

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ ТИТАНА В ПЛАГИОПЕРИДОТИТАХ, ОЛИВИНОВЫХ ГАББРО-НОРИТ-ДОЛЕРИТАХ, КВАРЦЕВЫХ ГАББРО-НОРИТ-ДОЛЕРИТАХ, КВАРЦЕВЫХ ДИОРИТАХ ПЕРВОМАЙСКО-АЮДАГСКОГО ИНТРУЗИВНОГО КОМПЛЕКСА, МЕЗОЗОИДЫ ГОРНОГО КРЫМА

Э.М. Спиридонов¹, Е.С. Семиколенных², С.В. Филимонов¹, Е.В. Путинцева²,
Н.Н. Кривицкая¹, студ. Г.Н. Овсянников¹

1. Московский гос. Университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия,
ernstspiridon@gmail.com
2. Санкт-Петербургский гос. университет, Санкт-Петербург, Россия

Интрузивы базитового среднеюрского (раннебайосского) Первомайско-Аюдагского интрузивного комплекса ПАИК – островодужной плагиолерцолит – габбро-норит-долерит – габбро-норит-диорит – кварцеводиорит – плагиогранитной формации – наиболее распространённые магматические образования в мезозоидах Горного Крыма (Спиридонов и др., 1990, 2018б, 2019а). Интрузивы ПАИК внедрились в сложно дислоцированные флишевые толщи Т₂ – J₁ как южной Горно-Крымской структурной зоны, так и северной Лозовской структурной зоны киммерид Горного Крыма. Особенности интрузивных пород ПАИК – обилие анортита и битовнита, ромбических пироксенов; смена раннемагматических оливин + хромшпинелиды - Mg пироксенами + анортит + армоколлит + бадделеит + цирконолит; более поздними пироксенами + битовнит + Mg ильменит + чевкинит-(Ce) + перрьерит-(Ce); ещё более поздними Fe пироксенами + лабрадор + титаномагнетит + ильменит; наиболее поздними Fe пироксенами + андезин + циркон; самыми поздними кварцем + олигоклаз + биотит + графические кварц-полевошпатовые сростания + алланит (ортит) + REE-эпидот.

Титан – характерный химический элемент магматических пород базитового состава (Заварицкий, 1955; Ярошевский, 2004). Поэтому, породы ПАИК богаты титансодержащими минералами.

Плагиолерцолиты и оливиновые габбро-норит-долериты – ранние производные ПАИК, в значительной степени сложенные кумулятивным магнезиальным оливином (Спиридонов и др., 2019а). Оливин содержит включения хромшпинелидов. В центре кристаллов оливина – это алюмомагнезиохромит и магнезиальный алюмохромит, умеренно хромистые, железистые ($f = 45-55$), содержат 8-14 масс. % Fe₂O₃ и до 1.2% TiO₂, что чётко отличает их от хромшпинелидов альпинотипных гипербазитов. Во внешних зонах кристаллов оливина и на их контактах – это Ti-Al феррихромит и хромтитаномагнетит с железистостью $f = 58-75$, которые содержат до 26 масс. % Fe₂O₃, 2.5-9 масс. % TiO₂, до 1.8 масс. % V₂O₃.

Армоколлит – ромбический оксид титана, магния и железа (Mg,Fe)Ti₂O₅ из группы псевдобрукита – характерный минерал титанистых базальтов Луны. Минерал назван в честь астронавтов – Нейла Армстронга, Эдвина Олдрина и А. Коллинза (Anderson et al., 1970), которые первыми из землян ступили на поверхность Луны. Лунный армоколлит ассоциирует с аксессуарными бадделеитом и цирконолитом, часто на армоколлит нарос и его замещает ильменит (Anderson et al., 1970; Steel, 1974; Фрондел, 1978). В земных породах армоколлит редок. Это типоморфный аксессуарный минерал лампроитов (Velde, 1975), некоторых типов кимберлитов и щелочных базальтоидов (Sørensen, 1997). Изредка армоколлит развит в толеитовых базальтах и долеритах (Cawthorn, Biggar, 2008). Для минералов группы псевдобрукита характерен гетеровалентный изоморфизм - (Mg, Fe²⁺) + Ti⁴⁺ ↔ Fe³⁺ + Fe³⁺. Армоколлит образуется при температуре >900 °С, в восстановительной обстановке, близкой к равновесию углерод – монооксид углерода CO (Lindsley et al., 1974; Friel et al., 1977).

