

ГЕОХИМИЯ РЕДКИХ ЗЕМЕЛЬ В МИНЕРАЛАХ ХОЛЗУНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

А.А. Кременецкий, А.И. Гусев¹

Институт минералогии и геохимии редких элементов, г. Москва
¹ Бийский педагогический государственный университет, г. Бийск

ВВЕДЕНИЕ

Холзунское рудное поле располагается на крайнем юго-западе Республики Алтай в верховьях рек Карагай и Тургусун на границе с Казахстаном. Рудное поле входит в состав Коргонского железорудного района Южно-Алтайской золото-марганец-железорудной металлогенической области и приурочено к наиболее прогнутой части Коргонского прогиба. Оруденение железа и марганца приурочено к мелководной обстановке, где обнаруживаются признаки гидротермально-осадочного генезиса. С одной стороны руды месторождения Холзун имеют сходство с гематит-магнетитовым оруденением, а с другой – с апатит-магнетитовым месторождением Кирунавара (Швеция), сформированным в результате расслоения расплава на рудную (апатит-магнетитовую) и силикатную составляющие в результате ликвации поздних высокожелезистых трахириолитов, вызванной обилием летучих компонентов, прежде всего фтора, фосфора, бора.

В 3-4 км к юго-востоку от Холзунского месторождения на его простирании выявлены жилы апатит-скарново-магнетитовых руд, локализованных в калишпатизированных трахитах, трахиандезитах и биотит-актинолит-альбитовых сланцах. В апатит-магнетитовых рудах устанавливаются сидеронитовые структуры, характерные для ликвационных процессов рудообразования. В Холзунском рудном поле присутствует месторождение железа Холзунское с участками Тургусунским, Перевальным и Северным, а также несколько неизученных проявлений железа и редких земель.

В последнее время оруденение Холзунского рудного поля связывается с развитием и эволюцией девонской магмо-рудно-метасоматической системы (МРМС) анорогенного типа, относящейся к одному из трёх типов оруденения железо-оксид-медно-золоторудного класса с повышенными концентрациями редких земель (ЮСГ): Кируна, Олимпик-Дэм, Клонкарри (Гусев Н. и др., 2006; Гусев А., Гусев Н., 2007). Характерной особенностью развития всей Холзунской МРМС является её генерация в результате функционирования плюмтектоники. За рубежом объектам этого класса месторождений уделяется пристальное внимание, так как они являются комплексными и среди них отмечаются гигантские месторождения мирового класса (Gandhi, 2004; Marschik, Fontbote, 2001). Следует отметить, что в каждом регионе имеются свои специфические особенности состава этих месторождений. Не является исключением в этом плане и Алтайский регион, спецификой которого, помимо месторождений типа Кируна, Клонкарри, Олимпик-Дэм, являются месторождения скарново-железорудные, золото-медно-скарновые (Гусев А., 2004; Гусев А., Гусев Н., 2007). По нашим данным специфику этого класса месторождений Алтая могут составлять и месторождения редких земель (Gusev, 2007). Подтверждением этого являются приводимые ниже данные по составу и содержаниям редких земель в минералах Холзунского рудного поля. Кроме того, в Алтайском регионе апатит-магнетитовое оруденение типа Кируна сопровождается также широко распространённым марганцевым осадочным и гидротермально-осадочным оруденением (проявление Прозрачное и другие) и гидротермально-осадочным стратиформным свинцово-цинковым оруденением типа SEDEX.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СТРОЕНИЯ И СОСТАВА РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ ХОЛЗУНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ.

Холзунское месторождение находится в водораздельной части Холзунского хребта с абсо-

лютными отметками 1700-2000 м. Холзунский участок сложен эффузивно-осадочной толщей коргонской свиты раннего-среднего девона. В ее составе преобладают кислые лавы и их туфы с прослоями туфогенных и полимиктовых песчаников и линзами известняков. В последних содержится фауна кораллов, указывающая на верхнеэйфельский возраст вмещающих отложений. Эффузивно-осадочная толща смята в крутые (до 70°) линейные складки северо-западного простирания и прорвана двумя гранитными интрузиями. В сотне метров восточнее участка расположена небольшая вытянутая в северо-западном направлении интрузия гранит-порфиров предположительно майорского комплекса (средний девон); к западу – более крупная изометричная интрузия биотитовых порфировидных гранитов предположительно синюшинского комплекса (поздняя пермь - ранний триас). С майорскими гранитоидами связана альбитизация, амфиболитизация и хлоритизация вмещающих пород; с синюшихинскими – ороговикование и скарнирование. И те, и другие метаморфизуют руды, превращая гематит в магнетит. Рудоносный горизонт приурочен к терригенным разностям пород. Он представлен пластами и линзами магнетитовых и магнетито-гематитовых руд и зонами вкрапленных магнетитовых и, реже, гематитовых руд. Гематит повсеместно представлен несколькими генерациями спекулярита. Мощность его около 120 м. Рудные тела залегают нередко с постепенными переходами к вмещающим породам и отделяются от них только по анализам. В северном и северо-западном направлениях происходит заметное увеличение роли спекулярита в рудах относительно магнетита вплоть до сплошных гематитовых руд.

