

# ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАГНЕТИТА КУЗНЕЦОВСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГОРНОГО АЛТАЯ

Гусев А.И., Кончакова С.Я.

Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина, г. Бийск

## ВВЕДЕНИЕ

Магнетит с эмпирической формулой  $FeFe_2O_4$  входит в группу шпинели, широко варьирует по составу и является распространённым акцессорным минералом в изверженных, осадочных и метаморфических породах. Он также является и главным рудным минералом в магматических и гидротермальных месторождениях [Dupuis, Beaudoin, 2011; Dare et al., 2014; Nadoll et al., 2014]. Магнетит имеет такую же структуру как и шпинель (сочетание тетраэдров и октаэдров, причём каждая вершина является общей для одного тетраэдра и трёх октаэдров) и обычно в неё входит большое число катионов (изоморфных примесей), таких как Mg, Al, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Ga [Dupuis and Beaudoin, 2011; Nadoll et al., 2014]. Изучение показало, что структуры и состав магнетита являются чувствительными к физико-химическим условиям, при которых формируется минерал [Nash and Crecraft, 1985; Lindsley and Banerjee, 1991; Harlov, 1992, 2000; Toplis and Corgne, 2002; Dupuis and Beaudoin, 2011; Dare et al., 2014; Nadoll et al., 2014]. Недавнее изучение магнетита в магматических и гидротермальных рудных месторождениях привело к созданию нескольких дискриминационных диаграмм по рассеянным элементам, которые значительно увеличили возможности реставрации происхождения и выявления отличий магнетита (изверженного относительно гидротермального) и различий среди типов месторождений по составу магнетита [Dupuis and Beaudoin, 2011; Dare et al., 2014; Nadoll et al., 2014, 2015; Knipping et al., 2015].

Цель исследования – осветить геохимические особенности магнетита Кузнецовского месторождения и выявить некоторые генетические черты его формирования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Кузнецовское скарново-железорудное месторождение с золотом расположено в 2-3 км к юг-юго-востоку от пос. Кузнецово на западе Горного Алтая. Открыто Л. М. Пожарицким в 1934 г. Рудные тела сложены кварц-актинолит-гранатовыми с эпидотом и кальцит-актинолит-геденбергитовыми скарнами с магнетитом и редкими сульфидами [Гусев, 2016]. Месторождение состоит из нескольких рудных тел и линз со скарново-магнетитовым оруденением

### 1. Химический состав магнетита (в мас. %).

Оксиды	1 генерация		2 генерация	
	1	2	3	4
SiO <sub>2</sub>	0,13	0,12	0,15	0,18
TiO <sub>2</sub>	0,03	0,04	0,02	0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25	0,22	0,3	0,35
FeO <sub>t</sub>	85,9	85,8	93,3	93,1
MnO	0,17	0,2	0,05	0,03
MgO	10,1	9,3	6,5	6,3
CaO	0,13	0,14	0,1	0,09
ZnO	0,05	0,06	0,01	0,01
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,25	0,3	0,18	0,22

(10 рудных тел) мощностью 0,45–11,6 м с содержанием железа 32,2–55,12, редко 66,3 % (в среднем 47,1 %), а в окисленных рудах – до 60 % и выше.

В геденбергит-магнетитовых рудах с сульфидами установлено золото (0,1-3,6 г/т), серебро (2-45 г/т), платина (0,5-2 г/т), палладий (0,3-1,5 г/т), иттрий (0,05-0,5 %), иттербий (0,03-0,1 %). Спектральным анализом в рудах выявлены также (%): кобальт 0,01-0,1, никель 0,01-0,08, медь 0,08-0,5, свинец 0,001-0,03, олово 0,001-0,05, хром 0,003-0,03, германий 0,001-

2. Концентрации элементов-примесей в магнетите Кузнецовского месторождения Алтая (г/т)

