

Федеральное агентство научных организаций

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ ИМ. А.П. ВИНОГРАДОВА СИБИРСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 550.42:546.027

№ госрегистрации 01201351656



« 12 » 01 2016 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

Геохимическая эволюция, рудоносность и глубинные источники К-щелочных
лампроит-карбонатитовых комплексов щитов и складчатых зон.

№ 0350-2014-0008

(промежуточный)

Научный руководитель темы

д.г.-м.н. Н.В. Владыкин

подпись, дата

11.01.2016

Иркутск 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель темы, д-р
геолого-минералогических наук




подпись, дата
11.01.2016

Н.В. Владыкин
(написание отчета,
полевые работы)

Ответственные исполнители те-
мы:

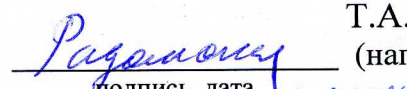
кандидат геолого-
минералогических наук



подпись, дата
11.01.2016

Н.В. Алымова
(написание раздела 2)


кандидат геолого-
минералогических наук



подпись, дата
11.01.2016

Т.А.Радомская
(написание раздела 1)

кандидат геолого-
минералогических наук



подпись, дата
11.01.2016

И.А.Сотникова
(написание раздела 3,
обработка аналитики,
построение графиков)

Ведущий инженер



подпись, дата
11.01.2016

А.Ю.Митрофанова
(аналитические работы)

Реферат

Отчет включает 23 стр., 9 илл., 3 табл., 7 ист.

Ключевые слова: мантийная природа источников, щелочные породы, глубинные магмы, лампроиты, геохимия изотопов, карбонатиты, щелочные граниты.

Целью исследований является получение вещественных характеристик (возрастных, геохимических, изотопных, минералогических) для эталонных щелочных комплексов, проявившихся в различных геодинамических обстановках и сопряженных с мантийными плюмами, обоснование связи с ними разнотипного орудинения, разработка моделей магмо- и рудообразования, выявление общих закономерностей в формировании и эволюции соответствующих рудно-магматических систем.

Получены надежные датировки докембрийского возраста (Pb-U метод) по цирконам для гранитов и руды Катугинского массива 2066 – 2055 млн лет р-н Центрального БАМа. Получены новые характеристики редких элементов (АСР-MS метод) в гранитах и рудах этого месторождения. Проведены термобарогеохимические исследования гранитов и руд по расплавленным включениям и получены температуры их образования, равные 800 °С, что говорит о их магматическом генезисе. Этот вывод кардинально меняет метод поисков подобных месторождений. Впервые проведены детальные минералогические исследования высокофтористых флюидных криолитовых пород месторождения. Выявлены десятки редких и акцессорных минералов этих пород. Определены минералы-концентраторы руд, знание которых необходимо при разработке методов обогащения руд.

Детально изучен второй редкометалльный массив щелочных гранитов Зашихинский с одноименным месторождением. Выделено три фациальных разновидностей редкометалльных гранитов. Впервые получены надежные редкометалльные характеристики руды (АСР-MS методом). Диагностированы и проанализированы на микрозонде минералы-концентраторы редких элементов. Главными концентраторами Zr является циркон, Nb, Та колумбит-танталит и стрюверит, TR и Y ксенотим и иттрофлюорит.

Содержание

Введение	5
Раздел 1. Возрастные датировки, минералогия, геохимическая специфика и рудоносность редкометалльных щелочных гранитов Катугинского комплекса Центрального БАМа	6
Раздел 2. Геохимическая специфика, минералогия и рудоносность редкометалльных щелочных гранитов Зашихинского комплекса Восточного Саяна	15
Раздел 3. Сопоставление разновозрастных редкометалльных щелочных комплексов складчатых зон Центральной Азии	19
Основные результаты проведённого исследования	21
Список публикаций по теме	22
Список использованных источников	23

Введение

Щелочные породы – уникальные образования Земли. Со щелочными-карбонатитовыми комплексами связаны крупнейшие месторождения Nb, Ta, Zr, Y, TR, Cu, P, Al, Pt и других рудных элементов, а также и уникальные месторождения самоцветов: чароита, Cr-диопсида, дианита. В лампроитах Австралии добываются алмазы. Сложность процессов их образования вызывали многолетние научные споры, которые не утихают до сих пор. Развитие новых методов исследований позволяют углубить знания об особенностях вещественного состава щелочных пород. За последние 5 лет только в Хибинском и Ловозерском массивах открыто 50 новых минералов. Данные изотопно-геохимических исследований подтверждают мантийную природу источников вещества для пород щелочных-карбонатитовых комплексов. Новый этап развития геологической науки – гипотеза «плюмовой тектоники» – усилил интерес ученых к щелочным породам. По особенностям происхождения щелочных пород можно расшифровывать глубинную геодинамику Земли. Если плутонические комплексы во многих провинциях изучены детально, то вулканические комплексы подобного состава исследованы недостаточно. С обнаружением извергающихся карбонатитовых лав вулкана Олдонии Ленгай в Африке начался новый этап изучения вулканических щелочных пород и их генетической интерпретации. Карбонатитовые лавы и туфы обнаружены даже в хорошо изученных вулканах Италии.

Важными представителями редкометалльных щелочных комплексов являются щелочные граниты. С ними связаны крупные месторождения стратегического сырья – Ta, Nb, Zr, Hf, TR, Y. Раньше эти комплексы генетически относили к метасоматическим апогранитам. Развитие метода термобарогеохимии привело к обнаружению в них расплавных включений, что однозначно переводит их в разряд магматических образований и полным изменением методов поисков подобных месторождений. Подобными объектами являются изучаемые нами редкометалльные месторождения Центрального БАМа (Катугинский комплекс) и Восточного Саяна (Зашихинский комплекс), о которых и будет идти речь в данном отчете.

Раздел 1 Возрастные датировки, геохимическая специфика и рудоносность щелочных массивов складчатой зоны Центрального БАМа

Катугинский массив – уникальное явление природы с суперкрупным месторождением стратегических металлов – **Zr, Nb, Ta, Y, TR**. Массив расположен в юго-восточной части Чара-Олекминского геоблока Алданского щита. На поверхности обнажены два выхода массива в 3 и 18 км². Массивы сложены арфведсонитовыми и эгириновыми щелочными гранитами. В восточном массиве имеется тело, сложенное минералами криолитовой группы с редкометалльным минералом – гагаринитом. Рудоносными являются некоторые разновидности самих щелочных гранитов, обогащенные цирконом, пирохлором и гагаринитом. Разведывалось месторождение на редкие элементы в 80 годах прошлого века. В связи с секретностью месторождение было закрыто для изучения специалистам по щелочным породам. Существовало мнение о метасоматическом генезисе редкометалльных руд (Архангельская). По возрасту массив относился к докембрийским образованиям, но надежных датировок возраста не было.

