

## СРАВНЕНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАГНЕЗИТОВ ЮЖНО-УРАЛЬСКОЙ И УДЕРЕЙСКОЙ ПРОВИНЦИЙ

М.Т. Крупенин

Новые геохимические данные, полученные для магнезитовых месторождений Енисейского кряжа (Удере́йская провинция), позволяют провести сравнение геохимических свойств магнезитов этих месторождений с магнезитами Южно-Уральской провинции и сделать некоторые генетические выводы.

Проблема генезиса месторождений кристаллического магнезита в карбонатных толщах докембрия и нижнего палеозоя дискутируется в мировой и отечественной литературе с неослабевающим интересом уже многие десятилетия. Это определяется как важным экономическим значением магнезита, являющимся сырьем для получения высококачественного огнеупорной продукции, без которой немислима современная металлургия, так и немаловажной ролью данного вопроса для рудной геологии. В разработке гипотез образования месторождений кристаллического магнезита странным образом пересекаются различные концепции: от седиментогенной, которую защищают иногда специалисты по петрологии, магматизму, метасоматозу [Генетические типы ..., 1984 и др., Nasedkin et al., 2001], до метаморфогенной [Lugly et al., 2002; Radvanec et al., 2001]. В спектр гипотез, объясняющих образование магнезионосных флюидов, входят и гидротермальная постмагматическая в связи с формированием гранитоидов [Тимесков, 1983], и динамометаморфическая при надвигании высокотемпературных комплексов с высокомагнезиальными породами на относительно холодные карбонатные толщи [Morteani et al., 1982; Lugly et al., 2002], элизионно-катагенетическая с мобилизацией магния из вмещающих глинистых толщ [Анфимов и др., 1983], и инфильтрационно-катагенетическая с эвапоритовым источником магния [Prochaska, 2000; Kaizer et al., 2003].

Ранее нами было показано различие геологических особенностей, петрохимических и геохимических свойств кристаллических магнезитов нижнего и среднего рифея Южно-Уральской провинции, обусловленные особенностями их происхождения [Крупенин, 2003]. Показано, что вкрапленный характер орудене-

ния, повышенная железистость, высокие концентрации CaO, SiO<sub>2</sub>, а также низкая степень фракционирования редкоземельных элементов в магнезитах, вмещаемых среднерифейскими карбонатными толщами, и пониженные значения отношения Y/No, связаны с эпигенетической гидротермальной природой магнезионосных флюидов. В отличие от них, магнезиты, вмещаемые нижнерифейскими доломитовыми толщами, были сформированы за счет высокомагнезиальных флюидов, имеющих непосредственную связь с бассейном седиментации. Как показано в последнее время для магнезитов Саткинского и Бакальского рудных полей, формирование их было связано с прохождением метасоматических растворов, обогащенных магнием в результате эвапоритовой метаморфизации [Kaizer et al., 2003].

Магнезиты Удере́йской провинции, геологические условия размещения и литолого-минералогические свойства которых рассматривались нами ранее [Крупенин и др., 2004], имеют значительное сходство с магнезитами, приуроченными к доломитовым толщам нижнего рифея, и по закономерностям размещения относятся к метасоматическим образованиям. В то же время особенности геологического развития территории Енисейского кряжа в среднерифейское время, в отложениях которого локализованы все магнезитовые месторождения, определили некоторые геохимические отличия магнезитов. Они выражаются, прежде всего, в пониженном, относительно уральских магнезитов, содержании основных примесных окислов SiO<sub>2</sub>, CaO, FeO [Главнейшие магнезитовые ..., 1993] и соответствуют наиболее чистому по содержанию кремнезема и железа составу вмещающих доломитов аладынской свиты среднего рифея. По содержанию закиси железа, составляющему для месторождения Голубое 0.09 %, а для Екатерининского и Верхотуровского изменяющегося в интервале 0.09-0.23 %, магнезиты находятся на уровне лучших мировых стандартов и сравниваются с высококачественными магнезитами из провинции Ляолинь (Китай). Соответствие уровня содержаний петрогенных

