

УДК 553.493(470.22)

ЛЮДМИЛА ВЛАДИМИРОВНА КУЛЕШЕВИЧкандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
kuleshev@krc.karelia.ru**АНТОНИНА ВАСИЛЬЕВНА ДМИТРИЕВА**аспирант Института геологии, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
dmitrieva-a-v@yandex.ru

МИНЕРАЛЫ И ИСТОЧНИКИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КАРЕЛИИ

Редкоземельные элементы (Y и лантаноиды La, Ce, Nd...) в последние годы нашли широкое применение в разных современных отраслях промышленности. В земной коре они входят в минералы (бастнезит, паризит, монацит, ксенотим и др.) в щелочных комплексах пород, карбонатитах, гранитах повышенной щелочности, пегматитах, характерны для золоторудных проявлений. В работе рассматриваются некоторые нетрадиционные источники редкоземельных элементов, их аномальные концентрации и минералы в породах и рудах Карелии.

Ключевые слова: редкоземельные элементы и минералы, бастнезит, паризит, монацит, ксенотим, Карелия

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ: МИНЕРАЛЫ-КОНЦЕНТРАТОРЫ, ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, СОВРЕМЕННЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

К редкоземельным элементам (РЗЭ или REE) относят лантаноиды (TR – № 57 La – № 71 Lu), совместно с ними обычно рассматривается и иттрий (№ 39 Y). Минералами-концентраторами РЗЭ и Y являются бастнезит $(\text{Ce,La,Pr})[\text{CO}_3]\text{F}$, паризит $\text{Ca}(\text{Ce,La}_2)_3[\text{CO}_3]_2\text{F}_2$, синхизит $\text{Ca}(\text{Ce,La})[\text{CO}_3]_2\text{F}$, монацит $\text{Ce}[\text{PO}_4]$, ксенотим $\text{Y}[\text{PO}_4]$, ортит (или алланит) $(\text{Ca,Ce})_2(\text{Al,Fe})_3[\text{Si}_3\text{O}_{12}](\text{O,OH})$, лопарит $\text{NaCeTi}_2\text{O}_6$, эвдиалит и некоторые TR-содержащие минералы (апатит, эпидот). Известны около 100 собственных минералов (до 250 с TR-содержащими). Они представляют изоморфные смеси соединений всех 15 лантаноидов или иттрия.

Основными типами промышленных месторождений РЗЭ являются магматические (лопаритовые нефелиновые сиениты и апатит-нефелиновые руды); редкометалльные щелочные граниты (альбитовые) и пегматиты; скарны, образующиеся на контакте карбонатных пород с щелочными гранитами и сиенитами, и карбонатитовые месторождения (например, месторождения Кольского полуострова, месторождение Бастнез в Швеции, Маунтин-Пасс в США, Баюнь-Обо в КНР); россыпные и осадочные [1]. Максимально высокие концентрации РЗЭ имеют карбонатиты и скарны на контакте с сиенитами, среди них наиболее крупные объекты располагаются на докембрийских щитах. К ним относятся месторождения разной глубинности, такие как Маунтин-Пасс в США, Нам-Се во Вьетнаме, Баюнь-Обо в КНР, дающие основную продукцию РЗЭ в мире, Карасуг в России [1]. Среди осадочных метаморфизованных месторождений на первое место выходят также докембрийские кварцевые конгломераты: они образуют пластовые объемные залежи и при не столь высоких

концентрациях минералов (браннерит, монацит, давидит) Ce или Y подгруппы, составляющих десятые или сотые доли процента, представляют промышленный интерес и разрабатываются совместно с ураном (что составляет 1/5 часть от всех Y месторождений).

Применение редкоземельных элементов возросло с конца XX века и сейчас составляет около 130 тыс. т в год в пересчете на оксиды [5]. Их свойства, в частности высокая проводимость и слабая реакция на другие элементы, делают РЗЭ незаменимыми компонентами в высокоточных приборах и устройствах. Прогнозируемый спрос на такие металлы к 2015 году вырастет до 225 тыс. т. РЗЭ используются в металлургии в виде мишметалла – смеси, близкой к природному концентрату.

