

Гусев Анатолий Иванович,
Доктор геолого-минералогических наук, профессор,
Бийский филиал им. В.М. Шукшина
ФГБОУ ВО Алтайский государственный педагогический университет
Gusev Anatoliy Ivanovich,
Biysk Branch named after V.M. Shukshin,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher
Education Altai State Pedagogical University

Шубин Тимофей Максимович,
Студент, Бийский филиал им. В.М. Шукшина,
ФГБОУ ВО Алтайский государственный педагогический университет
Shubin Timofey Maksimovich,
Biysk Branch named after V.M. Shukshin,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher
Education Altai State Pedagogical University

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАГНЕТИТА ХОЛЗУНСКОГО
ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГОРНОГО АЛТАЯ
GEOCHEMICAL PECULIARITIES OF MAGNETITE
CHOLZUN IRON DEPOSIT OF GORNYU ALTAJ**

Аннотация. В статье рассматриваются геохимические особенности магнетита железорудного Холзунского месторождения Горного Алтая. Выделены две генерации минерала, отличающиеся составами элементов-примесей, различными степенями фракционирования редкоземельных элементов, формами проявления европиевой аномалии. Месторождение Холзун впервые отнесено к железо-окисно-медно-золоторудному и железорудному порфиловому типам месторождений.

Abstract. Geochemical peculiarities of magnetite iron deposit Cholzun of Gornyy Altaj view in paper. Two generation of mineral distinction by composition of element-admixture, different degrees fractionation of rare earth elements, form development europium anomaly detach. Deposit Cholzun the first time carry to iron-oxide-copper-gold and iron porphyry types deposits.

Ключевые слова: Горный Алтай, магнетит, элементы-примеси, тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов M - и W- типов.

Keywords: Gornyy Altaj, magnetite, elements-admixtures, tetrad effect fractionation of rare earth elements M - and W- types.

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, Beaudoin, 2011; Nadoll et al., 2014]. Изучение минерала показало, что структуры и состав магнетита являются чувствительными к физико-химическим условиям, при которых формируется минерал [Nash, Crecraft, 1985; Lindsley, Banerjee, 1991;



Harlov, 1992, 2000; Toplis, Corgne, 2002; Dupuis, 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].

Актуальность исследований Холзунского железорудного месторождения определяется тем, что оно характеризуется значительными запасами железа и является резервной базой Новокузнецкого и Кемеровского металлургических комбинатов

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

Холзунское месторождение расположено на границе Республики Алтай и Казахстана на водоразделе рек Хайдун и Таловый Тургусун. Район месторождения локализован в пределах Северо-Восточной зоны смятия, по которой проходит граница каледонид Алтае-Саянской и герцинид Зайсанской складчатых областей.

Рудовмещающая толща Холзунского ванадий содержащего апатит-магнетитового месторождения сложена вулканогенно-осадочными образованиями коргонской свиты (D1-2 krg) (рис. 1).