Элементы	1	2	3	4	5	6	7	8
Be	0,6	0,5	0,4	3,04	2,04	3,34	2,9	2,6
Ti	178,6	180,1	177,2	37,67	80,02	75,65	40,1	39,5
V	460,4	462,2	461,8	305,61	882,6	457,43	502	506
Cr	50,3	50,9	51,2	7,204	12,239	15,76	14,7	13,6
Mn	820	905	926	168,305	153,501	198,54	176	165
Co	72	73	71	11,731	39,057	43,67	12,3	11,6
Ni	19,4	20,1	21,2	18,68	23,5	21,67	20,3	18,4
Cu	83,5	86,1	90,5	89,39	26,78	37,56	49,1	45,2
Zn	156	158	163	28,36	65,11	56,13	36,7	35,8
Ga	11,6	12,1	12,2	8,44	5,76	8,6	6,8	7,1
Rb	16,7	17,9	18,1	25,75	1,48	9,76	5,3	6,5
Sr	211	215	214	34,65	496,28	145,77	135,7	128,5
Y	4,5	5,1	4,9	2,45	1,88	3,56	3,9	4,0
Zr	85	84,6	83,9	6,87	113,47	54,72	55,1	57,3
Nb	4,4	4,5	4,6	2,102	1,64	3,45	3,5	3,4
Mo	154	148	152	28,2	9,68	35,83	12,7	14,6
Cs	12,9	13,1	14,3	12,6	3,76	14,89	13,5	13,0
Ba	176	174	178	323,02	319,8	376,4	384,1	382,6
La	0,21	0,23	0,22	4,38	4,17	4,39	4,5	4,2
Ce	2,6	2,65	2,61	0,54	0,48	1,26	1,32	0,49
Pr	0,05	0,053	0,051	1,634	0,976	1,765	1,8	0,98
Nd	0,2	0,25	0,22	6,22	3,486	7,876	8,1	3,5
Sm	0,05	0,06	0,055	0,987	0,393	1,235	1,3	0,4
Eu	0,012	0,014	0,013	0,353	0,91	0,543	0,55	0,92
Gd	0,045	0,05	0,051	0,769	0,307	0,879	0,9	0,31
Tb	0,012	0,013	0,011	0,235	0,046	0,453	0,46	0,046
Dy	0,06	0,07	0,08	0,12	0,243	0,354	0,34	0,25
Ho	0,02	0,03	0,025	0,078	0,064	0,126	0,13	0,065
Er	0,06	0,08	0,09	0,183	0,176	0,321	0,33	0,18
Tm	0,015	0,018	0,016	0,10	0,10	0,541	0,56	0,14
Yb	0,15	0,18	0,16	0,133	0,227	0,453	0,51	0,25
Lu	0,015	0,017	0,018	0,016	0,037	0,0,27	0,03	0,04
Hf	2,5	2,4	2,3	0,045	2,682	4,571	3,7	3,6
Ta	0,03	0,03	0,04	0,193	0,250	0,765	0,75	0,74
W	88,9	90,1	91,4	61,82	9,155	79,61	65,3	59,3
Pb	554,7	562	571	706,22	96,42	678,5	134,7	105,5
Th	0,65	0,8	0,77	0,365	0,608	0,765	0,8	0,9
U	1,13	1,3	1,2	1,788	0,538	3,87	3,9	4,2
∑ REE	7,75	8,81	8,32	18,18	13,5	23,78	23,73	15,77
(La/Yb) <sub>N</sub>	0,93	0,87	0,94	21,7	12,1	6,4	5,99	11,4
Eu/Eu*	0,8	0,78	0,74	1,21	7,83	1,53	1,48	7,6
TE <sub>1,3</sub>	1,72	1,5	1,59	0,5	0,54	0,84	0,31	0,54
V/Ti	2,57	2,6	2,6	8,2	11,0	6,0	12,5	12,8
Ni/Cr	0,38	0,39	0,41	2,6	1,9	1,38	1,38	1,35

Примечание. Анализы выполнены методом ICP-MS в Лаборатории ИМГРЭ (г. Москва). Значения РЗЭ нормированы по хондриту по [McDonough, Sun, 1995]. TE<sub>1,3</sub> – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ как среднее между первой и третьей тетрадами по [Irber, 1999]. Магнетит Кузнецовского месторождения: 1-3 – 1 генерация, 4-8 – 2 генерация.

0,04, молибден 0,03-0,09. В целом месторождение отнесено к железо-окисно-медно-золоторудному (IOCG) типу.

