

Акцесорни Fe-Ti оксиди от Малкотърновския плутон, Източно Средногорие

Евгения Тарасова, Михаил Тарасов

Tarassova, E., M. Tarassov. 1998. Accessory Fe-Ti oxides from the Malkoturnovo pluton, Eastern Srednogorie. - *Geochem., Mineral. and Petrol.*, 34, 43-50

Abstract. Accessory Fe-Ti oxides (magnetite and ilmenite) from the Malkoturnovo pluton, Eastern Srednogorie, are investigated by optical microscopy and electron probe microanalysis. Their total content in the rocks of the pluton (pyroxenite, gabbro, monzonite, quartzsienite, granodioritic porphyrites) varies between 0.5% (in acid rocks) and 2% (in basic rocks). Two types of magnetites with (1) and without (2) ilmenite inclusions are established in the rocks studied. The most widespread textural types of magnetite intergrowths with ilmenite are (1) cross-hatched intergrowths of thin ilmenite lamellae in all 111 planes of the host magnetite and (2) sandwich intergrowths of thick ilmenite lamellae predominantly in one set of 111 planes of the magnetite. Such impurities as Ti (TiO_2 up to 1.8 wt.%), Al (Al_2O_3 2.8 wt.%), V (V_2O_3 0.92 wt.%), Mg (MgO 0.64 wt.%), Mn (MnO 0.45 wt.%), and Cr (Cr_2O_3 2.0 wt.%), are common in all magnetite studied. The Ti, Al and Cr contents are found to correlate with the petrochemical type of rocks, being clearly lower in the acidic rocks (TiO_2 up to 0.46 wt.%, Al_2O_3 1.1 wt.% Cr_2O_3 0.19 wt.%). Typical minor elements in ilmenite are Mn, Mg and V whose contents correlate well with the specified type of rocks too: ilmenite from the basic rocks is enriched in Mg (MgO up to 5.2 wt.%) and V (V_2O_3 1.6 wt.%), while Mn is the major impurity component in ilmenite from the acidic rocks (MnO 6.7-23.3 wt.%). Significant variations in Mn content of ilmenite from the acidic rocks and indications for replacements of ilmenite by hematite, rutile and titanite can serve as an argument for postmagmatic origin of Mn in ilmenite from the acid rocks. The composition of the coexisting magnetites and ilmenites in all rocks studied demonstrates that during the oxidising exsolution of the Ti-containing protospinel, Al and Cr concentrated in magnetite while Mg and Mn - in ilmenite.

Thermobarometric investigations performed using several pairs of the co-existing magnetite and ilmenite show temperatures below 500°C and $f\text{O}_2$ below the magnetite-hematite buffer.

Key words: Fe-Ti oxides, magnetite, ilmenite, subsolidus exsolution, minor elements partitioning

Address: Central Laboratory of Mineralogy and Crystallography, Bulgarian Academy of Sciences, 1000 Sofia, Bulgaria

Ключови думи: Fe-Ti оксиди, магнетит, илменит, субсолидусно отсмесване, разпределение на елементи-следи

Адрес: Централна лаборатория по минералогия и кристалография, Българска академия на науките, 1000 София

Увод

Интересът, проявяван към акцесорните магнетити и илменити от магмени и метаморфни скали, е свързан преди всичко с възможността за прилагане на магнетит-илменитов термометър и кислороден барометър при решаване на различни петрогенетични задачи (Buddington, Lindsley, 1964; Powell, Powell, 1977; Spencer, Lindsley, 1981; Pasteris, 1985; Хисина, 1987; Ghiorso, Sack, 1991). В рамките на известните досега експериментални данни и термодинамични модели на съществуващите в равновесие магнетит-улвошпинелови и илменит-хематитови твърди разтвори има ограничение за прилагане на метода при температури по-ниски от 600°C, т.е. температури, при които настъпват промени, свързани с постмагматично хидротермално въздействие върху тези минерали. В условията на бавно изстиване на интрузивните скали и съществено флуидно въздействие, свързано с многофазност на внедряване на плутоничните тела, се създават нови равновесни или неравновесни състави между магнетита и илменита, които не са подходящи за прилагане на съществуващия термобарометричен метод, но са индикаторни за протеклите в дадена петрохимична система процеси.