Нами выполнены геохронологические U–Pb-исследования циркона из рудного обособления в щелочных гранитах (Котов, Владыкин и др., 2015). Полученная для него оценка возраста 2055 ± 7 млн лет (рис.1) в пределах ошибки совпадает с оценкой возраста кристаллизации щелочных гранитов Катугинского комплекса 2066 ± 6 млн лет (U–Pb-метод по циркону). Это позволяет сделать вывод, что формирование Катугинского редкометалльного месторождения генетически связано с процессами кристаллизации расплавов, родоначальных для щелочных гранитов Катугинского комплекса.

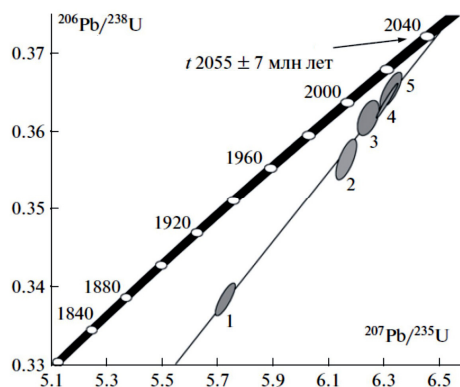


Рисунок 1. Диаграмма с конкордией для циркона из рудного обособления (обр. КТГ-241) в эгирин – амфиболовом щелочном граните катугинского комплекса.

При геолого-петрографическом изучении циркониевых и ниобий-танталовых гранитных руд Катугинского массива обнаружен процесс отсадки циркона и пирохлора из щелочногранитной магмы, приводящий к рудным концентрациям (рис.2). При термобарогеохимических исследованиях цирконов в них обнаружены расплавные включения с температурой кристаллизации, равной 800 °С. Все это свидетельствует о магматическом происхождении руды (которая ранее считалась метасоматической) и кардинально меняет методы поисков.

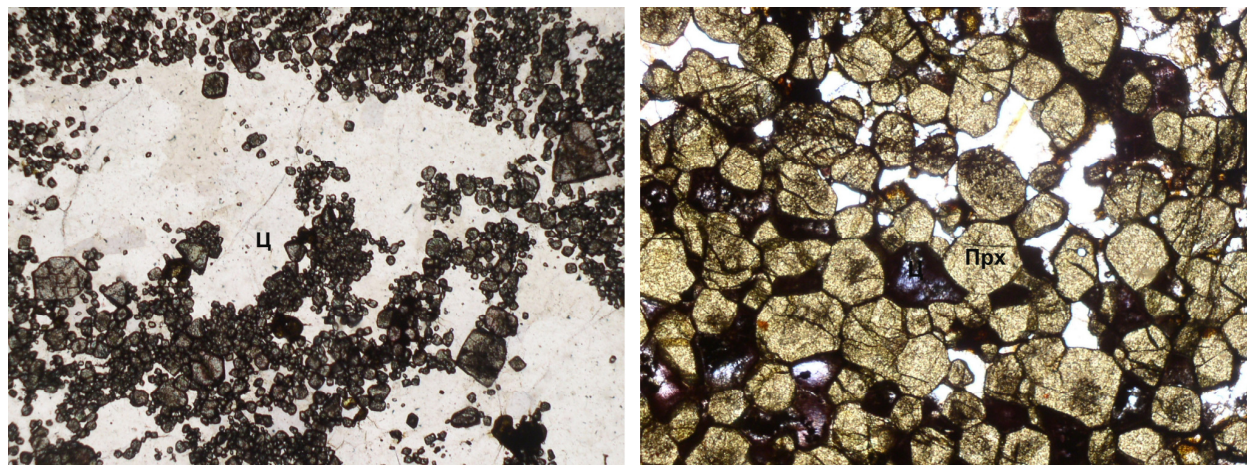


Рисунок 2. Отсадка на магматическом этапе циркона (ц) и пирохлора (Прх) в гранитах

Кроме редкометалльных щелочных гранитов в Катугинском массиве известно не менее уникальное тело, главные породообразующие минералы которого алюмофториды, среди которых присутствует и редкометалльный гагаринит. Минералогия этих пород была почти не изучена.

Получены новые данные по минералогии криолитсодержащих пород Катугинского массива. Были изучены породы с содержанием криолита от 30 до 70% от объема (табл.1). Фемическая составляющая этих пород представлена Fe-силикатами (Na-амфибол, слюда, бафертисит), оксидами (магнетит, ильменит, пирохлор, касситерит и др.) и сульфидами (сфалерит, пирит, халькопирит). Породы также содержат кварц, калишпат, Li-слюду и REE-фториды. В целом, фемические силикаты имеют крайне железистый состав (концентрации MgO – <1 мас.%) и являются высокофтористыми разновидностями, вариации состава незначительны.

Таблица 1. Минералы, выявленные в криолитовых породах, Катугинский массив.

Минерал	Формула	К-431-22	К-243	К-243а	К-244
Кварц	SiO ₂	+	+	+	+
Калишпат	KAlSi ₃ O ₈	+	+	+	+
Циркон	ZrSiO ₄	+			+
Торит	ThSiO ₄			+	
Фтораннит	KFe ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (F,OH) ₂	+	+	+	+
Лепидолит- Полилитионит	KLi _{1.5} Al _{1.5} Si ₄ O ₁₀ (F,OH) ₂ – KLi ₂ AlSi ₄ O ₁₀ (F,OH) ₂	+	+	+	+
Фторарфведсонит	(Na,K)Na ₂ Fe ²⁺ ₄ Fe ³⁺ Si ₈ O ₂₂ (F,OH) ₂	+	+	+	+
Бафертисит	Ba ₂ (Ti,Sn) ₂ (Fe,Mn) ₄ (Si ₂ O ₇) ₂ O ₂ (OH) ₂ (F,OH) ₂		+	+	
Пирохлор группа	(Ca,Na,REE,Y,Pb) ₂ Nb ₂ O ₆ (OH,F)	+			
Колумбит-(Fe)	(Fe,Mn)Nb ₂ O ₆	+	+	+	
Ферберит	(Fe,Mn)WO ₄	+		+	
Ильменит	(Fe,Mn)TiO ₃	+	+	+	+
Магнетит	FeFe ₂ O ₄		+	+	
Рутил	TiO ₂	+	+		
Касситерит	SnO ₂			+	
Церианит-(Ce)	(Ce,Th)O ₂		+		
Гётит	(Fe,Mn)O(OH)		+	+	
Сидерит	(Fe,Mn)CO ₃		+		
Родохрозит	(Mn,Fe)CO ₃		+	+	
Кальцит	CaCO ₃			+	
Барит	(Ba,Sr)SO ₄		+		
Сфалерит	ZnS		+	+	+
Пирит	FeS ₂		+		+
Халькопирит	CuFeS ₂		+		+
Флюорит	(Ca,Y)F ₂	+	+		
Криолит	Na ₃ AlF ₆	+	+	+	+
Эльпасолит	K ₂ NaAlF ₆	+		+	
Симмонсит	Na ₂ LiAlF ₆	+		+	
Твейтит-(Y)	Ca _{1-x} Y _x F _{2+x} , x≈0.3	+		+	+
«Ba-Sr-Твейтит- (Y)»	(Ba,Sr,Ca) _{1-x} Y _x F _{2+x} , x≈0.3	+			+
Гагаринит-(Y)	NaCaYF ₆				+
Флюоцерит-(Ce)	(Ce,La,Nd)F ₃				+