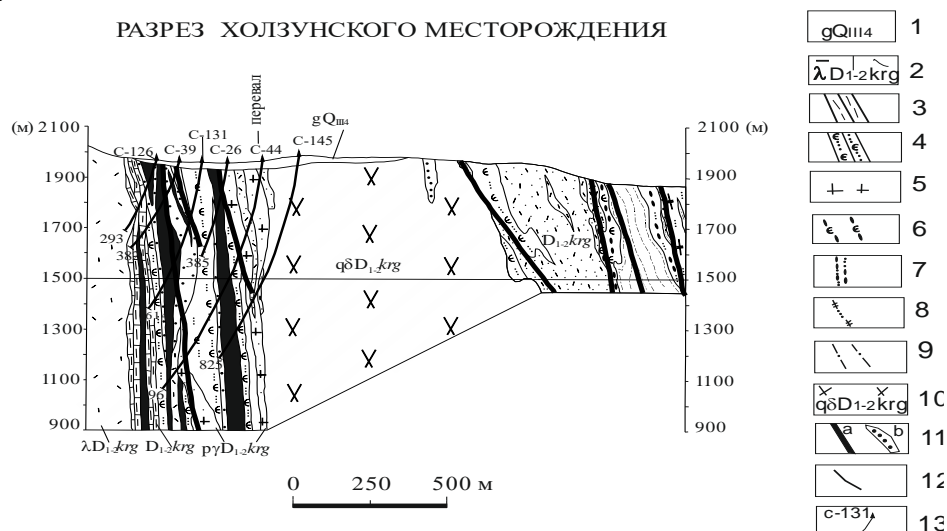


Рисунок 1. Геологический разрез месторождения Холзун

1- Гляциальные отложения; 2- трахириолиты; 3- кварц-альбит-биотитовые сланцы; 4- туфопесчаники; 5- плагиограниты; 6 – туфогравелиты; 7 –спёкшиеся туфы риолитов; 8- гематит-содержащие породы; 9-алевролиты; 10- кварцевые диориты коргонской свиты; 11- руды: а- апатит-магнетитовые с магнетитом 2 генерации; б – гематит-магнетитовые руды с магнетитом 1 генерации. 12- разломы, 13- скважины и их номера.

В составе холзунского рудоносного горизонта выделяются две толщи: нижняя осадочно-вулканогенная с эффузивными породами существенно трахитового, пантеллеритового, риолитового, реже трахиандезитового и трахибальтового составов и верхняя вулканогенно-осадочная с эффузивными породами, преимущественно, умеренно-щелочного риолитового состава с редкими комендитами. Обе толщи содержат горизонты и линзы магнетитовых, апатит-магнетитовых, магнетит-гематитовых руд, а также марганценозные горизонты и слои. Главный рудный горизонт, включающий ванадий содержащее Холзунское апатит-магнетитовое месторождение, локализуется в основании



верхней толщ, почти на границе с нижней. Суммарные запасы руд промышленных категорий по месторождению составляют 680,1 тыс. тонн со средним содержанием железа 28,9% и являются резервной базой Новокузнецкого и Кемеровского металлургических комбинатов [Государственная геологическая карта..., 2001; Гусев, Николаева, Гусев, 2008]. Основным материалом для статьи послужили результаты комплексных геолого-съёмочных, геохимических исследований автора при проведении ГДП-200, выполненные в 2004-2008 годах, а также специализированных металлогенических исследований в 2017-2019 годах. Этими и ранними работами установлено, что рудоносный горизонт, вмещающий Холзунское месторождение, протягивается в пределах одноименного рудного поля более чем на 9 км. В региональном плане рудоносный горизонт приурочен к наиболее прогнутой части Коргонского прогиба, вытянутого более чем на 70 км в север-северо-западном направлении. Прогиб располагается среди метаморфизованных пород терехтинского высокобарического позднерифейско-раннекембрийского мегакомплекса.

На месторождении выделяются 2 генерации магнетита. Магнетит 1 генерации слагает магнетит-гематитовые руды, локализующиеся в подошве рудоносного горизонта, а магнетит 2 генерации присутствует в апатит-магнетитовых, альбит-магнетитовых, магнетитовых и пирит-магнетитовых, занимающих основную часть горизонта и тяготеющих к его кровле. Ранняя генерация магнетита имеет октаэдрический габитус выделений и в отражённом свете характеризуется светло-серой окраской с коричневатым оттенком. Поздняя генерация образует разномерные агрегаты (от 0,08 до 3 мм). неправильных зёрен в отражённом свете имеет коричневатую окраску. Химический состав обеих генераций представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав магнетита Холзунского железорудного месторождения