Настоящата работа цели изучаване на особеностите на химизма на Fe-Ti оксиди от скалите на Малкотърновски плутон. Плутоничната му постройка се разкрива в северните части на Странджа планина, и с постмагматичната му дейност са свързани апоскарнови железooksидни, медносулфидни и волфрам-молибденови орудявания, а също и щокверково жилни и жилно-впръснати медно-молибденови орудявания. Макар минералите от рудните минерализации да са били предмет на детайлни изследвания (Василев и др., 1964; Василев, 1979; Атанасов, Бонев, 1979, 1982, 1983; Йорданов и др., 1985; Тарасова и др., 1997), данните за рудните акцесорни минерали от интрузивните скали са оскъдни и в тях единствено се споменава (Василев и др., 1964) за наличие на магнетит.

Образците за изследване са подбрани в съответствие с най-новите данни за петроложкия строеж и еволюцията на плутона (по непубликувани данни на Маврудчиев и др., 1997), според които той е изграден от четири фази: I - габра (Gb) с пироксенитови (Px) кумулати; II - монзонитоиди (Mz); III - кварцсиенити (Qsi); IV - гранодиоритови (GD) и кварцдиоритови порфирити. Скалите от първите три фази се считат за продукти на един магматичен процес, а тези от четвъртата на друг по-късен.

Акцесорните Fe-Ti оксиди са изследвани минераграфски и с електронномикросондов анализ върху изкуствено спонени и естествени полирани препарати. Представени са вариациите в съставите и средните съдържания (\bar{x} , s) на установените микропримеси в съвместно съществуващи магнетити и илменити и в магнетити без илменитови отсмесвания.

Минераграфска характеристика

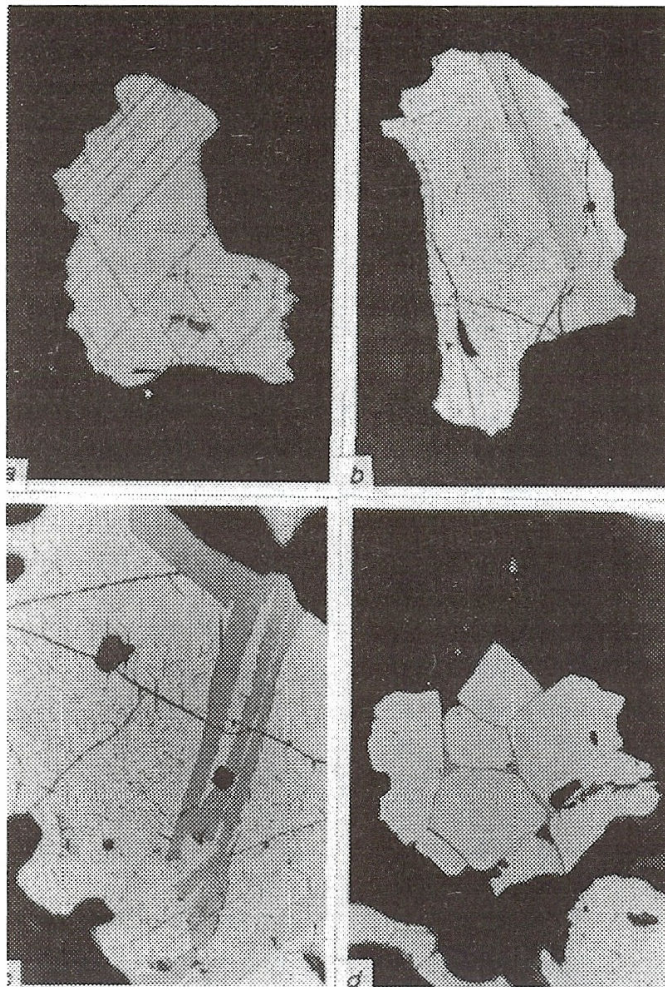
Общото съдържание на акцесорните магнетити и илменити намалява в посока от базичните към киселите интрузивни скали (Px 1-2%, Gb 1-2%, Mz 1-1,5%, Qsi 0,5%, GD1%). В пироксенитите и габрата тези минерали са едни от най-рано кристализираните и най-често са включени в скалообразуващите минерали, докато в останалите скали заемат предимно интерстициите между тях. Идиоморфен магнетит се среща по-често в базичните скали, докато в останалите той е предимно ксеноморфен. За всички скали е характерно наличие както на магнетит-илменитови сраствания, така и на магнетитови зърна без илменит, а в кварцсиенитите се срещат и самостоятелни илменитови индивиди. Размерите на магнетита са от 0,01 до 1 mm, а на илменита от 3 μ m до 0,1 mm, като се наблюдава тенденция, по-силно изразена за илменита, на формиране на по-едри индивиди в базичните скали. От по-ранните към по-късните интрузивни скали количеството на магнетита, не съдържащ илменитови отсмесвания, се увеличава -