(По петрографическим данным и результатам исследования на сканирующем микроскопе)

Изучение состава Na-амфибола на микрозонде показало, что он представлен фторарфведсонитом $(\text{Na,K})\text{Na}_2\text{Fe}^{2+}_4\text{Fe}^{3+}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{F,OH})_2$, что является новым минералом, который пока не зарегистрирован в ММА (F - >1 ф.е., К - <0.5 ф.е., Таблица 2). Темноцветная слюда по составу относится к фтористому анниту – фторанниту (табл. 2). Для всех изученных пород характерно постоянное присутствие Li-слюды (лепидолит-полилитионит), которая обычно располагается на контакте силикатов и/или кварца с криолитом. Изученная Li-слюда зональна, и от центра к краю возрастают концентрации железа (до 7.5 мас.% FeO_T); оцененные концентрации Li_2O составляют 3.6-5.9 мас.%, содержания воды – <0.7 мас.% (Таблица 2).

Таблица 2. Химический состав (микрозонд, мас.%) некоторых силикатов из криолитовой породы (образец К-243), Катугинский массив.

Минерал	Лепидолит-Полилитионит							Фтораннит			Фторарфведсонит	
	ц	к	с	к						ц	к	
SiO ₂	59.98	59.76	57.20	56.57	57.77	55.81	58.52	38.74	38.61	38.14	49.58	49.88
TiO ₂	0.09	0.04	0.01	0.04	0.04	0.04	0.06	2.69	2.62	2.33	0.43	0.20
Al ₂ O ₃	14.13	14.37	15.60	15.78	15.67	16.58	15.54	8.75	8.76	8.87	1.93	2.08
Fe ₂ O ₃											7.38	7.45
FeO	3.31	3.46	3.95	5.30	5.00	7.34	3.31	35.84	35.46	35.87	27.57	28.00
MnO	0.04	0.09	0.14	0.18	0.07	0.12	0.04	0.72	0.95	0.90	0.71	0.66
ZnO	0.06	0.01	0.01	0.04	0.08	0.08	0.01	0.16	0.22	0.26	0.36	0.23
MgO	0.11	0.07	0.10	0.18	0.16	0.17	0.13	0.62	0.66	0.51	0.39	0.28
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01
BaO	0.08	0.05	0.00	0.04	0.00	0.02	0.05	0.08	0.26	0.14	0.00	0.00
SrO	0.00	0.00	0.05	0.11	0.00	0.06	0.04	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.10	0.20	0.04	0.05	0.05	0.06	0.09	0.04	0.05	0.00	8.71	8.48
K ₂ O	11.72	11.80	11.71	11.51	11.47	11.33	11.56	9.33	9.42	9.52	1.48	2.01
Rb ₂ O	0.13	0.16	0.22	0.19	0.16	0.16	0.19	0.17	0.16	0.17	0.00	0.00
Li ₂ O	5.01	4.55	5.88	5.15	4.68	3.67	5.66	0.76	0.76	0.70		
F	9.04	9.38	8.82	8.36	8.39	7.87	8.30	3.48	4.32	4.23	2.30	2.18
H ₂ O	0.23	0.05	0.32	0.50	0.51	0.69	0.60	1.56	1.16	1.21	0.81	0.87
Сумма	104.04	103.99	104.03	104.02	104.04	104.00	104.10	103.06	103.40	102.84	101.69	102.32
O-F ₂	3.81	3.95	3.71	3.52	3.53	3.31	3.49	1.47	1.82	1.78	0.97	0.92
Сумма	100.23	100.05	100.31	100.50	100.51	100.69	100.61	101.59	101.58	101.06	100.72	101.41

В двух образцах был обнаружен редкий слоистый титаносиликат – бафертисит $\text{Ba}_2\text{Ti}_2(\text{Fe,Mn})_4(\text{Si}_2\text{O}_7)_2\text{O}_2(\text{OH})_2(\text{F,OH})_2$, который характерен для поздних щелочногранитоидных пород. Бафертисит из Катугино имеет низкие концентрации хейтманитового минала (<15 мол.%) и содержит до 2.7 мас.% SnO_2 (рис.3, Таблица 3).

В изученных криолитовых породах REE-минерализация неравномерно распределена и имеет преимущественно фторидную специализацию: в одних она представлена ассоциацией флюорит + иттрофлюорит + твейтит (гомогенный или со структурами распада) + «Ba-Sr-твейтит» ± REE-пирохлор (Рис. 3), в других – ассоциацией гагаринит + твейтит + флюоцерит + «Ba-твейтит» (Рис. 4).

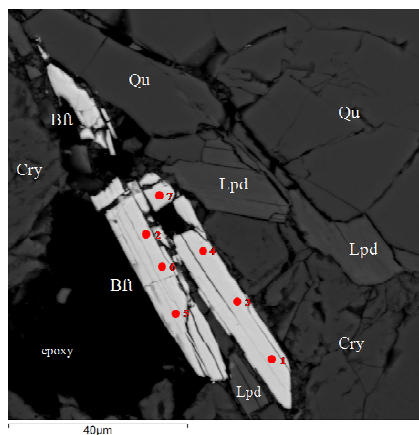


Рисунок 3. Кристаллы бафертисита в криолите, образец К-243, Катугино (BSE фото). Qu – кварц; Lpd - Li-слюда (лепидолит-полилитнионит); Cry – криолит; Bft – бафертисит. Точки составов смотри Таблицу 3.