Мишметалл легко сплавляется со сталью и улучшает свойства легатуры (жаропрочность, устойчивость к коррозии, вязкость), используется для легирования титана и алюминия, добавляется в хромоникелевые стали. Оксид церия применяется в обработке и подготовке специальных стекол, изготовлении люминофоров. Практически весь спектр РЗЭ задействован при производстве лазеров, в электронике и атомной промышленности. Эти элементы являются частью наиболее важных узлов (кристаллов), отвечающих за активацию и концентрацию лазерного пучка. Zr, Hf и редкие земли, особенно Gd, хорошо поглощают нейтроны, поэтому их добавляют в состав регулирующих стержней для замедления реакции, а также специальных покрытий для защиты от излучения. Разделение урана и плутония решается за счет фторида лантана, в котором хорошо «растворяется» радиоактивный элемент. Большой объем редких земель уже несколько десятилетий используется при изготовлении катализаторов для нефтяной промышленности. Значительные количества

в первую очередь самария и неодима идут на производство постоянных магнитов, энергия которых на порядок выше старых аналогов на основе железа. Магнитоотрицательные свойства (способность менять форму в магнитном поле) этих элементов широко применяются в производстве аудиосистем и устройств, генерирующих звуковые волны. Редкие земли адаптировали к обработке ЖК-дисплеев и кремниевых кристаллов для электроники. В прошлом десятилетии существенно возросло использование РЗЭ для производства оптоволокна и устройств памяти, а также изготовления аккумуляторов и топливных элементов. Важнейшая область применения оксидов РЗЭ – изготовление высокотемпературных сверхпроводников (типа $YBa_2Cu_3O_{7-x}$). Одно из самых перспективных направлений – использование РЗЭ в производстве электро- и гибридных автомобилей.

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ДОКЕМБРИЙСКИХ КОМПЛЕКСАХ КАРЕЛИИ

Наиболее высокие концентрации РЗЭ на территории Карелии известны в следующих формациях [7]: 1 – в ультраосновных щелочных пегматоидных породах Тикшезерского и Ельтьозерского массивов (Σ РЗЭ 0,1–0,36 %); 2 – в субщелочных гранитах, пегматитах и метасоматитах архейского возраста (0,13–0,41 %); 3 – в грейзенах и скарнах в ореоле рифейских гранитов-рапакиви в Северном Приладожье (0,12–0,63 %); 4 – в метаморфизованных кварцевых конгломератах и кварцито-песчаниках (0,1–0,22 %). Данные Северной ГЭ позволяют говорить о том, что в карбонатитах щелочных комплексов Σ РЗЭ составляет 970–1250 ppm (ppm = г/т, табл. 1). Нами были изучены и иные возможные нетрадиционные аномальные источники РЗЭ, а также акцессорные минералы: 1 – в грейзенах с рудной минерализацией в Северном Приладожье в ореоле гранитов-рапакиви; 2 – в монцонитах (породах повышенной щелочности и в их ореолах); 3 – в альбититах и связанных с ними Au-содержащих Cu-Se-U-V или Cu-Se-U месторождениях и рудопроявлениях; 4 – в золотосульфидных [6].

Методика. Содержание РЗЭ определялось методом ICP MS для некоторых типов пород и руд (табл. 1), минералы изучались с помощью микрозондового анализатора (сканирующего электронного микроскопа VEGA II LSH с микроанализатором INCA Energy 350, табл. 2–3).

МИНЕРАЛЫ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ АССОЦИАЦИИ

1. *Питкярантское рудное поле (РП), Северное Приладожье.* Группа грейзенизированных скарновых месторождений Питкярантского РП в ореоле рифейских гранитов-рапакиви Сал-

минского массива отличается высокими концентрациями РЗЭ и радиоактивных элементов. Изучались образцы проявления Люпикко (из коллекций Р. А. Хазова, Институт геологии КарНЦ РАН), содержащие леллингит, халькопирит, борнит, шеелит, галенит, клаусталит $Pb(Se,S)$, самородные висмут и серебро, хедлейит, пильзенит, теллуrowисмутит, Ве-минералы (ряд данолит-гельвин-гентгельвин), Cl-биотит. С рудными минералами ассоциируют и находятся в тесном сростании монацит, бастнезит и уранинит (табл. 2–3). Монацит ($Ce,La...$) PO_4 обычно встречается в хорошо ограненных кристаллах. Бастнезит (F-карбонат РЗЭ) выделяется в зернах неправильной формы, обрастает монацит, образуя кайму вокруг него. Уранинит выделяется в кубических кристаллах, содержит радиогенный Pb (13,5–14,54 %) и примесь Th (3,04–12,16 %), в связи с чем часто бывает окружен каймой более позднего Y-содержащего торита ($ThSiO_4$) и более сложными фазами с РЗЭ.