В составе руд преобладает магнетит в виде сплошных зернистых масс или густой вкрапленности. Из нерудных минералов преобладают кварц, затем полевые шпаты, амфиболы, пироксены, минералы группы хлоритов, слюды, гранатов, карбонаты; встречаются обломки кислых вулканогенных пород. С железными рудами ассоциируют выделения марганца, приуроченные к глинистым и песчаным породам.

Рудному полю Холзунского месторождения соответствует магнитная аномалия протяжённостью около 9 км при ширине до нескольких сотен метров. Она простирается в ССЗ направлении согласно с геологическими структурами района и подразделяется на 3 участка: Северный, Перевальный и Тургусунский.

Рудная зона *Перевального участка* прослеживается более 1500 м при ширине до 250 м. Линзо- и пластообразные рудные тела, согласные с напластованием вмещающих пород, имеют мощность до 100 м, протяжённость по простиранию и падению 700 м и более. Среднее содержание валового железа в рудных телах - 28-29 %. Соотношение магнетита к спекуляриту в рудах - 1 : 0,7.

На *Тургусунском участке* рудная зона распадается на 3 крупных блока, вероятно, в связи со складчатостью и разрывами первичного рудного горизонта. Линзовидные рудные тела имеют мощность до 70 м при протяжённости по падению свыше 700 м. Реликтовая слоистость в рудах и вмещающих породах местами пересекается сланцеватостью и отдельными телами переротложенных руд. Среднее содержание железа несколько выше, чем в рудах Перевального участка (около 33 %). Соотношение магнетита к спекуляриту - 1:0,3.

На *Северном участке* длиной более 1000 м и шириной около 100 м рудные тела имеют пластообразную форму мощностью до 50 м. Руды апатит-магнетит-спекуляритовые, спекуляритовые. В рудных телах соотношение магнетита к спекуляриту - 0,5:1. Среднее содержание железа в рудах - 25-28 %.

Основу промышленных запасов железных руд составляют гидросиликатно-магнетитовые руды с повышенным содержанием апатита. Относительно богатые руды Тургусунского участка (56 % разведанных запасов руд месторождения) имеют актинолит-биотит-магнетитовый состав при подчинённой роли альбит-гематитовых разновидностей. Наиболее бедные биотит-альбит-магнетитовые с гематитом руды развиты на Перевальном участке. К бедным относятся также карбонат-гидросиликат-магнетитовые руды с гематитом, составляющие в сумме 25 % запасов. Остальные типы руд (сульфидно-магнетитовые, апатит-магнетитовые и др.) имеют подчинённое значение. Апатит-магнетитовые руды в виде жил залегают на юго-западном фланге

рудного поля среди порфиристов подрудной пачки. Второстепенные минералы руд: эпидот, хлорит, кварц, доломит, цеолиты, ангидрит; в виде примеси отмечены сфен, турмалин, ортит, монацит, роговая обманка, диопсид, гранат гроссуляр-андрадитового ряда, барит, гипс, халькопирит и другие.

Запасы руд месторождения Холзун составляют: категорий А+В+С1 – 407,6 млн. т, категории С2 - в объёме 272,5 млн. т со средним содержанием железа 28,9 %. Запасы спекулярита промышленных категорий составляют 102 млн. т.