от 20% в пироксенитите и 60% в габрата до 85-90% в останалите скали. В магнетитите от пироксенитите и габрата наред с илменита се наблюдават и отсмесвания от шпинел (размер <math>< 2 \mu\text{m}</math>; фиг. 1 а-с). Наблюдаваните микроструктурни особености на магнетит-илменитовите сроствания добре се вписват в направеното от Baddington, Lindsley (1964) разделяне на типови прораствания между тези минерали: 1) решетъчно прорастване на тънки илменитови ламели по всички равнини $\{111\}$ в магнетита (фиг. 1, а); 2) сандвичеви прораствания на дебели илменитови ламели по направление на една от равнините $\{111\}$ (фиг. 1, b); 3) илменитови зърна в магнетита; 4) зърна или случайни илменитови ламели по външните граници на магнетита, както и зърнести агрегати на магнетита и илменита (фиг. 1, с и d).

В именитите от всички скали с изключение на тези от пироксенитите са установени хематитови включения (размер $2 \mu\text{m}$). Част от илменитите особено в по-киселите скали се заместват по краищата на индивидите от титанит, рутил и хематит.

Химичен състав на магнетита

Вариациите в съставите, а също средният състав (\bar{x}) и стандартното отклонение (s) получени въз основа на 90 рентгеноспектрални микроанализа на съвместно съществуващи магнетити и илменити и на магнетити без илменитови отсмесвания са представени в табл. 1. За магнетитите от всички типове скали са характерни сравнително малки колебания в съдържанията както на основните елементи, така и на елементите-примеси (Ti, Al, V, Mg, Mn), което показва, че физико-химичните условия на последния акт на преобразуване на минерала в рамките на всяка фаза са били сходни. Още повече, анализите на магнетитите без илменит от всички скали напълно се вписват в получените вариации на съставите на магнетитите с илменит, което показва, че условията и времето на формиране на самостоятелните магнетитови индивиди



Фиг.1. Фазова нееднородност на магнетити от Малкотърновския плутон; отразена светлина, X 600, имерсия: а - магнетит (бял) с включения от финоплочест шпинел и с решетчати включения от тънкоплочест илменит (сив) по всичките равнини $\{111\}$ на магнетита; габро; b - магнетит (бял) с включения от дебелоплочест илменит (сив) по една от равнините му $\{111\}$ и с включения от финоплочест шпинел; пироксенит; c - магнетит (бял) с включения от финоплочест шпинел и случайно разположени пластини от илменит (сив); габро; d - магнетитов агрегат (бял) с илменит (сив) в интерстициите на зърната; монзонит

Fig. 1. Phase inhomogeneity of magnetite from the Malkoturnovo pluton, reflected light, X 600, oil: a - magnetite (white) with cross-hatched inclusions of ilmenite (grey) in all $\{111\}$ planes of magnetite and with inclusions of spinel (most disperse phase); gabbro; b - magnetite (white) with inclusions of thick lamellae of ilmenite (grey) in one set of $\{111\}$ planes of magnetite and with inclusions of fine lamellae of spinel; pyroxenite; c - magnetite (white) with inclusions of fine lamellae of spinel and of randomly distributed lamellae of ilmenite (grey); gabbro; d - aggregate of magnetite (white) with ilmenite (grey) in the interstitial space; monzonite

съвпадат със заключителния етап на преобразуване на магнетит-илменитовите агрегати. По съдържания на Ti, Al и Cr в магнетитите се наблюдава ясно съ-

Таблица 1

Вариации в състава (тегл. %) на магнетити (Mt) и илменити (Ilm) от скалите на Малкотърновския плутон

Table 1

Composition variations (wt %) in magnetites (Mt) and ilmenites (Ilm) from the rocks of the Malkoturnovo pluton