Оксиды/генерации. номера проб	Магнетит 1 генерации			Магнетит 2 генерации			
	X-1	X-2	X-3	X-4	X-5	X-6	X-7
SiO ₂	0,16	0,06	0,12	0,04	0,4	0,23	0,3
TiO ₂	0,12	0,1	0,11	0,5	0,52	0,51	0,53
Al ₂ O ₃	0,25	0,28	0,24	0,35	0,4	0,3	0,38
Fe ₂ O ₃	80,7	79,04	79,16	75,8	75,55	77,5	75,8
FeO	17,76	20,01	19,4	21,9	21,5	20,5	21,4
MnO	0,02	0,01	0,02	0,15	0,13	0,15	0,14
MgO	0,02	0,02	0,03	0,16	0,15	0,17	0,16
CaO	0,27	0,13	0,12	0,4	0,5	0,05	0,5
Na ₂ O	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07
K ₂ O	0,08	0,04	0,01	0,06	0,07	0,05	0,08
H ₂ O	0,07	0,1	0,11	0,12	0,16	0,1	0,15
P ₂ O ₅	0,09	0,07	0,08	0,1	0,17	0,12	0,18
V ₂ O ₅	0,05	0,04	0,06	0,27	0,26	0,26	0,28
Σ	99,68	99,97	99,54	99,91	99,89	100,1	99,97
Be	3,0	2,5	3,1	4,1	5,2	6,7	4,9
Ti	82,0	81,4	83,1	92,4	105,3	109,1	103,5
V	140,4	139,6	138,4	155,6	172,1	180,0	175,8
Cr	1,87	1,7	1,75	5,3	6,1	7,2	8,0
Mn	265,6	266,3	265,1	285,3	297,8	302,0	306,1
Co	16,3	16,2	16,1	17,8	18,5	19,2	18,8
Ni	18,5	18,2	18,4	21,5	25,1	27,1	26,4
Cu	51,4	50,5	51,8	55,1	58,5	60,3	58,9



Zn	56,6	55,2	57,1	62,8	65,3	67,1	66,2
Ga	4,2	4,3	4,5	5,3	6,6	7,0	6,9
Rb	11,4	12,2	12,5	12,8	13,8	15,6	14,7
Sr	46,9	47,5	48,3	41,5	38,4	36,1	35,8
Y	10,1	11,4	12,2	14,3	17,9	18,9	18,0
Zr	9,5	10,1	10,6	10,5	11,7	11,4	12,3
Nb	1,1	1,2	1,3	1,4	1,8	1,9	1,7
Mo	8,0	7,4	7,6	8,1	9,2	9,5	9,4
Cs	6,9	7,1	7,2	6,2	5,9	5,7	4,8
Ba	247,6	245,1	246,5	255,1	277,2	280,2	278,6
La	38,2	35,2	36,7	26,2	26,7	23,5	22,2
Ce	26,1	24,8	25,9	110,7	114,7	112,7	115,7
Pr	3,75	3,6	3,8	4,8	4,6	4,5	4,5
Nd	12,16	11,5	11,7	31,2	32,8	31,7	30,4
Sm	1,77	1,66	1,7	5,3	5,2	5,1	5,0
Eu	0,33	0,32	0,34	1,2	1,3	1,4	1,45
Gd	1,7	1,8	1,75	3,3	3,2	3,5	3,3
Tb	0,64	0,67	0,65	0,82	0,95	0,97	0,96
Dy	0,56	0,58	0,57	3,14	3,2	3,1	3,4
Ho	2,2	2,15	2,0	0,77	0,8	0,85	0,9
Er	0,794	0,8	0,86	2,37	2,5	2,9	2,7
Tm	0,1	0,3	0,26	0,16	0,32	0,36	0,33
Yb	0,765	0,8	0,83	1,58	1,76	1,8	1,78
Lu	0,116	0,2	0,19	0,33	0,4	0,45	0,44
Hf	0,195	0,21	0,2	0,2	0,22	0,23	0,24
Ta	0,089	0,09	0,091	0,1	0,16	0,18	0,19
W	2,5	2,4	2,5	2,8	3,7	4,1	4,0
Pb	127,0	129,1	128,5	125,2	118,6	120,8	119,5
Th	10,87	10,8	10,7	11,5	12,7	11,8	11,8
U	0,926	0,94	0,91	1,1	1,2	1,23	1,22
Σ REE	99,3	95,78	99,45	206,17	218,33	215,73	219,06
(La/Yb) _N	34,3	29,7	29,8	11,3	10,3	8,8	8,5
Eu/Eu*	0,57	0,56	0,59	0,81	0,9	0,96	1,02
TE _{1,3}	0,48	0,5	0,55	1,11	1,14	1,13	1,2

Примечание. В таблице содержания элементов нормализованы по хондриту C1 (McDonough, Sun, 1995). Eu* = (Sm_N + Gd_N)/2. TE_{1,3} – тетрадный эффект фракционирования REE как среднее между первой и третьей тетрадами по (Irber, 1999).