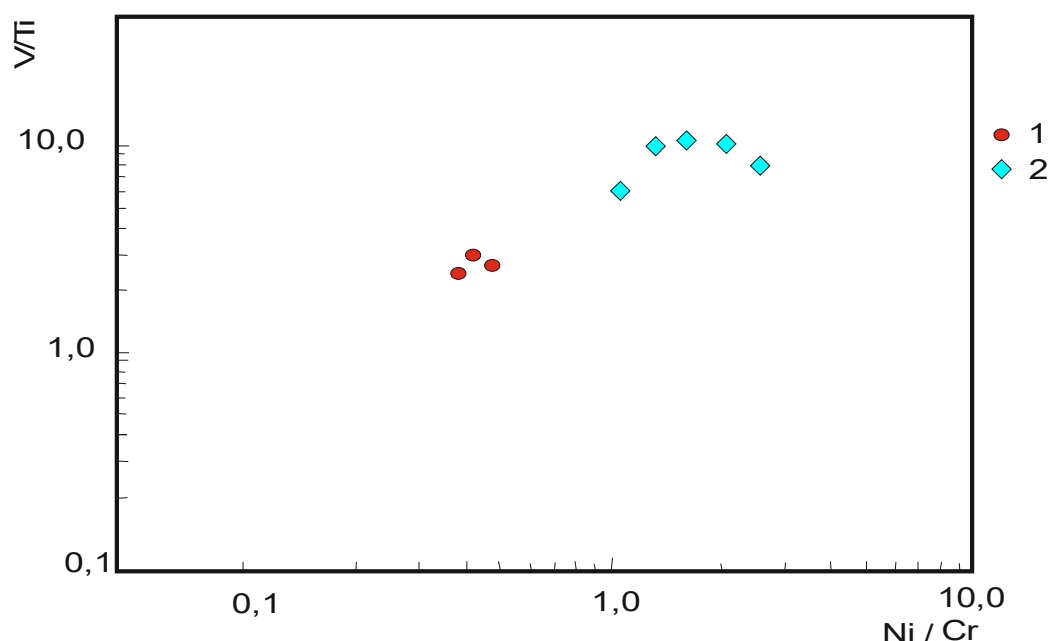
Выделены 2 генерации магнетита: ранняя – в виде вкрапленности и гнёзд, и поздняя, слагающая сплошные массивные руды. Химический состав 4 образцов магнетита обеих генераций приведен в табл. 1. Следует отметить, что обе генерации характеризуются весьма низкими содержаниями титана, кальция, цинка. При этом в ранней генерации более высокие концентрации оксидов марганца, магния, кальция и цинка. Состав элементов-примесей в генерациях магнетита приведен в табл. 2.

Ранняя генерация магнетита характеризуется относительно пониженными значениями суммы РЗЭ, концентрациями Ва, негативной европиевой аномалией и более высокими содержаниями Ti, Cr, Mn, Co, Zn, Ga, Mo. В магнетите ранней генерации проявлен тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М-типа (от 1,5 до 1,72), свидетельствующий о большой роли фтор-комплексов при кристаллизации минерала. Поздняя генерация отличается более высокими суммарными концентрациями РЗЭ, позитивной аномалией европия, высокими отношениями  $(La/Yb)_N$ , указывающими на сильное фракционирование РЗЭ. В поздней генерации наблюдаются повышенные концентрации Ва, Yb, суммы редких земель и проявлен ТЭФ РЗЭ W-типа ( $TE_{1,3}$  менее пограничного значения 0,9 и варьирует от 0,31 до 0,84), указывая на большую роль водной составляющей при кристаллизации второй генерации магнетита.

По соотношениям V/Ti и Ni/Cr генерации магнетита различаются так же. На диаграмме наглядно видны контрастные кластеры локализации обеих генераций магнетита (рис. 1).