окислов в магнезитах и вмещающих доломитах может рассматриваться как доказательство метасоматической природы магнезитов. Для магнезитов Удерейской провинции характерно повышенное содержание фосфора ( $P_2O_5$  от 0.03 до 0.34 %), адекватное повышенному содержанию фосфора во вмещающих доломитах (в среднем составляющем 0.14%). В то же время для магнезитов Южно-Уральской провинции содержания  $P_2O_5$  никогда не превышают 0.04 % и в среднем составляют менее 0,01 %, что соответствует содержанию  $P_2O_5$  и во вмещающих доломитах. Магнезиты обеих провинций характеризуются пониженным содержанием таких микроэлементов, как Ba, Sr, Th, Y и большинство лан-

таноидов (рис. 1) и относительно повышенным содержанием, кроме железа, также марганца и таких элементов, как никель, кобальт, ванадий (по данным Л.П. Урасиной [Главнейшие магнезитовые ..., 1993]). Это, вероятно, объясняется геохимическим сходством поведения сидерофильных элементов, накапливающихся при метасоматическом процессе образования магнезита совместно с магнием.

В распределении лантаноидов, нормированных на хондрит, для обеих провинций наблюдается сходство, обусловленное, вероятно, подобными условиями метасоматического формирования магнезита по доломитовому субстрату в условиях невысоких температур и давле-

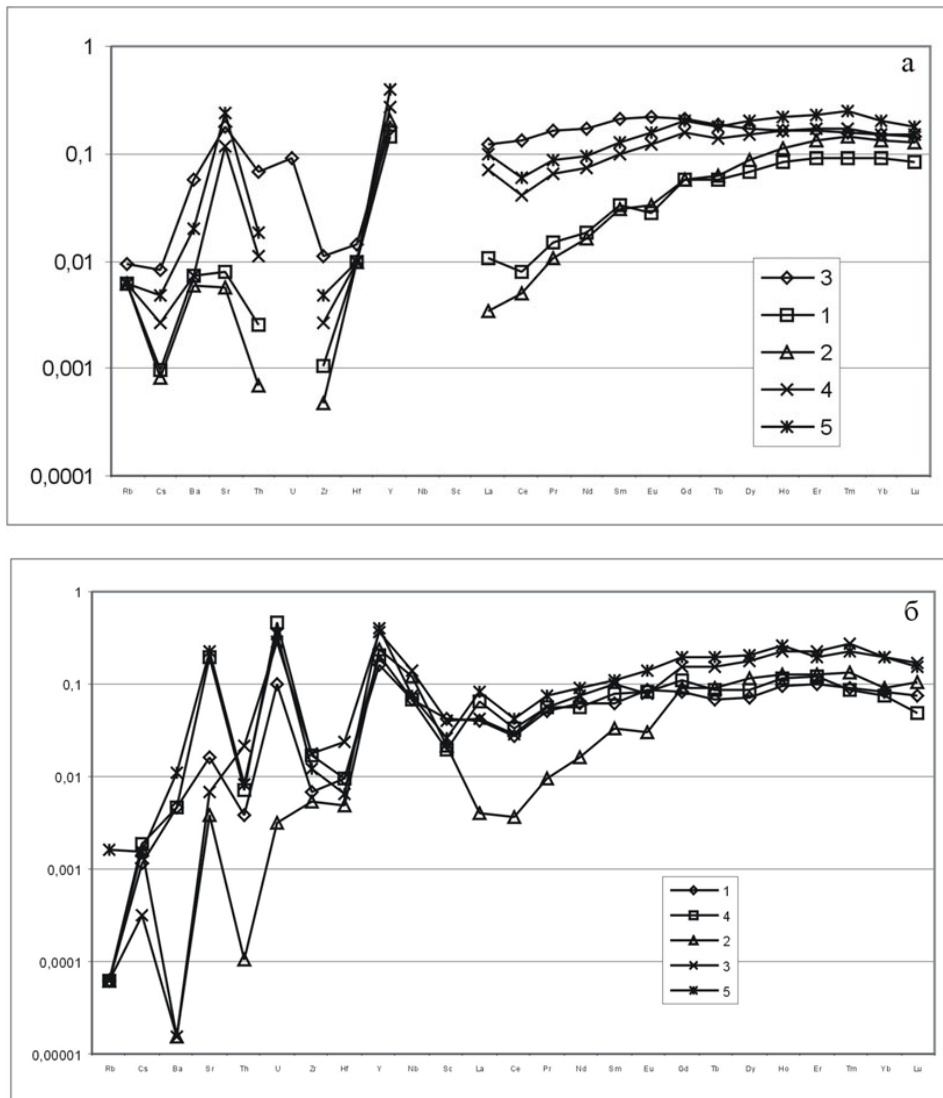


Рис. 1. Вариации ряда микроэлементов в доломитах и магнезитах Южно-Уральской (а) и Удерейской (б) провинций.