Армоколлит широко развит в плагиолерцолитах и оливиновых габбро-норит-долеритах ПАИК Горного Крыма, в береговых обрывах Балаклавы под Севастополем.

В богатых оливином магматических породах Балаклавы таблицы армоколлита размером до

0.6 x 0.2 мм включены в интеркумулусные магнезиальные бронзит и авгит, анортит и битовнит. Кристаллы армоколита обычно идиоморфные (рис. 1). Встречаются V-образные срастания индивидов армоколита, возможно, это – двойники. Кристаллы нередко заметно растворены, окружены каймами замещения ильменита и более позднего титанита. Кристаллы армоколита по составу незональные. Армоколит содержит 63-66 масс. % TiO_2 , 7-8 % MgO , 10-12 % FeO , 13-18 % Fe_2O_3 , до 1.5 % Al_2O_3 и V_2O_5 , до 0.7 % Cr_2O_3 (таблица 1). Состав армоколита Балаклавы отвечает формуле



или, с разбиением по кристаллохимическим позициям, –

$(Mg_{0.38-0.44}Fe^{2+}_{0.36-0.30}Fe^{3+}_{0.24-0.29})_1(Ti_{1.73-1.77}Fe^{3+}_{0.22-0.13}V_{0.04-0.05}Al_{0-0.06}Cr_{0-0.01})_2O_5$. Армоколит Балаклавы содержит 38-44 % минала армоколита $MgTi_2O_5$, 30-36 % минала ферропсевдобрукита $Fe^{2+}Ti_2O_5$, 24-29 % минала псевдобрукита $Fe^{3+}_2TiO_5$.