В 2005 году нами при проведении поисковых и металлогенических исследований в пределах Холзунского рудного поля выполнено переопробование нижнего рудоносного горизонта Тургусунского участка, где было выявлено проявление ортита Э.Г. Кассандровым в 1969-1970 годах. В пробах-протоколках и в шлифах, помимо апатита с высокими концентрациями редких земель, нами установлены ортит и монацит, нередко ассоциирующие с цериевым эпидотом и калиевым полевым шпатом. Отмечены единичные зёрна ксенотима. Содержания иттрия в штучных пробах составили 0,52-1,34 %. Аналогичные руды с ортитом и монацитом выявлены нами на Северном участке Холзунского рудного поля в тесной ассоциации с фторапатитом, цериевым эпидотом, спекуляритом нескольких генераций. Концентрации иттрия в пробах Северного участка составили 0,34 - 1,27 %. Кроме того, в рудных телах Северного участка выявлены пирит-галенит-сфалеритовые руды в глинистых углеродистых сланцах, классифицируемые типом SEDEX. По латерали от этих руд установлены гипогенные виллемитовые руды с редкими выделениями пирита и сфалерита. Следовательно, в пределах рудного поля имеются неизученные проявления редких земель с собственными минералами (ортит, монацит), а также с минералами, обогащёнными редкими землями (цериевый эпидот). В этой связи определённый интерес представляет вся полоса распространения рудоносного горизонта от Холзуна до Коргона и проявления железа оксидного типа на предмет выявления спекуляритового, редкоземельного и других типов оруденения.

1. Концентрации редких земель в минералах Холзунского рудного поля, г/т

Элементы, отношения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Y	75623	5910,4	362,8	5,79	5,38	10,1	2,48	6,37	11,9	12,7	8,9	14,3	17,4	0,9
La	63224	3010,3	522,9	7,20	20,5	28,2	1,94	11,6	10,5	13,5	42,7	47,2	49,1	0,9
Ce	53626	7277,8	976,3	3,26	42,2	56,1	3,02	28,2	1,1	1,96	75,4	86,2	88,3	н/о
Pr	152,2	127,9	99,6	1,27	3,1	3,75	0,37	2,1	2,1	2,3	6,6	7,8	7,9	0,14
Nd	778,1	575,4	359,9	4,55	10,7	12,2	1,44	7,8	8,1	9,4	22,1	31,2	30,8	0,6
Sm	126,3	82,3	61,1	0,82	1,55	1,77	0,34	1,52	1,95	2,2	3,43	5,3	4,82	0,12
Eu	101,6	77,4	10,5	0,17	0,22	0,33	0,06	0,38	0,6	0,62	0,8	1,2	1,2	0,02
Gd	185,7	156,7	62,97	0,84	1,21	1,71	0,46	1,27	2,13	2,21	2,53	3,3	3,3	0,11
Tb	25,8	17,4	8,53	0,13	0,15	0,24	0,07	0,18	0,37	0,43	0,32	0,82	0,9	н/о
Dy	278,2	197,8	49,7	0,69	0,71	1,26	0,39	0,99	2,2	2,83	1,57	3,14	3,2	0,08
Ho	18,23	12,5	10,9	0,15	0,15	0,29	0,08	0,22	0,45	0,53	0,31	0,77	0,81	0,02
Er	55,3	35,5	30,5	0,47	0,43	0,79	0,21	0,6	1,24	1,32	0,84	2,37	2,41	0,06
Tm	11,2	6,9	4,21	0,11	0,12	0,10	0,1	0,11	0,1	0,12	0,13	0,16	0,18	н/о
Yb	43,1	37,1	24,1	0,43	0,36	0,77	0,2	0,62	1,21	1,34	0,7	1,58	1,63	0,05
Lu	10,6	6,25	3,73	0,093	0,061	0,12	0,03	0,09	0,18	0,22	0,1	0,33	0,32	0,01
(La\Sm) _N	306,9	30,2	5,2	5,36	8,1	9,87	3,5	4,7	3,3	3,8	7,6	6,0	6,2	4,6
(La\Yb) _N	969,6	53,5	14,3	11,0	37,6	24,4	6,48	12,3	5,7	6,6	41,1	19,7	19,9	12,8
Eu\Eu*	0,148	0,15	0,037	0,045	0,052	0,042	0,034	0,06	0,065	0,062	0,057	0,062	0,061	0,035

Примечание. Анализы выполнены в Лабораториях ИМГРЭ (г. Москва) и ИГиМ СО РАН (г. Новосибирск) методом ICP-MS. Нормализация некоторых РЗЭ проведена относительно концентраций в хондрите по (Anders, Greevesse, 1989). Eu* = (Sm_N + Gd_N)/2. Апатит-содержащие руды: 1 - ортит; 2 - апатит 1 генерации; 3 - апатит 2 генерации; 4, 5 - пирит; 6 - магнетит; 7, 8 - спекулярит 1 генерации; 9, 10 - спекулярит 2 генерации; безапатитовые руды: 11 - спекулярит 1 генерации; 12, 13 - магнетит, 14 - десмин.