Магнетит 1 генерации характеризуется значительно меньшими концентрациями оксидов Si, Ti, Al, Mn, P, V и суммарными содержаниями редкоземельных элементов, чем магнетит 2 генерации. Последняя характеризуется значительно большими концентрациями FeO и MgO. Обе генерации различаются также заметными отличиями по степени фракционирования лёгких относительно тяжёлых РЗЭ и отношениями Eu/Eu* (табл.1). В первой генерации проявлен тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) РЗЭ W- типа, а во второй – ТЭФ РЗЭ M- типа. Такие отличия по химизму не могли не сказаться и на особенностях генезиса разных генераций магнетита, которые выявляются на приведенных диаграммах (рис. 2).



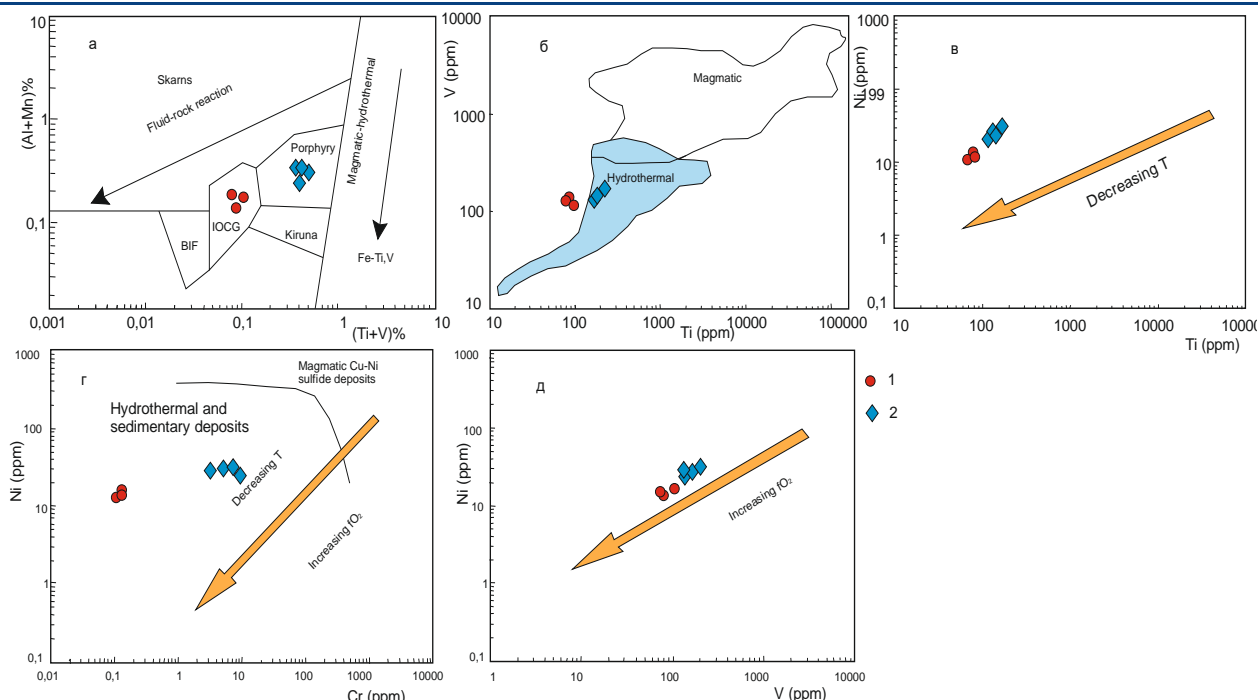


Рисунок 2. Диаграммы соотношений элементов в магнетитах разных генераций месторождения Холзун