Таблица 3. Химический состав (микрозонд, мас.%) бафертисита из криолитовой породы (образец К-243), Катугинский массив.

SiO ₂	23.26	23.59	23.43	23.22	23.13	23.10	23.56	23.57	23.32
TiO ₂	13.40	13.48	13.44	14.29	14.40	14.33	14.00	13.91	14.19
ZrO ₂	0.13	0.30	0.21	0.00	0.00	0.08	0.00	0.03	0.02
SnO ₂	2.45	2.72	2.59	1.46	1.49	1.49	1.65	1.61	1.54
Nb ₂ O ₅	0.98	0.55	0.76	0.51	0.27	0.29	0.44	0.35	0.37
Al ₂ O ₃	0.08	0.10	0.09	0.10	0.12	0.04	0.06	0.05	0.07
FeO	24.84	24.77	24.81	25.34	25.46	25.04	25.20	25.00	25.21
MnO	2.96	2.94	2.95	2.96	3.08	2.94	3.02	2.95	2.99
ZnO	0.06	0.06	0.06	0.17	0.08	0.08	0.05	0.04	0.08
MgO	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.04	0.04	0.03	0.02
CaO	0.07	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06
BaO	27.79	27.56	27.68	27.92	28.10	27.85	27.93	27.83	27.93
SrO	0.00	0.21	0.11	0.11	0.00	0.00	0.20	0.12	0.08
Na ₂ O	0.17	0.22	0.19	0.15	0.09	0.04	0.21	0.22	0.14
K ₂ O	0.30	0.24	0.27	0.21	0.21	0.19	0.23	0.22	0.21
Rb ₂ O	0.11	0.06	0.09	0.07	0.06	0.04	0.02	0.02	0.04
F	3.67	3.73	3.70	3.67	3.62	3.63	3.73	3.73	3.68
H ₂ O	1.76	1.79	1.77	1.76	1.77	1.75	1.77	1.77	1.77
Сумма	102.02	102.38	102.20	101.98	101.94	100.99	102.17	101.51	101.72
O-F ₂	1.55	1.57	1.56	1.55	1.52	1.53	1.57	1.57	1.55
Сумма	100.47	100.81	100.64	100.44	100.42	99.46	100.60	99.94	100.17

Следует отметить, что Ba-Sr-обогащенные «твейтиты» пока не описаны в литературе и, соответственно, являются потенциально новыми минеральными видами. Если Ba-Sr-обогащенные «твейтиты» образуют тонкие структуры срастания или распада собственно Ba- и Sr-фаз вокруг твейтита (рис. 4), то «Ba-твейтит» (Ba>>Sr>Ca) гомогенен по составу и располагается в виде индивидуальных

обособлений совместно с флюоцеритом на контакте между гагаринитом и твейтитом (рис. 4). Некоторые зерна собственно твейтита также неоднородны и представляют собой ориентированные структуры твердого распада.

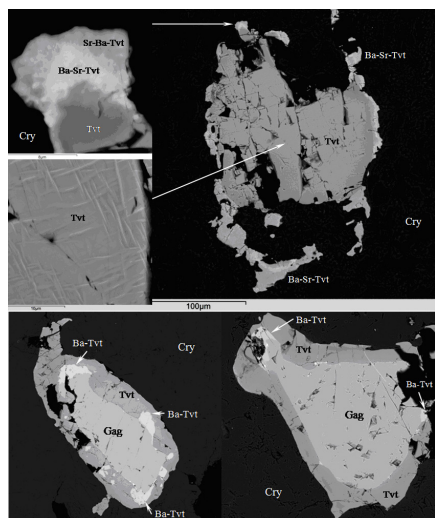


Рисунок 4. Обособления REE-фторидов в криолите, образец К-431-22, Катугино (BSE фото). Cry – криолит; Tvt – твейтит; Ba-Sr-Tvt – «Ba-Sr-твейтит», тонкие структуры срастания или распада.

В целом различия по химическому составу между двумя модификациями незначительны и выражаются в относительно более высоких концентрациях REE и низких содержаниях Ca в ламелях при одинаковых значениях Y и Na в обеих фазах. Более интересными по минералогии оказались кристаллические включения (индивидуальные фазы и их срастания) в двух порообразующих минералах (криолит, фторарфвед-сонит). Следует отметить, что кристаллические включения во фторарфведсоните встречаются значительно реже, чем в криолите. Включения в нем содержат следующие фазы: криолит, флюорит с Na, Y и Yb, Li-слюда, колумбит, REE-пирохлор, торит, сидерит, ильменит и фтораннит. Включения в криолите более разнообразны по набору минералов: ильменит, колумбит, пирит, ферберит, эльпасолит, симмонсит, магнетит, касситерит, бафертисит, Li-слюда, сидерит, родохрозит, рутил, барит. Эльпасолит K_2NaAlF_6 и симмонсит Na_2LiAlF_6 близки к идеальным составам и впервые обнаружены в породах Катугинского массива. Среди всех минералов, выявленных в криолите, только рутил характеризуется широкими вариациями состава по FeO_t , Nb_2O_5 и WO_3 : большинство зерен не содержат WO_3 и различны по FeO_t (1.2-5.5 мас.%) и Nb_2O_5 (0.0-1.4 мас.%), и лишь в некоторых зернах центр обогащен всеми тремя компонентами (WO_3 – 4.6-5.8; Nb_2O_5 – 1.2-1.5; FeO_t – 3.1-3.6 мас.%). Ранее рутилы с высокой концентрацией WO_3 (>2 мас.%, иногда в сочетании с высокими содержаниями Sb, Ta, V) были выявлены на некоторых рудных месторождениях.

Изучены особенности химического состава главных порообразующих минералов в этих породах, получены первые данные по включениям минералообразующих сред в силикатных и фторидных минералах и установлены особенности кристаллизации пород.

Изучение кристаллических включений в криолитовых породах Катугинского массива показало, что их образование происходило из высокофтористой минералообразующей среды, обогащенной также другими летучими компонентами (CO_2 , S, H_2O) и редкими элементами (Li, Nb, Th, W, Sn, REE, Y). Высокофтористая среда способствовала кристаллизации минералов, которые максимально концентрировали редкие элементы: Li – лепидолит-полилитионит, симмонсит; Nb – колумбит, пироклор; Th – торит; REE-Y – фториды; W – вольфрамит, W-рутил; Sn – касситерит; Ba – барит, бафертисит, «Ba- и Ba-Sr-твейтит», Sr - «Ba-Sr-твейтит».