скала	пироксенити		габра		монционити		кварцсненити		гранодиоритови порфирити	
	Mt, n=6	Ilm, n=4	Mt, n=17	Ilm, n=14	Mt, n=13	Ilm, n=10	Mt, n=5	Ilm, n=3	Mt, n=11	Ilm, n=7
Fe ₂ O ₃	62,5±1,17 61,2-63,3	7,1±1,38 6,1-7,9	65,5±1,97 60,3-67,5	7,2±2,8 3,4-11,9	65,8±1,15 64,5-66,9	6,9±4,32 1,6-13,4	66,8±1 66,1-67,5	10,0±3,2 6,4-11,4	66,5±1,31 64,4-68,2	16,3±9,3 4,0-29,1
FeO	32,0±0,49 31,7-32,6	34,1±2,3 32,0-37,4	31,8±0,55 31,2-33,7	35,6±3,1 29,4-39,1	31,8±0,4 31,5-32,5	34,3±5,3 23,6-41,6	31,2±0,68 30,8-37,1	29,5±9,2 8,9-35,1	31,5±0,4 30,8-31,9	25,8±3,9 19,3-32,0
TiO ₂	0,89±0,26 0,60-1,1	49,1±0,244 8,9-49,5	0,27±0,47 <0,1-1,8	47,9±1,7 45,0-50,8	0,15±0,13 <0,1-0,41	48,0±2,33 44,2-51,0	0,26±0,29< 0,1-0,46	46,6±1,61 45,8-48,5	0,15±0,13 <0,1-0,42	43,9±4,8 38,1-50,2
Al ₂ O ₃	1,82±0,81 1,13-2,8	0,41±0,18 0,16-0,59	0,79±0,38 0,22-1,9	0,46±0,28 <0,2-1,1	0,73±0,25 0,54-1,0	0,29±0,15 <0,2-0,49	0,48±0,03 0,46-0,50	0,4±0,17 0,26-0,59	0,71±0,27 0,23-1,1	0,35±0,23 <0,2-0,79
V ₂ O ₅	0,42±0,11 0,31-0,53	1,42±0,13 1,3-1,6	0,59±0,14 0,39-0,92	0,71±0,53 <0,2-1,3	0,5±0,07 0,40-0,64	0,43±0,53 <0,2-1,5	0,35±0,11 0,24-0,52	0,16±0,12 0,14-0,29	0,38±0,05 0,31-0,47	<0,2
MnO	0,1±0,09 <0,1-0,26	2,97±0,14 2,8-3,1	<0,1-0,20	6,6±3,25 1,8-11,6	0,13±0,11 <0,1-0,34	8,8±4,36 2,3-17,2	0,15±0,01 0,14-0,16	12,5±8,4 6,7-22,2	0,21±0,15 <0,1-0,45	13,4±5,7 8,5-23,3
MgO	0,45±0,18 0,29-0,64	4,16±1,38 2,2-5,2	0,11±0,15 <0,2-0,53	0,7±1,05 < 0,2-2,9	<0,2	0,31±0,44 <0,2-1,4	0,18±0,18 <0,2-0,31	0,26±0,36 <0,2-0,67	<0,2	0,34±0,42 <0,2-1,2
Cr ₂ O ₃	1,93±0,05 1,9-2,0	<0,1	0,42±0,55 <0,1-1,6	0,18±0,18 <0,1-0,68	0,3±0,22 <0,1-0,55	0,17±0,26 <0,1-0,87	0,12±0,09< 0,1-0,18	<0,1	0,09±0,05 <0,1-0,19	0,14±0,2 < 0,1-0,59

Анализите са извършени в „Геология и геофизика“ АД от Хр. Станчев на прибор JEOL с EDS при ускоряващо напрежение 20 kV, ток 2.10-9 А и еталони - корунд, диопсид и метални Cr, V, Ti, Mn, Fe. Желязото е разделено на Fe²⁺ и Fe³⁺ след преизчисляване на кристалохимичните формули. В числителя средно съдържание (\bar{x}) и стандартно отклонение (s); в знаменателя крайни стойности на вариациите в съставите.