Рис. 1. Спектр распределения РЗЭ в ортите Холзунского рудного поля.

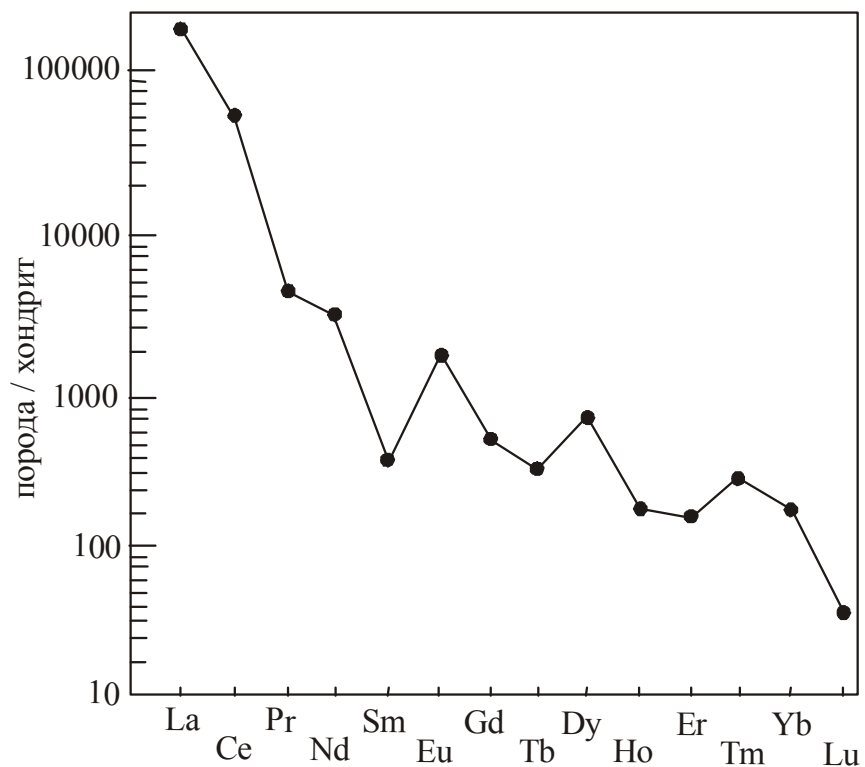
Концентрации РЗЭ нормированы по хондриту (Anders, Greevesse, 1989).

**ГЕОХИМИЯ РЕДКИХ
ЗЕМЕЛЬ МИНЕРАЛОВ
ХОЛЗУНСКОГО РУДНОГО
ПОЛЯ.**

Концентрации редких земель в минералах рудного поля приведены в табл.1. Анализ таблицы показывает, что апатитовые руды Холзунского рудного поля характеризуются самыми высокими

концентрациями редкоземельных элементов. В них появляются такие минералы, как ортит, монацит, цериевый эпидот. Для них характерны самые высокие отношений $(La/Sm)_N$ и $(La/Yb)_N$, указывающие на фракционированный тип распределения РЗЭ. Отношение Eu/Eu^* в ортите самое высокое и образует положительную аномалию в спектре распределения РЗЭ на хондрит-нормализованной кривой (рис.1). При этом микроскопические данные свидетельствуют, что максимальные концентрации РЗЭ в общей последовательности минералообразования характерны для самых ранних эпизодов становления руд, где и формировались фторапатит, минералы редких земель, магнетит, пирит, ранние генерации спекулярита. При этом замечено, что эта ассоциация приурочена к самому нижнему стратиграфическому уровню оруденения в пределах Холзунского рудного поля. В верхних горизонтах появляются минералы полиметаллической ассоциации – пирит-сфалерит-галенитовые. Они же локализируются на латеральных выклинках рудоносных горизонтов.