Хромато-масс-спектрокопия трех монофракций криолита показали, что в одних пробах CO_2 преобладает при минимальных концентрациях H_2O (пробы К-243, К-431-22), а в одной пробе (К-243а) оказалось большое количество H_2O при низких содержаниях CO_2 .

Надежно определен полный спектр (методом ICP-MS) концентраций в Катугинских породах и рудах редких элементов, которые нанесены на спайдердиаграммы. Изучено распределения редких элементов (методом ACP-MS) (рис.5) в породах Катугинского массива. Для вмещающих не измененных пород – амфиболитов (зеленый цвет) и сиенит-порфиоров (желтый цвет) характерен почти хондритовый спектр TR без фракционирования Eu. Для всех остальных пород характерен Eu минимум. Щелочные редкометалльные граниты имеют почти одинаковый спектр TR с малым наклоном кривых спектра. Наивысшие концентрации TR характерны для пироклоровой залежи (черные треугольники) и флюид-гидротермальным породам с криолитом и гагаринитом (синие треугольники), а эти же породы без гагаринита имеют более низкие концентрации TR, чем граниты. В этих породах необычна горизонтальная линия спектра от La до Sm. Природу этого явления мы пока объяснить не можем. Приконтактовые фениты по гнейсам и сланцам имеют более низкие содержания TR, чем в гранитах, а линии спектра у них аналогичны гранитным, что говорит о том, что источником TR были сами граниты.

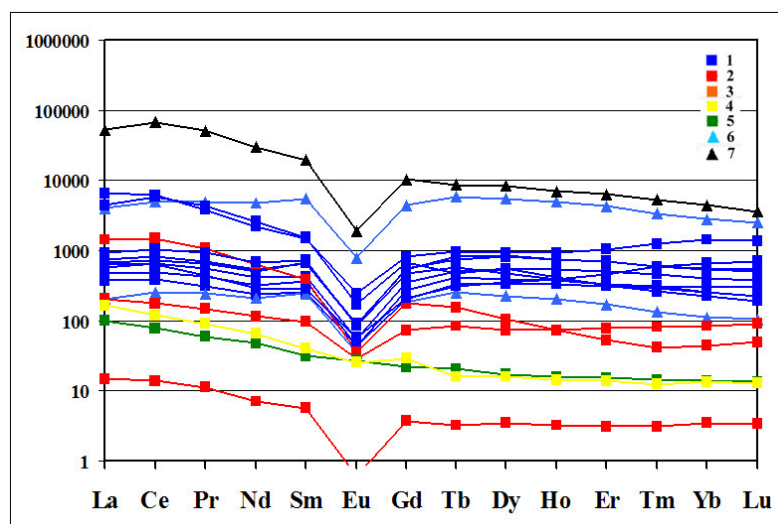


Рисунок 5. Спектры редкоземельных элементов пород Катугинского комплекса. Условные обозначения: 1 – редкометалльные граниты, 2 – приконтактные фениты по гнейсам и сланцам, 3 – то же, обогащенные флюоритом и торитом, 4 – сиенит-порфир вмещающих пород, 5 – амфиболит из вмещающих пород, 6 – криолитовые породы, 7 – пироклоровая залежь.

Поведение редких элементов продемонстрировано на спайдердиаграммах (рис.6). Конфигурации спектров редкометалльных гранитов и приконтактных метасоматитов (фенитов) отличаются довольно резко, что свидетельствует о их различном генезисе. Для последних характерны более низкие концентрации редких элементов с отрицательными и положительными аномалиями иттрия и различными вариациями урана, тория, ниобия, тантала и др. элементов. Для всех пород, кроме вмещающих метаморфических, характерны резкие минимумы для бария, стронция и европия, что характерно для редкометалльных щелочных гранитов. Положительные аномалии характерны для циркония, гафния, урана, тория, лантана и церия. Распределения остальных редкоземельных элементов хондритовое- почти горизонтальные линии. В криолитовых породах наблюдается полное повторение конфигураций спектров редких элементов, как в редкометалльных гранитах, при более высоком и более низком их содержании. Наивысшие концентрации этих элементов наблюдаются в пироклоровой залежи, но так же с полным повторением конфигураций спектра. Все это свидетельствует о едином генетическом процессе образования (магматическом) для щелочных гранитов, криолитовых и пироклоровых пород.

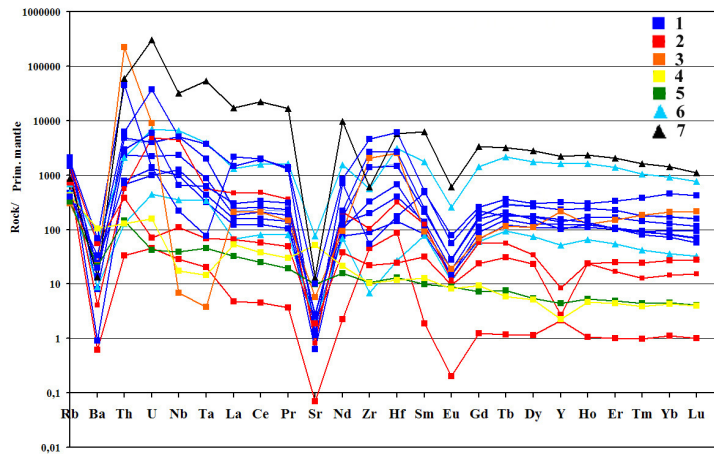


Рисунок 6 Спайдердиаграмма пород Катугинского массива.

Условные обозначения: 1 – редкометальные граниты, 2 – приконтактные фениты по гнейсам и сланцам, 3 – то же, обогащенные флюоритом и торитом, 4 – сиенит-порфир вмещающих пород, 5 – амфиболит из вмещающих пород, 6 – криолитовые породы, 7 – пироклоровая залеж.