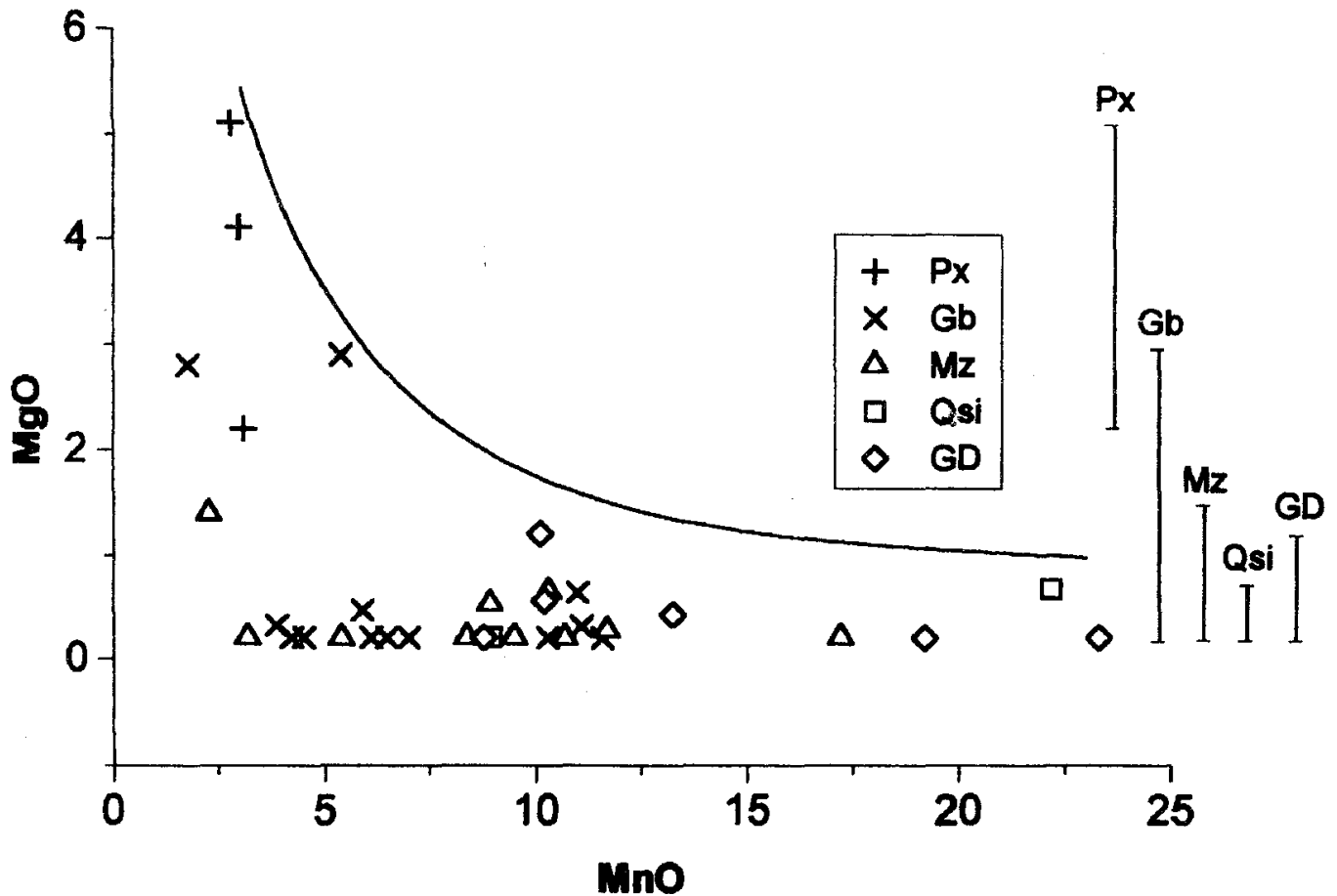
ответствие с петрохимичните типове скали. Отделят се два крайни случая на състави на магнетитите: за тези от пироксенитите, които са с най-високите съдържания на Ti, Al и Cr, и за тези от монционити, кварцсненити и гранодиоритови порфирити. Съставите на магнетитите от габрата заемат междинно положение.

Проведените по-детайлни изследвания на отделни зърна от магнетити с и без включения показват хомогенно разпределение на елементите-примеси в тях.

Химичен състав на илменитата

За разлика от магнетитите съставите на илменитите демонстрират по-големи вариации, както по отношение на основ-

ните си химични елементи Fe²⁺ и Ti, така и на примесните Fe³⁺, Mn, Mg и V (табл. 1). Колебанията на Mn и Fe³⁺ са особено съществени в по-киселите скали, в които се наблюдава постмагматично заместване на илменита от рутил и хематит. Ето защо големият размах в съдържанията на тези елементи може да служи като индикация за по-интензивно проявена хидротермална дейност в тези скали, а повишеното съдържание на Mn в илменитите да се обвърже с привнасянето на този елемент от хидротермалните разтвори. Фиг. 2, която представлява зависимост между съдържанията на MnO и MgO в илменитите, подчертава съответствието между състава на илменитите и типа скала – по-богати на Mn са илменитите от средните и киселите скали, а на Mg – тези от базичните.



Фиг. 2. Съдържания на MnO и MgO (тегл.%) в илменити от Малкотърновския плутон (Px-пироксенити, Gb-габра, Mz-монзонити, Qsi-кварцсienити, GD-гранодиоритови порфирити)

Fig. 2. Contents of MnO and MgO (wt.%) in ilmenites from the Malkoturnovo pluton (Px- pyroxenite, Gb-gabbro, Mz-monzonite, Qsi-quartzsienite, GD-granodioritic porphyrites)

Разпределение на микрокомпонентите между съществуващите магнетити и илменити

Разпределението на основните елементи-примеси Al, Cr, Mn, Mg и V между магнетита и илменита е показано на фиг. 3. Първите четири елемента демонстрират полярност в разпределението между двата минерала: Al и Cr се концентрират предимно в магнетита, а Mg и Mn - в илменита. Тези резултати добре се съгласуват с литературните данни за фракционирание на микрокомпонентите в първоначалния протошпинелид, претърпяващ окислителен разпад (Вахрушев, 1980; Патнис, Мак-Коннел, 1983; Ghiorso, Sack, 1991).

