.72	1.74	2.09	1.12	2.50	1.80	1.74	1.17
Hf	10 109	8 969	8 402	8 882	9 547	8 682	9 664	7 639	6 795
Th	613	510	779	447	686	174	1350	119	160
U	1 581	1 004	1 174	885	1 443	303	3 155	224	130
Th/U	0.39	0.51	0.66	0.51	0.48	0.58	0.43	0.53	1.22
Eu/Eu*	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.01	0.04	0.07
Ce/Ce*	106	94.3	114	55.2	121	23.2	61.8	12.6	7.86
ΣREE	3 018	1 893	2 094	2 294	1 963	3 065	3 770	3 068	1 378
ΣLREE	59.7	74.6	92.3	59.2	70.3	18.9	30.8	13.0	5.47
ΣHREE	2 943	1 806	1 987	2 215	1 882	3 037	3 729	3 046	1 365
Lu_N/La_N	53 081	17 060	22 050	22 603	22 319	14 060	23 847	11 417	8 764
Lu_N/Gd_N	20.7	17.5	16.9	14.4	19.7	27.5	18.1	28.1	13.3
Sm_N/La_N	607	260	365	448	274	81.8	181	67.4	114
T(Ti), °C	673	714	711	689	707	813	730	799	678

Цирконы из анортозитов Северного массива также демонстрируют черты распределения редких и редкоземельных элементов, характерные для магматических цирконов, – дифференцированный характер спектра REE, наличие четко выраженных Ce- и Eu-аномалии (рис. 2б). Однако они отличаются от цирконов из анортозитов Цагинского массива меньшей степенью дифференцированности REE (Lu_N/La_N отношение составляет в среднем 14 500, табл.) при более высоком общем уровне содержания REE (в среднем около 2 800 ppm). Спектры распределения REE демонстрируют меньшую воспроизводимость для индивидуальных анализов, тем не менее сохраняется магматический характер каждого спектра (рис. 1б). Цирконы из анортозитов Северного массива отличает от цирконов из Цагинского массива значительно меньшее содержание Th и U (три анализа, за исключением PV-9-3), при этом Th/U отношение составляет в среднем 0.78. Анализ циркона PV-9-3 отличается от других цирконов из Северного массива не только повышенным содержанием Th и U (1 350 и 3 155 ppm соответственно), но и повышенным содержанием других неформульных редких элементов – Nb, P, Ca, Y, Li, что можно объяснить частичной метамиктизацией структуры цирконы, благоприятствующей изоморфному вхождению этих элементов. Содержание Ti в цирконах из Северного массива варьирует от 4 до 21 ppm (в среднем 13 ppm, табл.), при этом расчетная температура кристаллизации циркона несколько выше, чем в цирконах из Цагинского массива и находится в диапазоне 730-813 °С.