а: 1, 2 – магнезиты: 1 – 459-1 (среднезернистый), 2 – 460-1 (гигантозернистый); доломиты: 3 – А-2, 4 – 10089, 5 – 10226; б: магнезиты: 1 – Ekt-9-1 (крупнозернистый), 2 – Ekt-10 (гигантозернистый), 3 – Ekt-12 (среднезернистый); доломиты: 4 – Ekt-9-7, 5 – Ekt-5; Выполнено методом ICP-MS в ИГХ СОРАН, Иркутск.

ний. В результате наблюдается незначительный относительный вынос легких лантаноидов в магнетитах обоих регионов (рис. 2). Кроме того, в перекристаллизованных магнетитах с размером кристаллов до 50-100 мкм и характерной звездчатой текстурой наблюдается дальнейшее фракционирование лантаноидов с уменьшением содержания легких редкоземельных элементов (от лантана до европия). В то же время в 14 проанализированных пробах магнетитов из трех месторождений Енисейского кряжа (Екатерининское, Голубое, Верхотуровское) не обнаружено положительных аномалий

европия, характерных для некоторых уральских объектов, прежде всего Исмакаевского месторождения [Krupenin, 2004], и указывающих на повышенные температуры гидротермально-метасоматического процесса (более 250°C). Для магнетитов и вмещающих доломитов обоих регионов, если рассматривать пробы с невысоким, менее 5 %, содержанием некарбонатной примеси, характерно наличие небольшой отрицательной аномалии церия, указывающей на формирование карбонатов в окислительных условиях гидродинамически активного бассейна [Elderfield & Sholkovitz, 1987; Bau & Moeller,