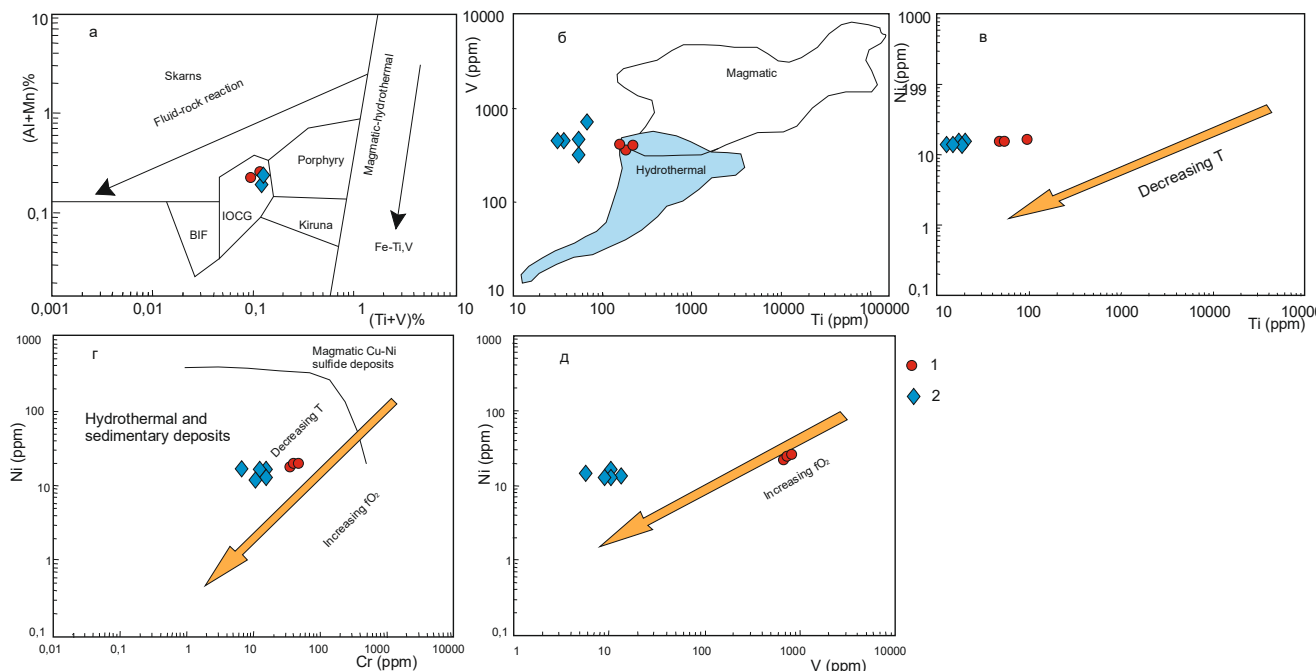
На серии диаграмм составы магнетита локализуются в поле месторождений железо-окисно-медно-золоторудного класса (IOCG) и в области гидротермального генезиса (рис. 2, а-б). Причём ранняя генерация локализуется весьма близко к магматическому полю происхождения магнетита (рис. 2, б). На остальных диаграммах по соотношениям микроэлементов составы магнетита закономерно показывают, что от ранней генерации к поздней происходит снижение температуры кристаллизации и увеличение фугитивности кислорода (рис. 2, в-д).

Известно, что проблема кислотности-основности магматогенных флюидов и гидротермальных растворов относится к узловым и наиболее актуальным проблемам эндогенного



**Рис. 1. Диаграмма V/Ti – Ni/Cr для магнетита Кузнецовского месторождения.**

Магнетит месторождения: 1 – ранняя генерация, 2 – поздняя генерация.



**Рис. 2. Диаграммы составов магнетита Кузнецовского месторождения.**

а – диаграмма (Al+Mn, %) – (Ti+v, %) по [Nadolletal., 2014]; б — диаграмма V – Ti (г/т) по [Knippingetal., 2015]; диаграммы в- Ni – Ti (г/т); г - Ni-Cr (г/т); д – Ni – V, (г/т) по [Dareetal., 2012]. Skarns – скарны; Fluid-rockreaction – тренд флюид-породные взаимодействия; BIF–слоистая железная формация; IOCG – железно-оксидно-медно-золоторудный класс месторождений; Porphyry – порфировые месторождения; Kiruna – месторождения типа Кируна Вара; Magmthic – магматический; hydrothermal – гидротермальный; Magmatic- магматический; Hydrothermal – гидротермальный; DecreasingT – тренд уменьшение температуры; IncreasingO<sub>2</sub> - увеличение фугитивности кислорода; Hydrothermalandsedimentarydeposits – гидротермальные и осадочные месторождения; MagmaicCu-Nisulfidedeposits – магматические медно-никелевые сульфидные месорождения. Остальные условныенарис. 1.