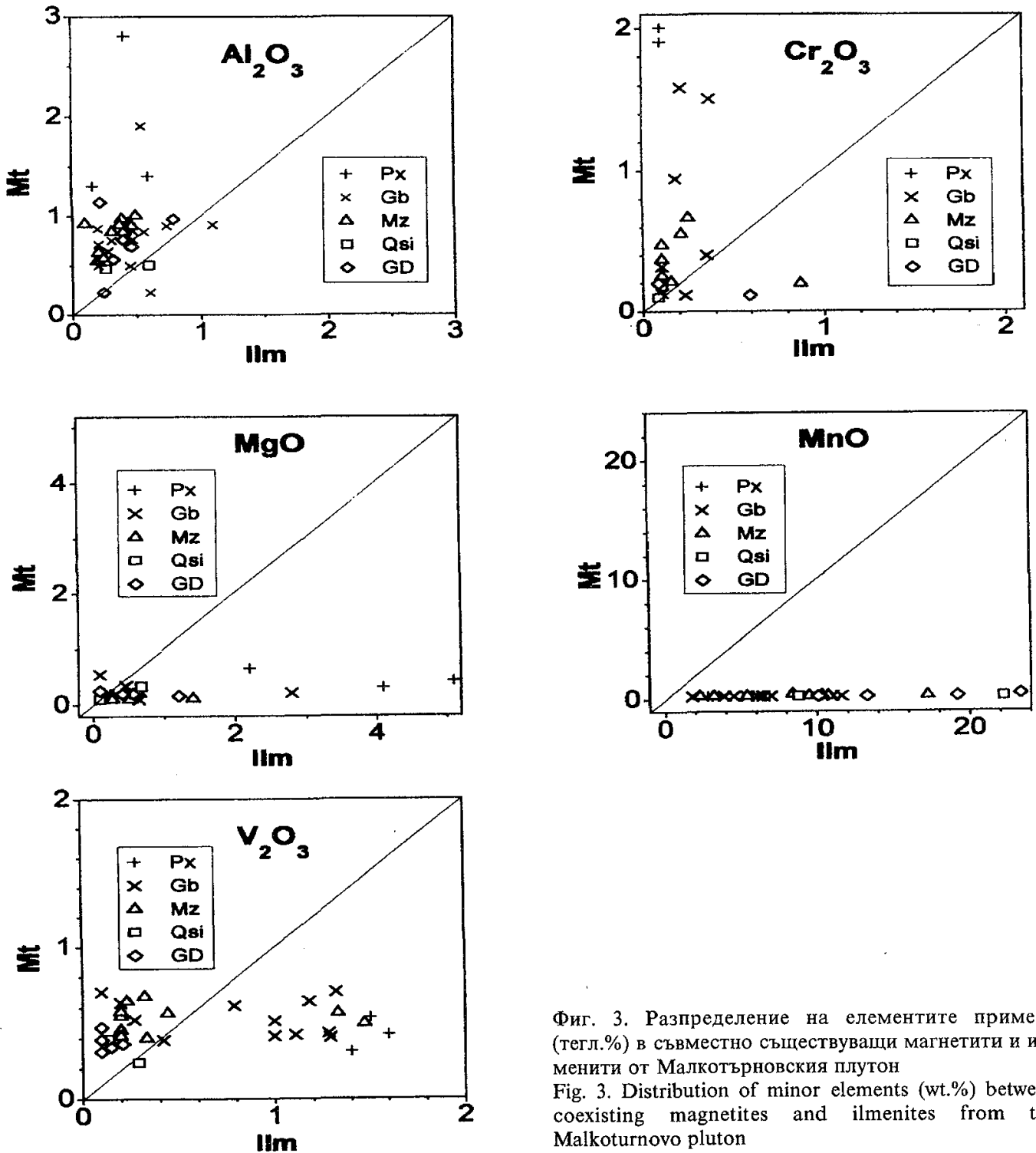
Съществено е обстоятелството, че въпреки вариациите на V_2O_3 в магнетитите от различните скали, средните му

стойности са близки и са между 0,3 и 0,7 тегл.%. Вариациите на V в илменитите са много по-значими, поради което се отделят два пределни случая: първият с V_2O_3 1-1,6 тегл.%, и вторият с V_2O_3 близко до границите на чувствителността на метода - 0,1-0,4 тегл.%. Първата група обединява пироксенитовите кумулати и част от габрата и монзонитите, а втората - по-киселите скали и останалата част от габрата и монзонитите. Това дава основание да считаме, че в процеса на формиране на габрата и монзонитите е имало последователна кристализация на протошпинелиди с проявена тенденция към понижаване на съдържанията на V в тях. Сходните съдържания на V в магнетитите от всички скали свидетелства за генетичната връзка между всички фази на Малкотърновския плутон, включително и порфиритната фаза, която по геоложки и петроложки съображения се

счита за по-късна. Механизмът, по който се е осъществявало набогатяването на илменита с V не е достатъчно ясен. Конкретната интерпретация на фракционирването на V между съществуващите магнетити и илменити се нуждае от по-нататъшни изследвания.