Безапатитовые руды намного беднее суммой РЗЭ. Однако в некоторых минералах происходит относительное обогащение некоторыми редкими землями. Так, сравнение спекулярита 1 генерации в апатитовых рудах со спекуляритом в безапатитовых рудах свидетельствует об относительном обогащении поздней генерации (в безапатитовых ассоциациях) всеми редкоземельными элементами. Аналогичная картина наблюдается для магнетита (табл. 1). На раннем этапе происходило заметное селекционирование и обогащение всей группой РЗЭ в самых ранних генерациях за счёт резкого обеднения флюидов редкими землями, которые в значительном объёме израсходовались при кристаллизации собственно редкоземельных минералов (ортита, монацита, ксенотима, цериевого эпидота). Это хорошо заметно в ранней и поздней генерации апатита. Во второй генерации апатита заметно более низкие концентрации всех РЗЭ. Параллельно происходит снижение соотношений лёгких к средним и лёгких к тяжёлым редких земель. Почти на порядок снижается и отношение Eu/Eu^* во второй генерации апатита по сравнению с первой. Наконец, самыми низкими концентрациями всех редкоземельных элементов характеризуются минералы заключительных стадий формирования руд. К числу таких минералов относится десмин и кальцит, образующие прожилки, секущие все ранее сформированные минеральные агрегаты. Скорее всего, эти прожилки относятся к гидротермальной стадии минералообразования, происшедшей позднее основного эксгальационно-осадочного этапа.



2. Отношения некоторых РЗЭ и значения тетрадного эффекта в ортитах месторождений Холзун и Ортитовая Сопка

Отношения РЗЭ и тетрадный эффект	Холзун	Ортитовая Сопка		Хондрит
		Ядро кристалла	Периферия кристалла	
(La/Sm) _N	306,7	301,1	328,8	1,63
(La/Yb) _N	967,7	854,1	856,5	1,51
(La/Lu) _N	6100,6	5038,4	5184,8	0,975
Y/Ho	138,3	147,1	184,3	29,0
Eu/Eu*	0,15	0,14	0,18	0,32
TE _{1,3}	0,84	1,52	1,80	-

Примечание. TE_{1,3} – тетрадный эффект по (Irbert, 1999). Eu* = (Sm_N + Gd_N)/2. Концентрации РЗЭ нормированы по хондриту [4].

Для выяснения геохимических особенностей апатит-магнетитового оруденения Холзунского рудного поля проведено сравнение составов ортитов из месторождений Холзун и Ортитовая Сопка (пегматитовый объект среди гранитов Саввушинского массива) с вычислением тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ. Результаты сравнения приведены в табл. 2.

Следует отметить, что все разновидности ортитов в проанализированных месторождениях относятся к иттроортиту с содержанием иттрия от 7,5 до 8,2 %. Во всех случаях отмечаются резкие преобладания лёгких РЗЭ над средними и тяжёлыми, что подтверждается соотношениями, приведенными в таблице. Эти же соотношения намного превышают таковые в хондритах, указывая на значительную трансформацию редкоземельных элементов в геологических процессах, связанных с влиянием флюидов, обогащённых фтором и фторкомплексами (в пегматитовом процессе и в составе эксгальций, формировавших апатит-магнетитовые руды с фторапатитом). Соотношение Eu/Eu* в проанализированных ортитах намного меньше, чем в хондритах. В пегматитовом ортите наблюдается отчётливый тетрадный эффект фракционирования, намного превышающий пороговое значение 1,1 для выпуклого типа кривой распределения РЗЭ, характерного для М-типа лантанидного фракционирования. В ортите эксгальциционно-осадочного типа руд (Холзун) выявляется слабо проявленный W- тип фракционирования с вогнутой кривой распределения РЗЭ (рис. 1). На хондрит-нормализованной кривой выявляются два пика позитивных аномалий по европию и диспрозию. Негативная аномалия на этой кривой наблюдается для самария. При этом тетрадный эффект сопровождается изменением отношений некоторых элементов, не характерных и резко отличающихся от таковых в хондритах. Эти «не характерные» отношения элементов возникают в высоководных системах, обогащённых летучими компонентами, в первую очередь, фтором. В водных растворах ионы РЗЭ взаимодействуют с различными лигандами, связанными с комплексобразованием при участии молекул воды. Минеральное фракционирование как причина тетрадного эффекта не подтверждается расчётами Релеевского фракционирования, которое также не может объяснить тренды Eu/Eu* (Irbert, 1999). Кроме того, ранее считалось, что появление позитивной аномалии по европию в магматических образованиях связывалось с явлением отсутствия фракционирования полевых шпатов. В наших примерах о фракционировании полевых шпатов не может идти речи, особенно для ортитов из эксгальционно-осадочных руд Холзуна. Ранее нами показано, что проявление тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ связано с высоководными, обогащёнными летучими компонентами флюидами, в первую очередь, фтором, бором, углекислотой, фосфором, хлором. Такие летучие компоненты имеют значительное влияние на эволюцию магматизма, температур солидуса и ликвидуса магм, вязкости силикатного расплава, кристаллизационной последовательности минералов из расплавов, а также на поведение рассеянных элементов и их разделение между флюидом и расплавом. Фракционирование РЗЭ при тетрад-эффекте происходит с участием сложных комплексных соединений - фтор-комплексов. При этом намечается корреляция величины тетрадного эффекта и степени обогащённости системы фтором. Выявление тетрадного эффекта в различных геологических образованиях важно потому, что он сопровождается