Следует отметить, что в рудах уранового месторождения Карку («тип несогласия» [2]), сформировавшегося в зоне контакта разновозрастных протерозойских толщ в южном ореоле Салминского массива, а также в коре выветривания гранитного массива, установлены повышенные концентрации РЗЭ (возраст гранитов ~1,5 млрд лет, оруденения ~1,4–1,3 млрд лет).

2. *Умереннощелочные комплексы пород архейского и протерозойского возраста.* На Сегозерской площади для архейского умереннощелочного магматизма – интрузий, дифференцированных от габбро-пироксенитов до монцонитов и сиенитов (массивы Панозерский, Сяргозерский, Торосозерский, Шаравалампи), характерно повышенное содержание РЗЭ (253–488,4 ppm). В них, и особенно в зонах метасоматического преобразования этих пород, установлены биотит, Ва-содержащий микроклин, апатит, эпидот, ортит, карбонат, турмалин, барит. В Панозерском массиве (пос. Паданы) минералы, содержащие РЗЭ, представлены торитом, ортитом, монацитом, среди них преобладают F-карбонаты La-Ce, реже Ce-La состава (табл. 3(3–5), рис. а–в; семейство бастнезит-паризит-синхизит). Наиболее распространенным среди них является бастнезит, который образует неправильные ветвящиеся выделения. При распаде торита, отличающегося высокой концентрацией РЗЭ (в сумме до 7 %), вокруг него образуется ореол бастнезита (рис. а). На участке Шаравалампи (восточнее пос. Шалговаара) встречаются зональные эпидоты-ортиты (рис. г). Апатит из рудных апатит-магнетитовых зон этих интрузий часто содержит микровключения ортита.

В Кумсинской структуре Центральной Карелии на участках Светлое-2 и Медные горы интрузии монцонитов протерозойского возраста отличается высокая Na-щелочность (плагноклаз представлен альбитом) и особенно повышенные концентрации РЗЭ, Zr, Ва, Р. Рудные и акцессор-

ные минералы представлены магнетитом, сфеном, апатитом, монацитом, бастнезитом. В зонах более позднего метасоматического изменения в монцонитах появляются биотит, в прожилках – микроклин, альбит, эпидот, более крупный сфен, апатит, циркон, турмалин, реже алланит, кальцит, барит.

3. *Щелочные метасоматиты, содержащие благороднометальное Cu-S, Cu-Se-U и U-V оруденение (Светлое, Медные горы, Средняя Падма).* Золотосодержащее Cu-Se-U проявление Светлое расположено в среднем течении р. Кумса вблизи описанной выше интрузии (Светлое-2) и приурочено к зоне щелочных метасоматитов,

Таблица 1

Содержание Ba, Y, Zr, U и лантаноидов (ppm) в некоторых типах пород и руд Карелии