От всички изследвани елементи, участващи в съставите на магнетитите и илменитите, най-големи вариации са ха-

рактерни за Mn, докато за останалите елементи тези колебания са в рамките на средните стойности, характерни за всички скали. Това дава основание да считаме, че компоненти като V, Mg, Cr, и Al не са повлияни от постмагматичните процеси и отразяват изходното съдържание на тези елементи в магматичния протошпинелид.



Фиг. 3. Разпределение на елементите примеси (тегл.%) в съвместно съществуващи магнетити и илменити от Малкотърновския плутон
 Fig. 3. Distribution of minor elements (wt.%) between coexisting magnetites and ilmenites from the Malkoturnovo pluton

Термометрични оценки

В основата на известния, предложен от Buddington, Lindsley (1964) термометър и кислороден барометър, лежат два факта: 1) съдържанията на Ti в магнетити от съвместно съществуващи в равновесие магнетит-илменитови двойки е функция от температурата, и 2) наличието на отсмесени ламели от илменит в магнетита е свързано с окислителен разпад на титан-съдържащ протошпинелид, представляващ твърд магнетит-улвошпинелов разтвор. Критичният въпрос, който възниква при прилагането на метода е дали съставите на съществуващите магнетит и илменит са равновесни. Досега е предложен само един критерий за равновесие и той се отнася до фракционирането на Mn и Mg между двата минерала (Vason, Hirschmann, 1988). Поради ниските съдържания на Mn и Mg в изследваните от нас магнетити и индикациите, че съвместно съществуващите с тях илменити, особено тези от по-киселите скали, са претърпели изменения в резултат на постмагматично флуидно въздействие, само 5 магнетит-илменитови двойки отговарят по този критерий за равновесност на двата състава – това са три двойки от пироксенитите, две от габрата и една от гранодиоритовите порфирити. Избраните случаи, отговарящи на условието за равновесност и използвани за определяне на температурата и фугитивността на кислорода, показват стойности $T < 500^{\circ}\text{C}$ и $f\text{O}_2$ под магнетит-хематитовия буфер. Съществуващите експериментални данни, а също така термодинамичните модели на твърди разтвори на магнетит, улвошпинел и други кубични фази и на илменит, хематит и други ромбодрични оксиди съществено ограничават възможностите на този метод за използване за термометрични изследвания. Пределът на долната му температурна граница е около 600°C . Под тази температура магнетит-улвошпинеловия твърд разтвор вече не съществува като непрекъснат твърд разтвор, а възникват и проблеми, свързани с магнитното подреждане в магнетита, прехода от различ-

ните типове структури R3 и R-3, прекъсване на смесимостта хематит-илменит и др. (Ghiorso, Sack, 1991). Всички тези фактори не позволяват този метод да се използва чрез екстраполация за по-ниски температури, а допускат приложението му само за съпоставяне на отделни събития. В нашия случай се наблюдава тенденция на намаляване на температурата на постигнато равновесие в магнетит-илменитовите двойки от пироксенитите към гранодиоритовите порфирити, като габрата заемат междинно положение. Тези данни косвено свидетелствуват за по-продължително флуидно въздействие върху по-киселите скали.

Заклучение

Проведените изследвания на Fe-Ti оксиди от Малкотърновския плутон преди всичко показват съществуването на съответствие между съставите на магнетитите и илменитите и генериралите ги петрохимичните типове магми.

Във всички скали са установени няколко генерации магнетит. Съставите на магнетитите с и без илменитови отсмесвания са близки. Този факт може да свидетелствува за това, че безилменитовите магнетити са се образували почти едновременно и при близки условия с последния акт на преобразуване на магнетит-илменитовите двойки.

Установена е индикаторната роля на V, която, първо, показва родственост и вероятно единен магматичен източник на всички плутонични фази включително и на порфиритната; и, второ, ясно отделя два крайни случая на състави на магнетит-илменитовите срastвания – при по-киселите скали и при пироксенитите, с междинно звено на тези от габрата и част от монзонитите. Показано е, че най-високи стойности на V имат илменитите образувани от по-високо температурни протошпинелиди.