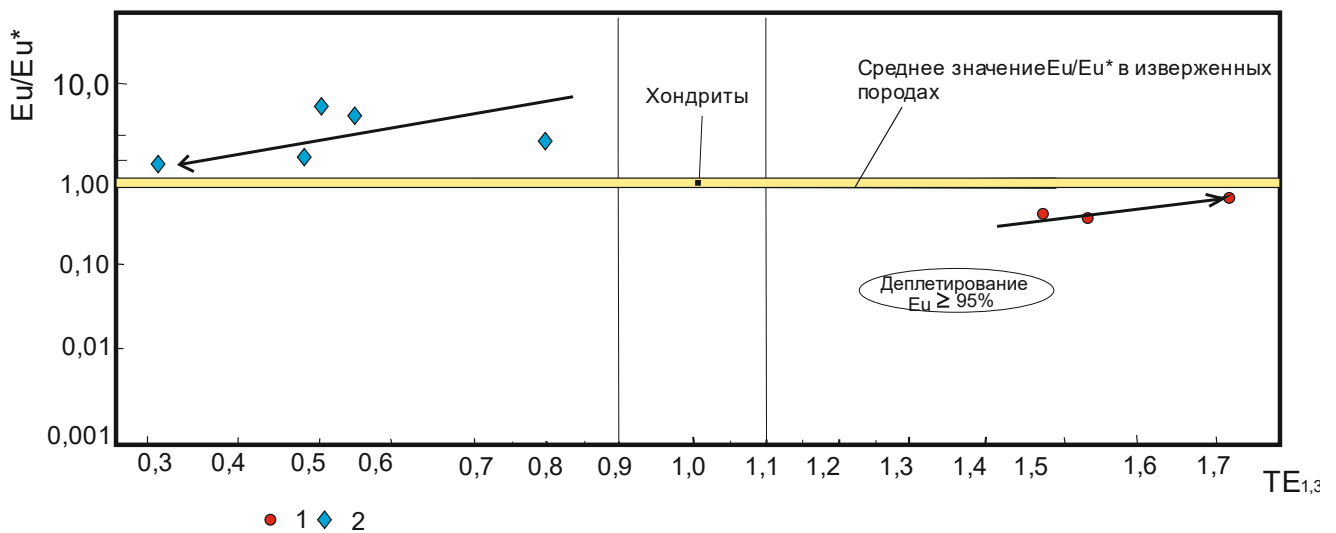
рудообразования [Жариков, 1967]. Особое место в проблеме кислотности-основности гидротерм занимают способы и меры сравнительной оценки кислотно-основных характеристик минералов. Одним из путей решения этой проблемы является определение преобладающей роли тех или иных летучих компонентов, играющих решающую роль в переносе рудных элементов и отложении их в местах концентрированного оруденения. Такую задачу можно решать путём определения тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ, тип которого и величины определяются активностью тех или иных летучих комплексов в гидротермальных образованиях.

На диаграмме  $Eu/Eu^* - TE_{1,3}$  обе генерации магнетита занимают разное положение и противоположную направленность изменений трендов  $Eu/Eu^*$  (рис. 3). Для ТЭФ РЗЭ М-типа, проявленного для ранней генерации (правая часть диаграммы), наблюдается тренд увеличения ТЭФ с увеличением величин отношений  $Eu/Eu^*$ , что можно интерпретировать увеличением кислотности среды минералообразования [Гусев, 2019]. Для поздней генерации тренд уменьшения величин  $Eu/Eu^*$  коррелируется с уменьшением значений  $TE_{1,3}$ , что обусловлено увеличением основности среды кристаллизации магнетита.

Расчёт условного потенциала ионизации [Жариков, 1967] магнетита 1 генерации с учётом более высоких концентраций в нём Ti, Cr, Mn, Co, Zn, Ga, Mo (условный потенциал ионизации  $y = 191,2$ ) и 2 генерации с повышенными концентрациями Ba, Yb ( $y = 189,3$ ) также дают более кислотную среду кристаллизации ранней генерации магнетита и основную – второй генерации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнетиты разных генераций кристаллизовались в различных физико-химических условиях, обусловивших и отличающийся состав, и появление других признаков. Ранняя



**Рис. 3. Диаграмма  $Eu/Eu^*$  -  $TE_{1,3}$  для магнетита Кузнецовского месторождения.**

Условные обозн. см. на рис. 1.