№	№ обр.	Ba	Y	Zr	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
1	СВ-9/4	125,38	392,19	8,64	550,0	35,70	125,38	20,88	117,31	57,48	20,08
2	СВ-7	14,61	210,79	5,52	773,2	46,14	110,58	15,78	82,03	32,12	10,97
3	МГ-13/1	45,22	7,42	69,23	9,27	24,75	74,79	7,09	25,61	4,34	0,71
4	МГ-18/9	472,16	48,15	215,41	0,60	17,42	41,02	5,61	26,04	6,94	2,20
5	Ги-5	204,64	58,67	180,61	0,76	21,20	50,98	6,80	31,40	8,24	2,44
6	Ги-6	66,00	122,59	681,89	1,79	40,26	99,90	13,78	64,59	18,21	4,75
7	Мак-13	283,21	10,53	45,12	7,01	18,05	32,12	3,30	13,55	1,99	0,43
8	Мак-19	353,41	39,02	231,80	1,28	13,47	33,33	4,54	22,72	5,85	1,90
9	Шу-2	145,69	26,13	107,52	35,13	13,99	24,32	3,16	14,2	2,9	0,77
10	С41/110,7	584,90	18,41	268,55	1,13	69,15	169,83	17,38	78,20	14,34	1,84
11	ГП-1/9-1	149,98	11,56	80,19	1,38	23,80	44,67	4,84	20,11	3,51	0,89
12	706-1	–	–	–	25,9	237,0	513,0	–	177,0	24,3	2,87
13	146/96-107	–	< 15	105,0	255,0	258,0	597,0	–	344,0	38,3	9,6
14	527-1	1675	39	451	–	99	252	–	115	15,6	3,66
15	551	1668	30	215	–	63	126	–	53	9,30	2,42
16	613	2490	32	328	–	68	147	–	72	11,7	2,89
№	№ обр.	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣP3Э (14)	
1	СВ-9/4	89,04	14,26	80,92	14,40	33,45	3,26	14,41	1,56	628,13	
2	СВ-7	48,47	8,46	58,11	9,18	21,84	2,27	10,29	1,04	457,28	
3	МГ-13/1	3,68	0,40	2,04	0,30	0,80	0,09	0,61	0,07	145,28	
4	МГ-18/9	8,62	1,45	9,27	1,88	5,54	0,78	5,22	0,72	132,71	
5	Ги-5	10,37	1,70	11,11	2,26	6,70	0,91	5,88	0,78	160,77	
6	Ги-6	22,57	3,63	23,27	4,70	13,71	1,92	12,50	1,78	325,57	
7	Мак-13	1,94	0,25	1,52	0,32	1,00	0,14	0,90	0,13	75,64	
8	Мак-19	7,04	1,17	7,64	1,52	4,70	0,65	4,41	0,63	109,57	
9	Шу-2	3,37	0,53	3,7	0,84	2,81	0,42	2,8	0,42	74,23	
10	С41/110,7	11,99	1,25	5,73	0,82	2,22	0,33	2,43	0,33	375,84	
11	ГП-1/9-1	3,42	0,38	2,01	0,39	1,19	0,16	1,15	0,16	106,68	
12	706-1	–	3,5	–	–	–	–	12,6	1,7	970,3	
13	146/96-107	–	3,14	–	–	–	–	1,21	< 0,05	1251,3	
14	527-1	–	1,79	–	–	–	–	1,14	0,17	488,4	
15	551	–	0,78	–	–	–	–	1,35	0,18	253,03	
16	613	–	0,95	–	–	–	–	1,54	0,21	304,3	

Примечание. (1 ppm = 1 г/т). 1–2 – проявление Светлое, Cu-Se-U-руды. 3–4 – Медные горы, альбититы в габбро с медной минерализацией. 5–6 – Гирвас, альбитизированные взрывные брекчии в базальтах. 7–8 – Максово, сульфидная минерализация в шунгитах. 9 – Шуньга. 10 – п-е Северо-Вожминское, колчеданно-полиметаллические руды. 11 – Au-S-As п-е Южно-Костомукшское (южный карьер железорудного месторождения). 12–13 – Тикшезерско-Ельтьозерский массив, данные СГЭ. 14 – Сяргозеро, 15–16 – Панозеро (пос. Паданы, по материалам С. Б. Лобач-Жученко).

Таблица 2

Состав монацитов и ксенотимов (мас. %)

Эл.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P	14,05	13,77	14,05	13,75	14,77	15,61	14,79	15,47	17,33	18,22	17,58	18,05
Y									38,34	36,73	37,84	34,21
Ca			2,9	0,29	0,84							
La	15,33	15,05	10,92	17,12	11,84	21,18	14,5	13,73				
Ce	29,85	29,86	27,24	29,87	24,27	33,64	31,19	30,41				
Pr	1,93	2,36		2,43	1,74							
Nd	7,84	8,68	12,90	8,74	11,26		10,79	11,01				
Sm			1,79		0,45							
Gd			1,65						1,30	1,95	1,41	4,45
Dy									4,48	4,72	3,54	8,77
Yb									4,35	3,46	3,23	
Th	2,23	2,60			6,12							
O	27,84	27,69	28,54	27,8	28,7	29,58	28,74	29,38	34,20	34,92	34,38	34,52
Σ	99,07	100,01	99,99	100	99,99	100,01	100	100	100	100	97,98	100