Для амфиболита и сиенит порфира из вмещающих пород характерен совершенно другой спектр всех элементов, что подтверждает отсутствие зависимости редкометальности гранитов от химизма вмещающих пород. то есть отсутствие метасоматоза. Определены мантийно-коровые источники первичной магмы (Ларин и др., 2015)

Раздел 2 Геохимическая специфика, минералогия и рудоносность редкометалльных щелочных гранитов Зашихинского комплекса, Восточного Саяна

Другим объектом исследований был щелочногранитный Зашихинский массив с редкометалльным месторождением. Зашихинское редкометалльное месторождение находится в Нижнеудинском районе Иркутской области в хребтах Восточного Саяна и представлено щелочными гранитами, залегающими в апикальной части позднепалеозойского (252 млн лет, уран-свинцовый метод) гипабиссального Хайламинского массива (Архангельская, 1997, 2012). При изучении пород в пределах Зашихинского массива по минерально-петрографическому составу и содержанию полезных компонентов нами были выделены 3 зоны, сложенные различными фациальными разновидностями гранитов, закономерно и постепенно сменяющими друг друга по мере продвижения от наиболее глубоко эродированного юго-восточного контакта к северо-восточному. Наиболее ранняя – амфиболсодержащие кварц-микроклин-альбитовые агапитовые щелочные граниты, следующая фация – лейкократовые кварц-альбит-микроклиновые редкометалльные граниты и третья фация – лейкократовые кварц-альбитовые граниты, переходящие в альбититы. Эти альбититы секутся жилой альбит-флюоритовых пород с цирконом, ксенотимом и торитом.

Редкометалльные граниты Зашихинского массива характеризуются широким диапазоном вариаций химического состава: SiO_2 (67-85 мас.%), Al_2O_3 (13-17,6 мас.%), $\text{FeO}_{\text{общ}}$ (1,76-3,41 мас. %), MnO (0,04-0,2 мас.%), MgO (0,05-0,8 мас.%), CaO (0,09-2,53 мас. %), Na_2O (5,36-11 мас.%), K_2O (0,42-4,48 мас.%), повышенной щелочностью ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ до 12,68 %) и значениями коэффициента агапитности 0,9-1,2.

Методом АСР-MS проведено исследование редкометалльного состава гранитов. Они характеризуются одинаковой конфигурацией графиков поведения редкоземельных элементов для всех фаций щелочных гранитов массива (рис. 7). Легкие элементы имеют почти горизонтальное (хондритовое) расположение точек спектра и резкое фракционирование европия в виде отрицательного минимума, который, по мнению многих ученых (Коваленко и др., 1999), обычно характерен для редкометалльных гранитов. Европиевый минимум может свидетельствовать о том, что редкометалльные граниты являются дифференциатами. После Eu минимума наблюдается положительная линия спектра для тяжелых лантаноидов, направленная вверх.

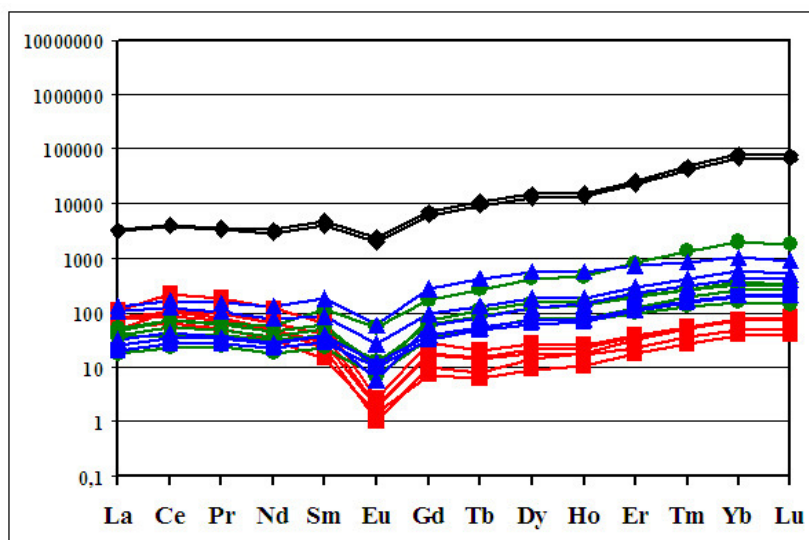


Рисунок 7. Спектр редкоземельных элементов в редкометалльных щелочных гранитах Зашихинского массива. Условные обозначения: красные линии – ранние амфиболовые граниты (1 фация), зеленые – лейкократовые микроклин-альбитовые граниты, синие – кварц-альбитовые граниты и альбититы, черные – альбит-флюоритовые породы.

Положительный наклон линии говорит о накоплении этих элементов по сравнению с легкими, что является положительным фактором для редкоземельной руды Зашихинского месторождения. Линии спектра у микроклин-альбитовых гранитов и альбититов перекрываются, что свидетельствует о их происхождении из единого расплава, с дисперсным распределением альбита. Альбит-флюоритовая жила с аномальными содержаниями редких элементов имеет такой же спектр TR, как и граниты, только с большими концентрациями их.

Кривые конфигурации спектра редких элементов на спайдердиаграммах (рис. 8) аналогичные у всех трех фаций пород, наблюдаются отрицательные аномалии бария, стронция, урана, легких редкоземельных элементов, титана, а положительные аномалии характерны для тория, ниобия, тантала, свинца, циркония, гафния. У тяжелых редкоземельных элементов и иттрия наблюдается положительный наклон линии спектра. Для ранних амфиболовых гранитов характерны менее глубокий минимум титана и максимум тория и более глубокий минимум стронция. Элементы альбит-флюоритовой жилы повторяют конфигурацию спектров гранитов. У всех редкометалльных пород Зашихинского месторождения фиксируются очень компактные и одинаковые линии спектров редких элементов, что свидетельствует об их едином происхождении при дифференциации редкометалльной магмы.