генерация магнетита характеризовалась повышенными концентрациями Ti, Cr, Mn, Co, Zn, Ga, Mo, отрицательной европиевой аномалией и проявлением высоких значений ТЭФ РЗЭ М-типа, что обеспечивалось активностью фтор-комплексов и относительно кислой средой кристаллизации. Поздняя генерация магнетита отличается повышенными содержаниями Ba, Yb, суммы редких земель, положительной европиевой аномалией, проявлением W-типа ТЭФ РЗЭ, более высокими значениями водных компонентов в скарновом процессе и повышенной основностью среды кристаллизации. По составу магнетита Кузнецовское месторождение относится к железно-окисно-медно-золоторудному классу месторождений. Кристаллизация ранней генерации магнетита происходила при более высокой температуре и более низкой фугитивности кислорода.

### Литература

- Гусев А.И. Кузнецовская магмо-рудно-метасоматическая система Западного Алтая // Геология и минеральные ресурсы Сибири, 2016, № 1, с. 104-114.
- Гусев А.И. Геохимия минералов Алтая. - Бийск, АГГПУ, 2019. – 185 с.
- Жариков В.А. Кислотно-основные характеристики минералов // Геология рудных месторождений, 1967, № 5, с. 75-89.
- Dare S.A.S., Barnes S.J., Beaudoin G. Variation in trace element content of magnetite crystallized from a fractionating sulfide liquid, Sudbury, Canada: implications for provenance discrimination // Geochim. Cosmochim. Acta, 2012, v. 88, p. 27–50.
- Dare S. A. S., Barnes S., Beaudoin G., Merric J., Boutroy E., Potvin-Doucet C. Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators // Miner. Deposita, 2014, v. 49, p. 785–796.
- Dupuis C., Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types // Miner. Deposita, 2011, v. 46, p. 319–335.
- Harlov D. E. Comparative oxygen barometry in granulites, bamble sector, SE Norway // J. Geol., 1992, v. 100, p. 447–464.
- Harlov D. E. Titaniferous magnetite-ilmenite thermometry and titaniferous magnetite-ilmenite-orthopyroxene-quartz oxygen barometry in granulite facies gneisses, Bamble Sector, SE Norway: implications for the role of high-grade CO<sub>2</sub>-rich fluids during granulite // Contrib. Mineral. Petr., 2000, v. 139, p. 180–197.
- Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // Geochim. Cosmochim. Acta, 1999, v. 63, № 3/4, p. 489-508.

*Knipping J.L., Bilenker L.D., Simon A.C., Reich M., Barra F., Deditius A.P., Wlle M., Heinrich C.A., Holtz F., Munizaga R.* Trace elements in magnetite from massive iron oxide-apatite deposits indicate a combined formation by igneous and magmatic-hydrothermal processes // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2015, v. 171, p. 15-38.

*Lindsley D.H., Banerjee S.* Oxide minerals: petrologic and magnetic significance // *Rev. Mineral., Mineral. Soc. Am.*, 1991. – 509 p.

*McDonough W.F., Sun S.* The composition of the Earth // *Chem. Geol.*, 1995, v. 120, p. 223-253.

*Nadoll P., Angerer T., Mauk J.L., French D. Walshe J.* The chemistry of hydrothermal magnetite: a review // *Ore Geol. Rev.*, 2014, v. 61, p. 1–32.

*Nadoll P., Mauk J.L., Leveille R.A., Koenig A.E.* Geochemistry of magnetite from porphyry Cu and skarn deposits in the southwestern United States // *Miner. Deposita*, 2015, v. 50, p. 493-515.

*Nash W.P., Crecraft H.R.* Partition coefficients for trace elements in silicic magmas // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1985, v. 49, p. 2309–2322.

*Toplis M.J., Corgne A.* An experimental study of element partitioning between magnetite, clinopyroxene and iron-bearing silicate liquids with particular emphasis on vanadium // *Contrib. Mineral. Petr.*, 2002, v. 144, p. 22–37.