ется характерными аномальными параметрами флюидного режима в магматических, метасоматических, пневматолито-гидротермальных, эксгальационно-осадочных и гидротермальных процессах, определяющих их потенциальную рудогенерирующую способность.

Приведенные данные показывают, что фракционирование РЗЭ происходит и при процессах ликвации в глубинном рудогенерирующем очаге, последующем эксгальационно-осадочном рудоотложении, в результате которых сформировались руды Холзунского рудного поля. При этом выявляется W-тип тетрадного эффекта фракционирования, протекающий при значительном участии фторидных, фосфорных и водных флюидов, фиксируемых на месторождении Холзун, а также во всех проявлениях рудного поля, в том числе и при формировании своеобразного редкоземельного оруденения.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выявленные аномально высокие концентрации редких земель в минералах Холзунского рудного поля имеют практический выход и позволяют предложить несколько перспективных решений.

В первую очередь, это касается площади Холзунского рудного поля, где помимо коренных проявлений редких земель имеются коры выветривания, особенно хорошо проявленные на Перевальном участке. По аналогии с латеритными корами выветривания в рудном поле Лонгнан (провинции Янгси в Китае), где удельная продуктивность иттрия составляет 0,2 т/кв.км, прогнозные ресурсы иттрия категории РЗ для Холзунского рудного поля площадью 30 кв. км и коэффициенте геологического подобия 0,5 составят $Q = 30 \times 0,2 \times 0,5 = 3$ т.

Второй важный момент состоит в том, что к востоку от Холзунского рудного поля на Российской территории в верховьях р. Хайдуна и его притоков выделяется прогнозируемое Верхнее-Хайдунское рудное поле площадью 32 кв. км, где имеется несколько проявлений железных руд. Этот объект сопровождается интенсивной магнитной аномалией, не уступающей аналогичной аномалии на Холзуне. Кроме того, единичными маршрутами в прогнозируемом объекте установлено наличие нижнего рудоносного горизонта, аналогичного таковому в Холзунском рудном поле. Как указывалось выше, для этого уровня характерны наиболее высокие концентрации редкоземельных элементов в рудах и минералах.

Литература

1. Гусев А.И. Металлогения золота Горного Алтая и южной части Горной Шории. – Томск, 2004. – Изд-во СТТ. - 308 с.
2. Гусев Н.И., Николаева Л.С., Гусев А.И. Верхнепалеозойские и мезозойские железо-оксидные медно-золоторудные системы юго-запада Алтае-Саянского региона Сибири // Региональная геология и металлогения, 2006, № 29, с. 116-126.
3. Гусев А.И., Гусев Н.И. Железо-оксид-медно-золоторудный класс месторождений западной части Алтае-Саянской области и прилегающих территорий // Современные проблемы геологии. Новокузнецк, 2007, с.49-57.
4. Anders E., Greevesse N. Abundences of the elements: meteoric and solar // Geochim. Cosmochim. Acta. 1989, v.53, pp. 197-214.
5. Gandhi S.S. Magmatic-hydrothermal Fe oxide±Cu±Au deposits: classification for a digital database and an overview of selected districts // IAVCEI General Assembly 2004, Pucyn, Chile, CD-ROM, Abstracts01a, p.169.
6. Gusev A.I. The types and geochemistry of REE mineralization of Gornyi and Rudnyi Altai // Геохимия и рудообразование радиоактивных, благородных и редких металлов в эндогенных и экзогенных процессах. Улан-Удэ, 2007, с. 79-83.
7. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granitic suites // Geochim. Cosmochim Acta, 1999, v. 63, pp. 489-508.
8. Marschik R., Fontbote L. The Candelaria – Punta del Cobre Iron Oxide Cu-Au (Zn-Ag) Deposits, Chile // Econ. Geol., 2001, v.96, pp. 1799-1826.