Установените широки вариации в състава на илменитите от по-киселите скали на такива елементи като Mn и Fe^{3+} и наблюдаваното заместване на илменита от хематит, титанит и рутил мо-

гат да служат като индикация за по-интензивно проявена хидротермална дейност в тези скали.

Mn и V демонстрират сходно поведение да се натрупват в илменита. Съществуващите обаче петрографски и минерографски индикации за хидротермални промени на илменитите, а също проведените проверки по критерия за равновесност на съставите на съвместно съществуващите магнетити и илменити свидетелстват, че за разлика от Mn, V не се е преразпределял в постмагматични условия и поведението му е отражение на един по-ранен магматичен процес, а не на по-късен хидротермален както за Mn.

Направените термометрични оценки на базата на съставите на съществуващите магнетити и илменити показват, че субсолидусното им уравнивяване е протекло в постмагматични условия с тенденция на намаляване на температурата от базичните скали към гранодiorитовите порфири.

Благодарности. Авторите благодарят на професор Борислав Каменов и професор Божидар Маврудчиев за оказваното съдействие и консултации по време на изследванията. Разработката е изпълнена в рамките на научно-изследователска тема „Темпорална и латерална еволюция на златогенериращата роля на Малкотърновския плутон от Източното Средногорие с оглед на металогенни оценки“ (1997) финансирана от Комитета по геология и минерални ресурси, София.

Литература

- Атанасов, В., И. И. Бонев. 1979. Върху бисмутовата минерализация в медните и медно-железните находища от Малкотърновското рудно поле.- *Сп. Бълг. геол. д-во*, **40**, 2, 143-153.
- Атанасов, В., И. И. Бонев. 1982. Косалит от скарновото медно-желязно находище Пропада в Странджа планина.- *Год. ВМГИ*, **28**, II, 179-189.
- Атанасов, В., И. И. Бонев. 1983. Халкопирит-борнитов тип постскарнова медна минерализация в находищата от Малкотърновското рудно поле, Югоизточна България. *30 год. ВМГИ*, 69-77.
- Василев, Л., М. Стайков, В. Иванова-Панайотова, Хр. Нечев. 1964. Скарни и руди в ореола на Малкотърновския плутон, Странджа планина.- В: *Сборник в чест на акад. Й. Йовчев*. С., Техника, 277-348.
- Василев, Л. 1979. Парагенези на магнетитовата интра- и перимагматична рудоносна формационна редица в Странджа планина. - *Сп. Бълг. геол. д-во*, **40**, 1, 109-114.
- Вахрушев, В. А. 1980. *Рудные минералы изверженных пород*. Новосибирск, Наука, 184 с.
- Йорданов, Й., И. И. Бонев, В. Иванова-Панайотова. 1985. Кварц-молибденитовите жили от находище Бърдце, Малко Търново.- *Сп. Бълг. геол. д-во*, **46**, 1, 22-37.
- Патнис, А., Дж. Мак-Коннел. 1983. *Основные черты поведения минералов*. М., Наука, 302 с.
- Тарасова, Е., Зд. Илиев, Р. Илиев. 1997. Шлиховото злато от Малкотърновското рудно поле. - В: *Юбил. сб. СУ 50 год. спец. геология. Геол.-геогр. фак.*, 47-50.
- Хисина, Н. Р. 1987. *Субсолидусные превращения твердых растворов породообразующих минералов*. М., Наука, 207 с.
- Bacon, C., M. Hirschmann. 1988. Mg/Mn partitioning as a test for equilibrium between coexisting Fe-Ti oxides. - *Amer. Mineral.*, **73**, 57-61.
- Buddington, A. F., D. H. Lindsley. 1964. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents.- *J. Petrol.*, **5**, 310-357.
- Ghiorso, M., R. Sack. 1991. Fe-Ti oxide geothermometry: thermodynamic formulation and the estimation of intensive variables in silicic magmas.- *Contr. Mineral. Petrol.*, **108**, 485-510.
- Pasteris, J. D. 1985. Relationships between temperature and oxygen fugacity among Fe-Ti oxides in two regions of the Duluth complex. - *Canad. Mineral.*, **23**, 111-127.
- Powell, R., M. Powell, 1977. Geochemistry and oxygen barometry using coexisting iron-titanium oxides: a reappraisal. - *Mineral. Mag.*, **41**, 257-263.
- Spencer, K. J., D. H. Lindsley. 1981. A solution model for coexisting iron-titanium oxides.- *Amer. Mineral.*, **66**, 1189-1201.

Приета на 13.04.1998 г.
Accepted April 13, 1998