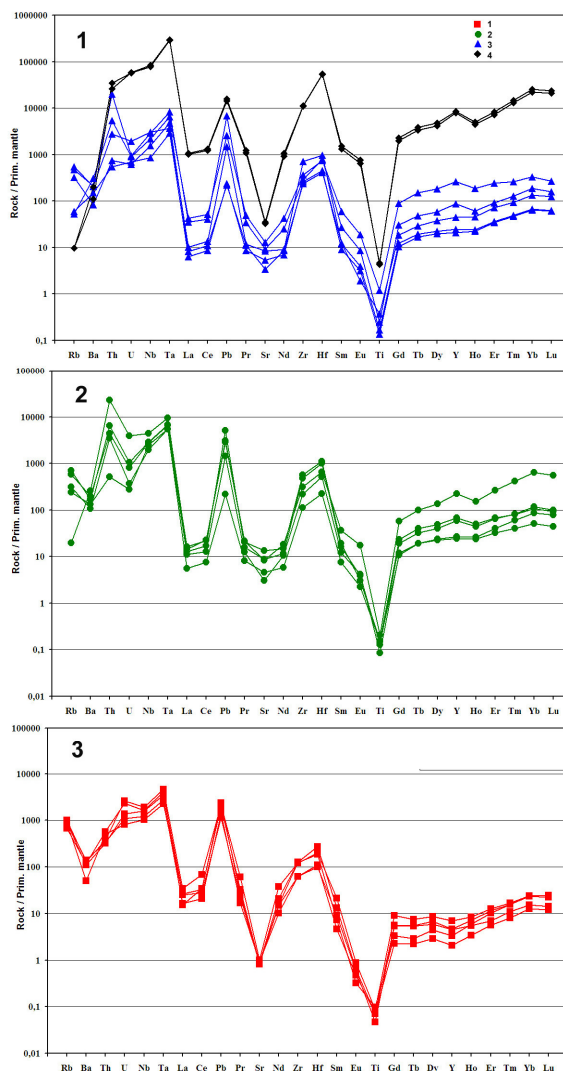


Рисунок 8. Спайдердиаграммы поведения редких элементов в породах Зашихинского массива. Условные обозначения: 1 (красные линии) – ранние амфиболовые граниты (1 фация), 2 (зеленые) – лейкократовые микроклин-альбитовые граниты, 3 (синие) – кварц- альбитовые граниты и альбититы, 4 (черные) – альбит-флюоритовые породы.

Граниты Зашихинского массива сложены кварцем, микроклином и альбитом. К второстепенным минералам относятся щелочной амфибол (арфведсонит) и пироксен (эгирин), слюды (лепидомелан), протолитионит, полилитионит, флюорит. Акцессорные минералы составляют колумбит-танталит, пирохлор, минералы группы стрюверит-ильменорутил, ксенотим, гагаринит, минералы группы криолита, циркон, торит, карбонаты, гранат, сфен и сульфиды, сидерит. Получены микронзондовые анализы всех перечисленных минералов редкометалльных гранитов Зашихинского массива. Выявлено, что главными рудными минералами-концентраторами редких элементов в щелочных гранитах Зашихинского массива являются колумбит, стрюверит (Nb-Ta), циркон (Zr) и ксенотим (Y, TR).

По минеральной ассоциации Зашихинское месторождение аналогично Катугинскому на участке Центрального БАМа, но в отличие от Зашихинского в Катугинском месторождении имеется крупная криолитовая жила с гагаринитом и главным Nb-Ta минералом там является пироклор.

Раздел 3 Сопоставление разновозрастных редкометалльных щелочных комплексов складчатых зон Центральной Азии

Кроме представленных нами в отчете данных по рудоносности Катугинского и Зашихинского массивов, в Центральной Азии имеется крупнейший в мире редкометалльный массив щелочных гранитов в Монголии – Хан-Богдинский. Массив и редкометалльная минерализация были открыты нами совместно с академиком В.И.Коваленко при работах в Советско-Монгольской геологической экспедиции (Коваленко и др., 1977; Владыкин и др., 1981; Владыкин, 1983; Владыкин, 2014). Эти три массива находятся в разных структурных зонах Земли и по возрасту относятся к разным эпохам магматизма.

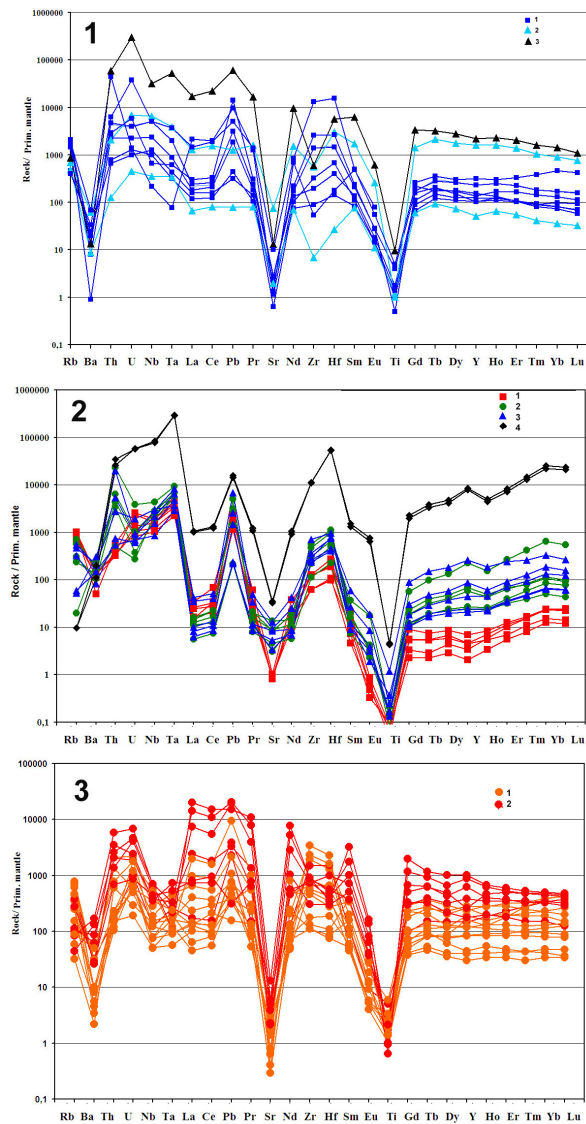


Рис. 9. Спайдердиаграммы редкометалльных массивов Центральной Азии. 1 – Катугинский массив (условные обозначения на рис. 6), 2 – Зашихинский массив (условные обозначения на рис. 8), 3 – Хан-Богдинский массив (1 – граниты, 2 – пегматиты).

Катугинский массив докембрийского возраста – 2066 млн лет, находится в складчатой зоне обрамления Сибирской платформы, Хан-Богдинский массив – 300 млн лет – находится в Монгольской складчатой зоне в обрамлении Китайской платформы и Зашихинский массив – 260 млн лет находится в зоне главного Саянского разлома.

Ставилась задача выяснить влияет ли расположение массивов и их возраст на рудоносность и редкометалльную специфику. Зашихинский массив с Катугинским имеют близкую редкометалльную специфику (парагенезис редкометалльных минералов) и совершенно разный возраст, а с Хан-Богдинским близкий возраст и совершенно разные минеральные парагенезисы.

В породах Хан-Богдинского массива высокий коэффициент агпаитности (более 1.2) и вместо циркона кристаллизуются цирконосиликаты – эльпидит и армстронгит.

Как видно из спайдердиаграмм (рис. 9) кривые конфигурации спектра поведение редких элементов в этих трех массивах различные. Общими являются только резкие отрицательные значения для бария, стронция и титана. Остальные элементы ведут себя по-разному. Из этого можно сделать вывод, что рудоносность не связана с возрастом объектов, а определяется химизмом – первичными содержаниями элементов и проходящими процессами дифференциации вещества.