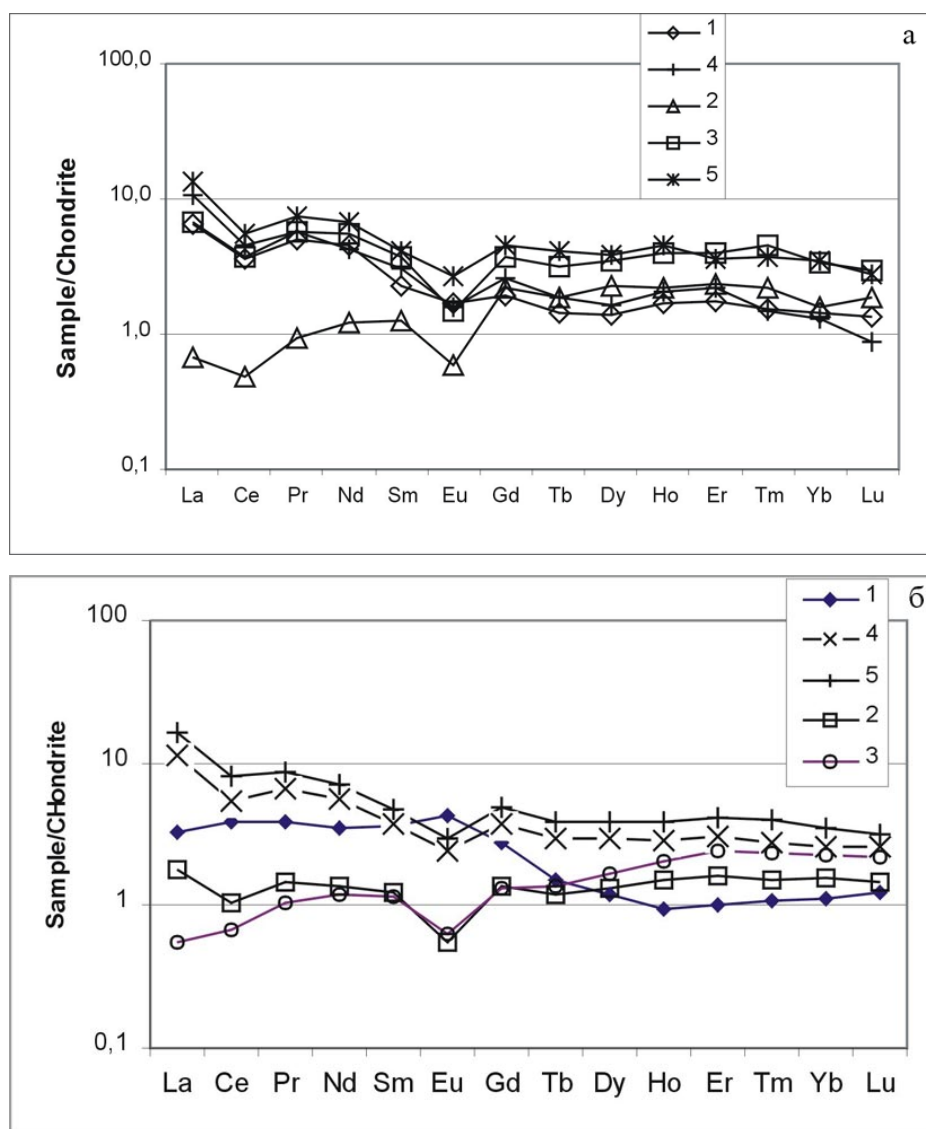


Рис. 2. Распределение лантаноидов в доломитах и магнетитах:

а) Удерейской провинции. Екатерининское месторождение: 1-3 – магнетиты: 1 – Ekt-9-1 (крупнозернистый), 2 – Ekt-10 (гигантозернистый), 3 – Ekt-12 (среднезернистый); доломиты: 4 – Ekt-9-7 диагенетическая брекчия, 5 – Ekt-5 – массивный;

б) Южно-Уральской провинции. 1-3 – магнетиты: Саткинское месторождение: 1 – 459-1 (среднезернистый), 2 – 460-1 (гигантозернистый); Исмакаевское месторождение Im2 (среднезернистый); 4, 5 – доломиты Саткинского месторождения: 4 – 10089, 5 – 10226.

1992]. Вероятно, данная характеристика для магнетитов является унаследованной при метасоматическом образовании по доломитовой матрице.

В таблице приведены средние значения для расчетных величин аномалии церия  $Ce/Ce^* = 2 * (Ce/CeC1) / (La/LaC1 + Nd/NdC1)$ , европия  $Eu/Eu^* = 2 * (Eu/EuC1) / (Sm/SmC1 + Gd/GdC1)$  и отношения групп легких лантаноидов к тяжелым  $(LLn/HLn)N = (La/LaC1 + 2Pr/PrC1 + Nd/NdC1) / (Er/ErC1 + Tm/TmC1 + Yb/YbC1 + Lu/LuC1)$  для различных выборок магнетитов и вмещающих карбонатных пород разрезов рифея обеих магнетитовых провинций как наиболее значимых индикаторов условий образования карбонатных пород. Величина цериевой отрицательной аномалии имеет более выразительную величину для магнетитов Удере́йской провинции (0.67) по сравнению с Южно-Уральской, где аномалия отсутствует (0.95-1.03) и явно наследуется из вмещающих доломитов (0.60). Во вмещающих глинистых сланцах погорюйской и аладьинской свит Енисейского кряжа также отмечаются аномальные значения  $Ce/Ce^*$ , указывающие на формирование отложений в окислительных морских условиях. Величина европиевой отрицательной аномалии в магнетитах уральского рифея (0.64-0.71) несколько более выражена по сравнению с вмещающими доломитами (0.82), для Удере́йской провинции и в магнетитах и в доломитах этот параметр одинаково низок (0.49-0.51). В то же время для некоторых проб магнетита с Енисейского кряжа характерна очень глубокая (до 0.17-0.34) европиевая отрицательная аномалия, что, как нам представляется, следует связывать с особенностями метасоматоза магнетитов. В целом тен-

денция к возрастанию европиевой отрицательной аномалии нарастает вверх по разрезу вследствие рециклирования корового материала [Маслов и др., 2003], т. е. в относительно молодых отложениях, к примеру, в доломитах раннего, среднего и позднего рифея в стратотипическом разрезе эта величина в среднем последовательно убывает от 0.82 до 0.52 (см. табл.). Поэтому уменьшение европиевой отрицательной аномалии в магнетитах и доломитах среднего рифея Енисейского кряжа может отчасти иметь и стратиграфические причины.