a – диаграмма (Al+Mn, %) – (Ti+v, %) по [Nadoll et al., 2014]; *б* – диаграмма V – Ti (г/т) по [Knipping et al., 2015]; диаграммы *в*– Ni – Ti (г/т); *г* – Ni–Cr (г/т); *д* – Ni – V, (г/т) по [Dare et al., 2012]. Skarns – скарны; Fluid-rock reaction – тренд флюид-породные взаимодействия; BIF – слоистая железная формация; IOCG – железно-оксидно-медно-золоторудный класс месторождений; Porphyry – порфиоровые месторождения; Kiruna – месторождения типа Кируна Вара; Magmatic – магматический; hydrothermal – гидротермальный; Magmatic-magmatic – магматический; Hydrothermal – гидротермальный; Decreasing T°C – тренд уменьшение температуры; Increasing fO_2 – увеличение фугитивности кислорода; Hydrothermal and sedimentary deposits – гидротермальные и осадочные месторождения; Magmatic Cu-Ni sulfide deposits – магматические медно-никелевые сульфидные месторождения.

Ранее руды месторождения Холзун были отнесены к месторождениям типа Кируна Вара [Кассандров, Иванов, 1979]. По новым геохимическим данным магнетит 1 генерации относится к классу месторождений железо-оксидно-медно-золоторудного (IOCG), а 2 генерации – к типу порфиоровых железорудных объектов (porphyry) (рис. 2, а). В целом по соотношению ванадия и титана в магнетитах Холзунское месторождение относится к гидротермальным объектам (рис.2, б). При этом от ранней генерации магнетита к поздней происходило увеличение температуры кристаллизации при снижающейся фугитивности кислорода (рис 2, в, г, д). По многим показателям руды и магнетит Холзунского месторождения схожи с Вашаньским порфириновым железорудным месторождением Китая [Liu, Xu, Liu, Huang, 2024].

На основе геохимического изучения различных генераций магнетита руд месторождения Холзун установлено, что ранняя и поздняя генерации различаются по комплексу признаков и могут быть отнесены к железо-оксидно-медно-золоторудному (ранняя генерация) и железорудному порфиоровому типу месторождений (поздняя), что предопределяет различные подходы к поисково-оценочным работам в Холзунском рудном поле и промышленной отработке оруденения объекта.



Список литературы:

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. /Туркин Ю.А., Гусев А.И., Федак С.И и др. – Санкт-Петербург: изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2001. – 194 с.
2. Гусев А.И. Кузнецовская магмо-рудно-метасоматическая система Западного Алтая // Геология и минеральные ресурсы Сибири, 2016. -№ 1. – С. 104-114.
3. Гусев А.И. Геохимия минералов Алтая. – Бийск, АГГПУ, 2019. – 185 с.
4. Гусев Н.И., Николаева Л.С., Гусев А.И. Верхнепалеозойские и мезозойские железоксидные медно-золоторудные системы юго-запада Алтае-Саянского региона Сибири // Региональная геология и металлогения. 2006. – №29. – С.116-129.
5. Кассандров Э.Г., Иванов В.И. Геология и генезис апатит-магнетитовых месторождений Алтая. М., Недра, 1979. – 136 с.
6. 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.
7. Dupuis C., Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. // Miner. Deposita, 2011. – V. 46. – P. 319–335.
8. Harlov D. E. Comparative oxygen barometry in granulites, bamble sector, SE Norway. // J. Geol., 1992. – V. 100. – P. 447–464.
9. 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 CO₂-rich fluids during granulite. // Contrib. Mineral. Petr., 2000. – V. 139. – P. 180–197.
10. 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.
11. Knipping J. L., Bilenker L. D., Simon A. C., Reich M., Barra F., Deditius A. P., Wälle 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.
12. Lindsley D. H., Banerjee S. Oxide minerals: petrologic and magnetic significance. //Rev. Mineral., Mineral. Soc. Am., 1991. – 509 p.
13. Liu Z., Xu W., Liu Ch., Huang D. The ore forming process of Washan porphyrites iron deposits in the Ningwu district associated with iron oxide apatite (IOA) deposits and iron oxide copper gold (IOCG) deposits // Minerals, 2024. – V. 14 (8), 841.
14. Mc Donough W.F., Sun S. The composition of the Earth // Chem. Geol. 1995. -V. 120.- P. 223-253.
15. 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.
16. 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.
17. Nash W. P., Crecraft H. R. Partition coefficients for trace elements in silicic magmas. //Geochim. Cosmochim. Acta, 1985. – V. 49. – P. 2309–2322.
18. 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.