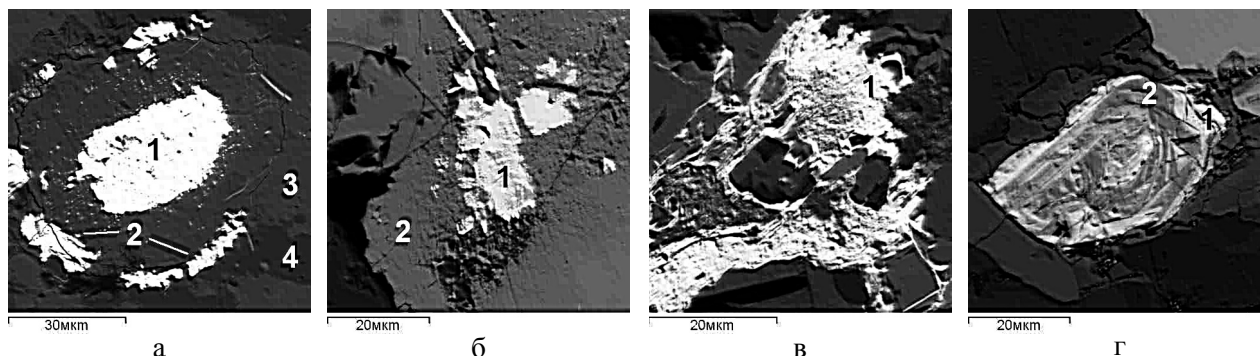
Примечание. 1–8 – монациты, 9–12 – ксенотимы. 1–2 – Люпикко (образец ХЗ-1). 3–6 – Рыбозеро (3, 9, 10 – С-38/64,5; 4, 11 – С-37/61; 5 – С-42/149,2; 6 – С-5/51,3; 7, 12 – С-41/191,8). 8 – Северо-Вожминский. Микрозондовые анализы выполнены в Институте геологии КарНЦ РАН, приведены к 100 %.

Таблица 3

Состав карбонатов РЗЭ (мас. %)

Эл.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
F	10,33	11,91	2,38	5,77	6,73	2,43	4,05	5,24	3,22	2,22	9,10	12,55
Ca	2,46	3,23		0,53	1,3	2,34	1,60				1,51	2,97
La	25,71	26,26	43	39,31	27,1	18,57	16,82	18,66	13,99	18,06	20,63	19,85
Ce	37,28	45,05	36,35	35,09	39,47	46,4	41,77	43,40	44,97	41,95	41,34	36,80
Pr	2,34				3,11							
Nd	8,3		3,96	5,39	8,4	15,58	17,95	18,89	23,75	22,78	13,87	14,49
Sm							3,56					
O	13,59	13,54	14,31	13,91	13,89	14,68	14,25	13,80	14,07	14,98	13,56	13,33
Σ	100,01	99,99	100	100	100	100	100	99,99	100	99,99	100	99,99

Примечание. 1–2 – Люпикко (образец ХЗ-1). 3–5 – Паданы (29-1, коллекция С. Б. Лобач-Жученко). 6–9 – Рыбозеро (С-2/63). 10 – Северо-Вожминский (С-41/191,8). 11–12 – Южно-Костомукшский (11-ГП-1/11а, 12 – ГП-1/34). Микрозондовые анализы выполнены в Институте геологии КарНЦ РАН, приведены к 100 % (даны без учета CO₂, так как образцы с углеродным напылением).



Минералы РЗЭ: Паданский массив (а–в), Шаравалампи (г): а (обр. 29-2, коллекция С. Б. Лобач-Жученко): 1 – торит, 2 – F-карбонат La-Ce-Nd, 3 – К-шпат (BaO 2,97 %), 4 – альбит; б (обр. 29-1): 1 – бастнезит, 2 – сфен. в (обр. 29-2-6): 1 – бастнезит; г (обр. 9742/8): зональный эпидот (2) – ортит (1)

наложенных на карбонатные породы. Оруденение представлено клаусталитом (PbSe), медными сульфидами, настураном, содержит благородные металлы (Au, Pd-Se и Pd-Sb-As-фазы). В рудной зоне содержание Σ РЗЭ составляет 457–628 ppm (табл. 1). Для руд проявления Светлое характерно присутствие мелкозернистых селенидов и сульфидов либо почковидных сростаний минералов клаусталита и настурана, образовавшихся в близповерхностных условиях. Тонкодисперсные массы и почки представлены сложнокомпонентным составом, содержащим Y (до 2,5–3 %) и другие РЗЭ (рис. в).