Величина отношения легких лантаноидов к тяжелым во вмещающих доломитах обоих регионов различается: если для Южного Урала оно составляет 4.25-7.30 и соответствует типичным для пассивных континентальных окраин (от 4 до 6, по Е.Ф. Летниковой, [2003]), то для Енисейского кряжа понижается до 3.76 и приближается к характеристикам активных континентальных окраин (2-4 по Е.Ф. Летниковой, [2003]). Это хорошо вписывается в существующие геодинамические закономерности развития двух изучаемых регионов. Если территория современного Башкирского мегантиклинория рассматривается как область платформенной шельфовой морской и прибрежно-морской седиментации, прерываемой относительно короткими импульсами поднятия и рифтогенного растяжения, то в истории развития Енисейского кряжа рифейское время характеризуется неоднократным проявлением активного тектонического режима с образованием офиолитовых ассоциаций и орогенеза в Исаковской зоне, расположенной западнее области локализации магнетитовых месторождений, в том числе и непосред-

Средние величины модулей по лантаноидам для магнетитов и вмещающих карбонатов Южно-Уральской и Удере́йской провинций кристаллического магнетита

	Южный Урал		Енисейский кряж			Южный Урал, известняки и доломиты			
	Магнетит R <sub>1</sub>	Магнетит R <sub>2</sub>	Магнетит	Доломит	Сланец	R <sub>1</sub> *	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>1-3</sub>
Кол-во проб	36	10	14	5	2	41	21	2	64
Ce/Ce*	0.95	1.03	0.67	0.60	0.59	0.91	1.06	0.91	0.96
Eu/Eu*	0.71	0.64	0.51	0.49	0.58	0.82	0.79	0.52	0.81
(LLn/HLn)N	2.45	3.44	2.47	3.76	8.39	4.25	7.30	5.59	5.28
Y/Ho	50.77	32.55	49.26	49.56		50.26	33.11	44.70	
ΣLn (медиана)	5.63	2.72	7.44	9.82		11.99	8.01	6.96	10.67

Примечание. \* – известняки и доломиты, без околорудных доломитов Бакальского рудного поля; стратоны рифея: R<sub>1</sub> – ранний; R<sub>2</sub> – средний; R<sub>3</sub> – поздний.

ственно во время среднерифейского этапа [Хабаров, 1994].

Величины отношения легких лантаноидов к тяжелым в магнетитах нижнего рифея Южного Урала и Удере́йской провинции практически совпадают и составляют 2.45-2.47, что подчеркивает сходство процессов их образования (степень фракционирования лантаноидов в процессе метасоматической перекристаллизации). Вероятно, для магнетитов Енисейского кряжа возможно применение механизма образования магнетита под действием высокомагнетизальных эвапоритовых растворов на ранних этапах катагенеза карбонатных пород, как было предположено нами по результатам рассмотрения геолого-литологических особенностей обеих провинций [Крупенин и др., 2004]. Это предположение находит подтверждение в уникально низкой величине железистости магнетитов Удере́йской провинции, поскольку эпигенетические флюиды, испытавшие циркуляцию в палеогидрогеологическом бассейне, как правило, приобретают повышенную железистость в результате взаимодействия с вмещающими глинистыми толщами. Связь магнетитоносных флюидов с осадочным карбонатным бассейном проявляется и в устойчиво высоких величинах отношения Y/No, которые характерны для магнетитов Удере́йской провинции, варьирующих в интервале значений 43-55 и соответствующих таковым как для вмещающих доломитов (42-56), так и для магнетитов нижнего рифея Южного Урала (42-58). Величина отношения Y/No для морских карбонатов составляет 40-60, но уменьшается в зависимости от дальности переноса флюида в гидротермальных условиях, поэтому пониженные значения данного параметра (менее 40) указывают на явно эпигенетический характер рудоносного флюида [Вау, 1996]. Наоборот, сходство величин отношения Y/No в магнетитах и вмещающих породах указывает на единство происхождения флюида, когда породы и руды сформировались в результате незначительного латерального перемещения растворов внутри палеогидрогеологического бассейна на ранних стадиях катагенеза.