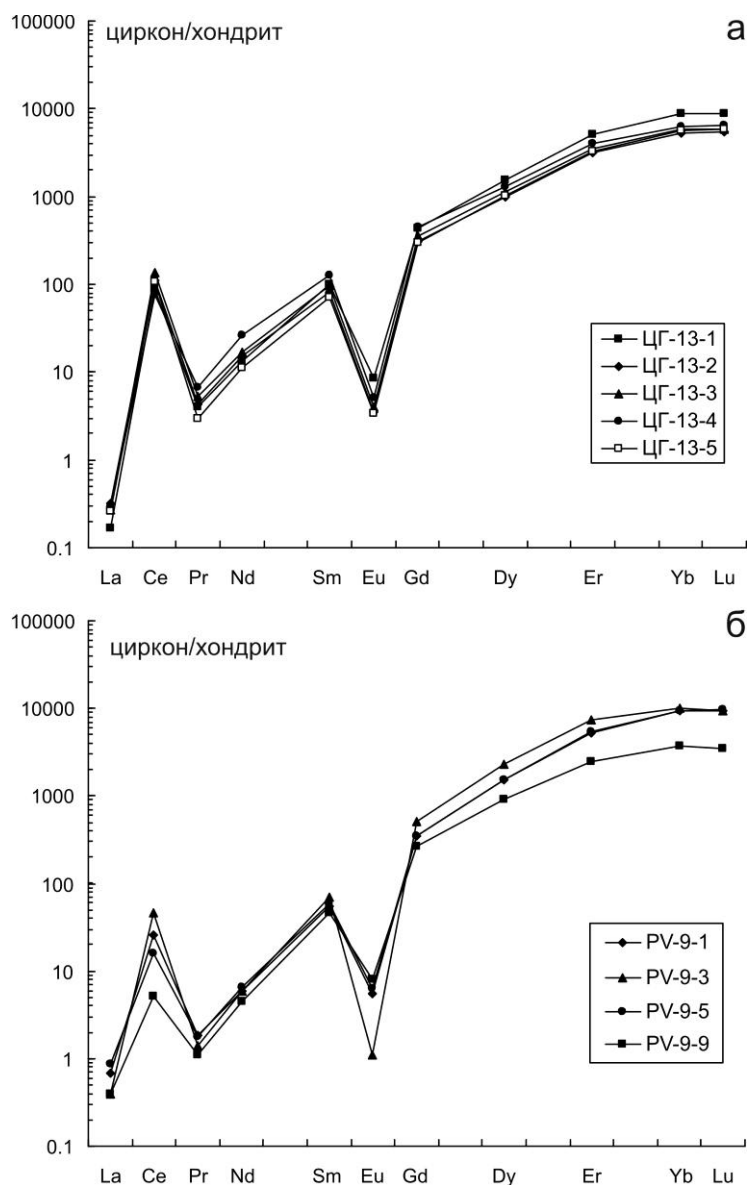


Рис. 2. Спектры распределения РЗЭ в цирконе из габбро-анортозитов Северного (PV-9) и Цагинского массивов (ЦГ-13)

5. Заключение

Изучение минералогических и геохимических характеристик циркона из Цагинского и Северного массивов выявило в них общие черты распределения REE, обусловленные единым, магматическим генезисом циркона. Кроме этого установлены достоверные различия в содержании ряда редких элементов (Th, U, Ti) в цирконе изученных массивов, что свидетельствует о разном составе и условиях кристаллизующей среды. Расчетные температуры кристаллизации циркона в Цагинском массиве составили 673-714 °С, они заметно ниже, чем в Северном массиве – 730-813 °С.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 5.2115.2014/К на 2014-2016 гг.

Литература

- 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. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 143, p. 602-622, 2002.
- Hinton R.W., Upton B.G.J.** The chemistry of zircon: Variations within and between large crystals from syenite and alkali basalt xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 55, p. 3287-3302, 1991.
- Hoskin P.W.O., Schaltegger U.** The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Rev. Mineral. Geochem.*, v. 53, p. 27-62, 2003.
- McDonough W.F., Sun S.S.** The composition of the Earth. *Chemical Geology*, v. 120, p. 223-253, 1995.
- Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B.** Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contributions to mineralogy and petrology*, v. 151, p. 413-433, 2006.
- Баянова Т.Б.** Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. *СПб., Наука*, 176 с., 2004.
- Кудряшов Н.М., Мокрушин А.В.** Мезоархейский габбро-анортозитовый магматизм Кольского региона: петрохимические, геохронологические и изотопно-геохимические данные. *Петрология*, т. 19, № 2, с. 173-189, 2011.
- Скублов С.Г., Лобач-Жученко С.Б., Гусева Н.С., Гембицкая И.М., Толмачева Е.В.** Распределение редкоземельных и редких элементов в цирконах из миаскитовых лампроитов Панозерского комплекса Центральной Карелии. *Геохимия*, № 9, с. 958-971, 2009.
- Федотова А.А., Бибикина Е.В., Симакин С.Г.** Геохимия циркона (данные ионного микрозонда) как индикатор генезиса минерала при геохронологических исследованиях. *Геохимия*, № 9, с. 980-997, 2008.
- Шарков Е.В.** Анортозитовые ассоциации Кольского полуострова. Анортозиты Земли и Луны. *М., Наука*, с. 5-61, 1984.