В щелочных метасоматитах и комплексном (Au-Ag-Pd-Mo-Cu-Se)-U-V-оруденении месторождения Средняя Падма высокая концентрация РЗЭ обеспечивается присутствием в околорудных метасоматитах и рудных телах монацита. В околорудном ореоле монацит встречается в сростании с пиритом, более редкими сульфидами и селенидами, особенно много его в участках с апатитом и баритом.

4. *Золоторудные и золотосодержащие рудные объекты.* На золоторудном месторождении Рыбозеро в Восточной Карелии в рудном теле № 1 в оталькованных коматиитах установлены монациты неправильных форм с широким спектром изоморфных замещений (Ce, La, Nd, Sm, Gd) и более широко распространенные хорошо ограненные ксенотимы, в которых Y изоморфен с Dy, Gd, Yb (табл. 2). Рудное тело № 2 приурочено к лежащему контакту колчеданной залежи. В этих рудах кроме ведущего пирита установлены халькопирит, Ni-Sb-S-As фазы, галенит, монацит (табл. 2(6)), уранинит, рутил. В золоторудном теле № 3 совместно с пиритом, халькопиритом, золотом, герсдорфитом обнаружен высокотермический монацит (Th – 6,12 %, табл. 2(5)). Западная ветвь участка Рыбозеро включает

горизонт апатит-магнетитовых руд, которые содержат V-ильменит, магнетит, Cl-apatит и наложенную прожилковую S-Cu-Ni-минерализацию: здесь в сростании с сульфидами широко распространены бастнезит, паризит, встречается Y-содержащий торит (Y 5,36–9,98 %).

РЕЗЮМЕ

Как показало изучение некоторых рудных объектов Карелии, источниками РЗЭ являются карбонатиты и руды известного Тикшезерского щелочного массива. Кроме того, в качестве источников РЗЭ могут выступать зоны грейзенизации и альбитизации в ореолах массивов гранитов-рапакиви либо пород повышенной щелочности – монзонитов, а также палеопротерозойские альбититы в зонах региональных СЗ разломов, и особенно рудные тела в них. Приуроченность содержащих РЗЭ минералов (фосфатов или карбонатов) к определенным типам пород и руд определяется их составом и щелочностью-известковистостью среды. Рост содержания РЗЭ связан с постмагматическими рудными процессами. Эти элементы концентрируются преимущественно в рудных телах и сопровождают золоторудные залежи.

Редкоземельные элементы, представляя объект большого, все возрастающего практического интереса, являются одновременно одним из основных «помощников», позволяющих судить о происхождении и источниках расплавов и растворов. При изучении магматических пород данные по геохимии и минералогии РЗЭ позволяют расшифровать условия и обстановки их образования. При установлении генезиса золоторудных месторождений РЗЭ позволяют судить об источниках растворов при метасоматозе, а для россыпных месторождений – об их генетической связи [3], [4], [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдонин В. В., Бойцов В. Е. и др. Месторождения металлических полезных ископаемых. М.: ЗАО «Геоинформ-марк», 2005. 718 с.
2. Величкин В. И., Кушнеренко В. К., Тарасов Н. Н. и др. Геология и условия формирования месторождения типа «несогласия» в Северном Приладожье (Россия) // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47. № 2. С. 99–126.
3. Винокуров С. Ф., Коваленкер В. А., Сафонов Ю. Г. и др. Лантаноиды в кварцах эпitherмальных золоторудных месторождений: распределение и геохимическое значение // Геохимия. 1999. № 2. С. 171–180.
4. Волошин А. В. Y-REE минералы и минералы группы циркона из рудных зон Панареченской вулcano-тектонической структуры // Труды VII Всероссийской Ферсман. науч. сессии, посвящ. 80-летию Кольского НЦ РАН. Апатиты, 2010. С. 11–13.
5. Информационный центр поддержки предпринимательства на рынке редкоземельных металлов и технологий [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.74rif.ru/redkozem.html
6. Кулешевич Л. В., Панфилова И. В. Последовательность формирования, рудные и акцессорные минералы золоторудных проявлений Костомукшской структуры // Материалы 14-й Междунар. конф. «Связь поверхностных структур земной коры с глубинными». Ч. 2. Петрозаводск, 2008. С. 300–303.
7. Михайлов В. П. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Петрозаводск: Карелия, 2005. 278 с.
8. Юдовская М. А., Дистлер В. В. и др. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черномсланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов // Геология рудных мест. 2011. Т. 53. № 1. С. 32–65.