*Исследования проводятся при поддержке интеграционного Урало-Сибирского проекта «Карбонатные последовательности позднего докембрия Урала и юга Восточной Сибири: структура, обстановки формирования и минерогенеза» и гранта НШ.85.2003.5.*

## Список литературы

*Анфимов Л.В., Бусыгин Б.Д., Демина Л.Е.* Саткинское месторождение магнетитов на Южном Урале. М.: Наука, 1983. 86 с.

Генетические типы, закономерности размещения и прогноз месторождений брусита и магнетита / П.П.Смолин, А.И.Шевелев, Л.П.Урасина и др. М.: Наука, 1984. 317 с.

Главнейшие магнетитовые месторождения / Л.П. Урасина, Т.А. Другалева, П.П. Смолин. М.: Наука, 1993. 157 с.

*Крупенин М.Т.* Геолого-геохимические и генетические различия месторождений Южно-Уральской магнетитовой провинции // Ежегодник-2002. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2003. С. 272-280

*Крупенин М.Т., Маслов А.В., Козлов П.С.* Сравнение геологических условий размещения магнетитовых месторождений Южно-Уральской и Удере́йской провинций // Ежегодник-2003. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2004. С. 325-333

*Летникова Е.Ф.* Распределение РЗЭ в карбонатных отложениях различных геодинамических типов (на примере южного складчатого обрамления Сибирской платформы) // Докл. РАН. 2003. Т. 393. № 2. С. 235-240.

*Маслов А.В., Ронкин Ю.Л., Крупенин М.Т. и др.* Питающие провинции осадочных бассейнов рифея зоны сочленения Русской платформы и Южного Урала: доказательства по петрографическим, петрохимическим и геохимическим данным // Докл. РАН. 2003. Т. 389. № 2. С. 219-222

*Тимесков В.А.* К научным основам прогноза и поисков магнетитовых месторождений // Сов. геология. 1983. № 3. С. 73-80.

*Хабаров Е.М.* Фации и эволюция рифейской седиментации восточных зон Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 1994. № 10. С. 44-54.

*Vau M.* Controls of the fractionation of isoivalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/No, Zr/Hf and lanthanide tetrad effect // Contrib. Minera. Petrog. 1996. 123. P. 323-333.

*Vau M., Moeller P.* Rare earth element fractionation in metamorphogenic hydrothermal calcite, magnesite and siderite // Mineralogy and petrology. 1992. 45. P. 2331-246.

*Kaiser C., Prochaska W., Krupenin M.* Chemistry of paleofluids forming the magnesite and siderite deposits in the Southern Urals // Mineral Exploration and Sustainable Development, Eliopoulos et al. (eds), 2003 Millpress, Rotterdam, ISBN 90 77017 77 1. P. 887-890.

*Krupenin M.T.* Y/No ratio as genetic indicator of sparry magnesites (South Urals, Russia) // Acta Petrologica Sinica. 2004. V. 20. 04. P. 803-816

*Elderfield H. & Sholkovitz E.R.* REE in the pore waters of reducing nearshore sediments // Earth Planet Sci. Lett. 1987. 82. P. 280-288.

*Lugli S., Morteani G., Blamart D.* Petrographic, REE, fluid inclusion and stable isotope study of magnesite from the Upper Triassic Burano Evaporites (Scchia Valley, northern Appenines): contributions from sedimentary, hydrothermal and metasomatic sources // *Mineralium Deposita*. 2002. 37. P. 480-494.

*Morteani G.* The REE contents and the origin of the sparry magnesite mineralizations of Tux-Lanersbach, Entachen Alm, Spiessnaegel and Hochfilzen, Austria and the lacustrine magnesite deposits of Aiani-Kozani, Greece and Bela Stena, Yugoslavia // *Economic Geology*. 1982. 77. P. 617-631.

*Nasedkin V.V., Efremova S.V., Boeva N.M. et al.* Commercial genetic types of talc and magnesite deposits in Russia // *Mineral deposits at the beginning of the 21-st century*. Piestrzynski et al.(Eds). Lisse: Balkema. Swets and Zeitlinger Publishers, 2001. P. 1009-1010.

*Prochaska W.* Magnesite and talc deposits in Austria // *Mineralia Slovaca*. 2000. № 32. P. 543-548.

*Radvanec M., Prochaska W.* Successive replacement of Upper Carboniferous calcite to dolomite and magnesite in Dubrava magnesite deposit (Western Carpatians, Slovakia) // *Mineralia Slovaca*. 2001. № 33. P. 517-525.