References

- 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. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 143, p. 602-622, 2002.
- Hinton R.W., Upton B.G.J.** The chemistry of zircon: Variations within and between large crystals from syenite and alkali basalt xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 55, p. 3287-3302, 1991.
- Hoskin P.W.O., Schaltegger U.** The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Rev. Mineral. Geochem.*, v. 53, p. 27-62, 2003.
- McDonough W.F., Sun S.S.** The composition of the Earth. *Chemical Geology*, v. 120, p. 223-253, 1995.
- Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B.** Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contributions to mineralogy and petrology*, v. 151, p. 413-433, 2006.
- Bayanova T.B.** Vozrast repernykh geologicheskikh kompleksov Kolskogo regiona i dlitelnost protsessov magmatizma [Age of the main geological complexes of the Kola region and duration of magmatic processes]. *SPb., Nauka*, 176 p., 2004.
- Kudryashov N.M., Mokrushin A.V.** Mezoarheyskiy gabbro-anortozitoviy magmatizm Kolskogo regiona: petrohimicheskie, geohronologicheskie i izotopno-geohimicheskie dannyye [Mesoarchaeoan gabbroanorthosite magmatism of the Kola region: Petrochemical, geochronological, and isotope-geochemical data]. *Petrologiya*, t. 19, N 2, p. 173-189, 2011.
- Skublov S.G., Lobach-Zhuchenko S.B., Guseva N.S., Gembitskaya I.M., Tolmacheva E.V.** Raspredelenie redkozemelnykh i redkikh elementov v tsirkonah iz miaskitovykh lamproitov Panozerskogo kompleksa Tsentralnoy Karelii [Rare earth and trace element distribution in zircons from miaskite lamproites of the Panozero Complex, Central Karelia]. *Geohimiya*, N 9, p. 958-971, 2009.

Fedotova A.A., Bibikova E.V., Simakin S.G. Geohimiya tsirkona (dannye ionnogo mikrosonda) kak indikator genezisa minerala pri geohronologicheskikh issledovaniyah [Ion-microprobe zircon geochemistry as an indicator of mineral genesis during geochronological studies]. Geohimiya, N 9, p. 980-997, 2008.

Sharkov E.V. Anortozitovyye assotsiatsii Kolskogo poluostrova [Anorthosite associations of the Kola Peninsula]. Anortozityi Zemli i Lunyi. M., Nauka, p. 5-61, 1984.

Информация об авторах

Кудряшов Николай Михайлович – Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-мин. наук, науч. сотрудник, e-mail: nik@geoksc.apatity.ru

Kudryashov N.M. – Geological Institute KSC RAS, Cand. of Geol. & Miner. Sci., Researcher, e-mail: nik@geoksc.apatity.ru

Скублов Сергей Геннадьевич – Институт геологии и геохронологии докембрия РАН; Национальный минерально-сырьевой университет "Горный", д-р геол.-мин. наук, профессор, e-mail: skublov@yandex.ru

Skublov S.G. – Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS; National Mineral Resources University (University of Mines), Dr of Geol. & Miner. Sci., Professor, e-mail: skublov@yandex.ru

Мокрушин Артем Васильевич – Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-мин. наук, уч. секретарь, e-mail: mokrushin@geoksc.apatity.ru

Mokrushin A.V. – Geological Institute KSC RAS, Cand. of Geol. & Miner. Sci., Scientific Secretary, e-mail: mokrushin@geoksc.apatity.ru

Лялина Людмила Михайловна – Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-мин. наук, науч. сотрудник, e-mail: lilyalina@geoksc.apatity.ru

Lyalina L.M. – Geological Institute KSC RAS, Cand. of Geol. & Miner. Sci., Researcher, e-mail: lilyalina@geoksc.apatity.ru