Основные результаты проведенного исследования

Проведены детальные исследования двух разновозрастных массивов с редкометалльными месторождениями стратегического сырья, расположенных в разных структурных зонах Земли: в зоне главного Саянского разлома и в складчатой зоне южного обрамления Сибирской платформы.

Получены надежные датировки докембрийского возраста (Pb-U метод) по цирконам для гранитов и руды Катугинского массива 2066-2055 млн лет (р-н Центрального БАМа). Получены новые характеристики редких элементов (АСР-MS метод) в гранитах и рудах этого месторождения. Проведены термобарогеохимические исследования гранитов и руд по расплавленным включениям и получены температуры их образования, равные 800 °С, что говорит о их магматическом генезисе. Геологические, петрографические и геохимические исследования так же подтверждают кристаллизацию пород из магмы. Этот вывод кардинально меняет метод поисков подобных месторождений. Впервые проведены детальные минералогические исследования высокофтористых флюидных криолитовых пород месторождения. Выявлены десятки редких и акцессорных минералов этих пород. Определены минералы-концентраторы руд, знание которых необходимо при разработке методов обогащения руд.

Детально изучен второй редкометалльный массив щелочных гранитов Зашихинский с одноименным месторождением. Выделено три фациальных разновидностей редкометалльных гранитов. Впервые получены надежные редкометалльные характеристики руды (АСР-MS методом). Проанализировано поведение редких элементов в процессе дифференциации гранитов. Диагностированы и проанализированы на микрозонде минералы-концентраторы редких элементов. Главными концентраторами Zr является циркон, Nb, Та – колумбит-танталит и стрюверит, TR и Y – ксенотим и иттрофлюорит.

Исходя из сопоставления вещественного и геохимического состава трех разновозрастных редкометалльных комплексов, расположенных в тектонически различных районах Земли, выяснено, что их рудоносность не зависит от возраста, а определяется первичной обогащенностью магмы редкими элементами, ее объемом и проходящими процессами дифференциации, которые и приводят к рудным образованиям.

Список публикаций по теме

1. Ashchepkov I.V., Logvinova A.M., Reimers L.F., Yudin D.S., Travin A.V., Palesskiy V.S., Khmel'nikova O.S., Ntaflos T., Spetsius Z.V., Vladykin N.V., Makovchuk I.V., Downes H. The sytykanskaya kimberlite pipe: evidence from deep-seated xenoliths and xenocrysts for the evolution of the mantle Beneath Alakit, Yakutia, Russia // *Geoscience Frontiers*, 2015, Т. 6, № 5, С. 687-714.
2. Котов А.Б., Владыкин Н.В., Ларин А.М., Гладкочуб Д.П., Сальникова Е.Б., Склярлов Е.В., Толмачева Е.В., Донская Т.В., Великославинский С.Д., Яковлева С.З. Новые данные о возрасте оруденения уникального Катугинского редкометального месторождения (Алданский щит) // *Доклады Академии наук*, 2015, Т. 463, № 2, С. 187-191.
3. Ларин А.М., Котов А.Б., Владыкин Н.В., Гладкочуб Д.П., Ковач В.П., Склярлов Е.В., Донская Т.В., Великославинский С.Д., Загорная Н.Ю., Сотникова И.А. Источники и геодинамическая обстановка формирования редкометальных гранитов Катугинского комплекса (Алданский щит) // *Доклады академии наук*, 2015, Т. 464, № 1, С. 75-79.
4. Алымова Н.В. Редкометалльные граниты Зашихинского массива, Иркутская область // *Вопросы естествознания*, 2015а. №4 (8). С. 9-12.
5. Vladykin N. Maldzhangarsky rare metal carbonatite massif in the NE-part of the Anabar shield // *Geophysical Research Abstracts Vol. 17, EGU2015-2891*, 2015 EGU General Assembly 2015.
6. Vladykin N.V. Petrology of super giant rare-metal deposits in plume-related alkaline rocks (Eastern Anabar Region) // *International Conference Large Igneous Provinces? Mantle Plumes and Metallogeny In the Earths History*. 2015. P. 136-137.
7. Ashchepkov I.V., Vladykin N.V., Spetsius Z.V., Logvinova A.M. Downes H., Ntaflos T. Usage of eclogite Thermobarometry for mantle petrology // *International Conference Large Igneous Provinces? Mantle Plumes and Metallogeny In the Earths History*. 2015. P. 13-15.
8. Vladykin N.V., Radomskaia T.A. Petrology, Geochemistry and composition RARE-metal alkaline rocks in South Gobi Desert, Mongolia : Alkaline Magmatism of the Earth and Related Strategic Metal Deposits Proceedings of XXXII International Conference. Editor-in-chief L.N. Kogarko. M, 2015. С. 140-141.

Список использованных источников

1. Архангельская В.В., Шурига Т.Н. Геологическое строение, зональность и оруденение Зашихинского тантал-ниобиевого месторождения // Отечественная геология. 1997. №5. С. 7-10.
2. Архангельская В.В., Рябцев В.В., Шурига Т.Н. Геологическое строение и минералогия месторождений тантала России. – Москва : ВИМС, 2012. – 191 с.
3. Владыкин Н.В. Минералогические и геохимические особенности Хан-Богдинского массива щелочных гранитов : (МНР) / Владыкин Н.В., Коваленко В.И., Дорфман М.Д. ; АН СССР, Минерал. музей им. А.Е. Ферсмана. – М. : Наука, 1981. – 136 с.
4. Владыкин Н.В. Минералого-геохимические особенности редкометалльных гранитоидов Монголии. – Новосибирск: Наука, 1983. – 200 с.
5. Владыкин Н.В., Котов А.Б., Борисенко А.С., Ярмолюк В.В., Похиленко Н.П. и др. Возрастные рубежи формирования щелочно-ультраосновного массива Томтор: результаты U-Pb и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ геохронологических исследований // ДАН, 2014, т.454, № 2, с. 195-199.
6. Коваленко В.И., Костицын Ю.А., Ярмолюк В.В. и др. Источники магм и изотопная (Sr, Nd) эволюция редкометалльных Li-F гранитов // Петрология. 1999. Т.7. № 4. С. 383–409.
7. Коваленко В.И., Владыкин Н.В., Лapidес И.Л., Горегляд А.В. Щелочные амфиболы редкометалльных гранитов. – Новосибирск: Наука, 1977. – 232 с.