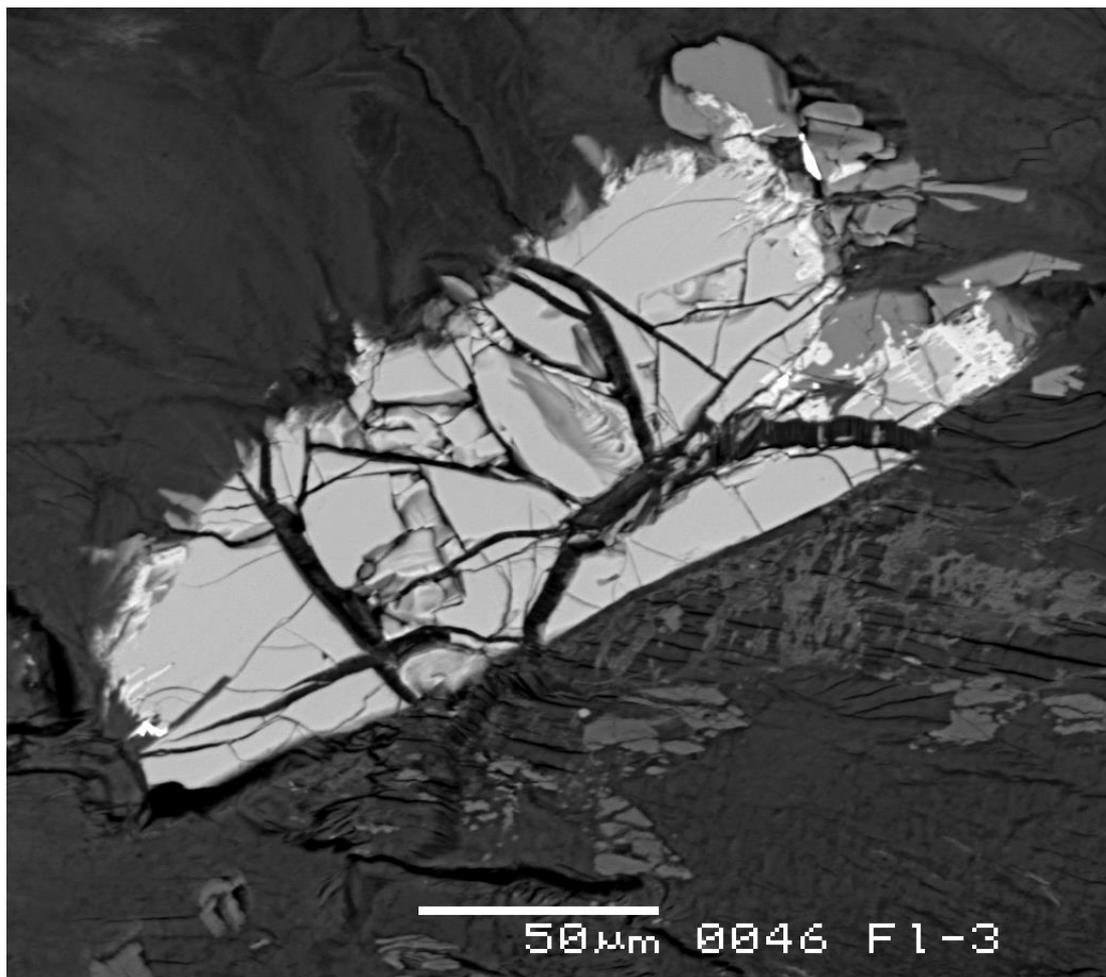


Рис. 1. Оливиновые габбро-норит-долериты Балаклавы. С армоколитом ассоциирует бадделеит (ярко-белый). Армоколит с краёв замещают ильменит (светлый) и более поздний титанит (серый). В отражённых электронах.

С армоколитом ассоциируют редкие мельчайшие кристаллы бадделеита ZrO_2 и цирконолита. Состав цирконолита Балаклавы - $(Ca_{0.7}Y_{0.2}REE_{0.1})_1 Zr (Ti_{1.6}Fe^{2+}_{0.3}Fe^{3+}_{0.1})_2O_7$ (Спиридонов и др., 2019а); это ещё один раннемагматический минерал, богатый титаном.

Сохранность армоколита и цирконолита в малоглубинных интрузивах габброидов Горного Крыма, возможно, обусловлена слабым развитием в них позднемагматических процессов.

Магнезиальный ильменит оливиновых пород Балаклавы обрастает и замещает

Компо- ненты	1	2	3	4	5	6	7	8
MgO	8.42	8.19	7.71	7.55	7.54	7.47	7.26	6.91
NiO	0.17	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	Нпо
FeO	10.39	9.92	11.28	11.36	11.11	10.12	11.61	11.71
MnO	0.09	0.17	нпо	0.10	0.09	0.15	нпо	Нпо
ZnO	0.03	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	Нпо
CaO	нпо	0.10	нпо	нпо	нпо	0.34	нпо	Нпо
TiO ₂	65.96	64.51	65.02	64.41	64.18	63.48	63.89	63.11
Fe ₂ O ₃	13.44	16.22	14.83	14.55	15.12	17.89	15.65	16.01
Al ₂ O ₃	1.53	нпо	1.25	1.06	1.08	нпо	0.78	0.48
V ₂ O ₃	1.37	1.61	1.47	1.41	1.56	1.69	1.48	1.62
Cr ₂ O ₃	0.13	0.21	0.19	0.13	0.16	0.13	нпо	0.73
Сумма	101.53	101.24	101.75	100.57	100.84	101.27	100.67	100.57
Число атомов в формуле в расчёте на три атома металлов								
Mg	0.447	0.443	0.412	0.408 ₅	0.407	0.404	0.394	0.377
Fe ²⁺	0.310	0.301	0.338	0.345	0.336	0.307	0.353	0.358
Fe ³⁺	0.361	0.443	0.400	0.398	0.412	0.489	0.430	0.441
Ni	0.005	-	-	-	-	-	-	-
Mn	0.003	0.005	-	0.003	0.003	0.005	-	-
Zn	0.001	-	-	-	-	-	-	-
Ca	-	0.003	-	-	-	0.013	-	-
Ti	1.766	1.752	1.750	1.756	1.746	1.729	1.747	1.735
V	0.039	0.047	0.042	0.041	0.045	0.049	0.043	0.047
Al	0.064	-	0.053	0.045	0.046	-	0.033	0.021
Cr	0.004	0.006	0.005	0.004	0.005	0.004	-	0.021
сумма	3							
О	5							

армолколит, слагает по нему псевдоморфозы (рис. 2). Обычно в тех участках пород, где развит магнезиальный ильменит, армолколит отсутствует. Магнезиальный ильменит

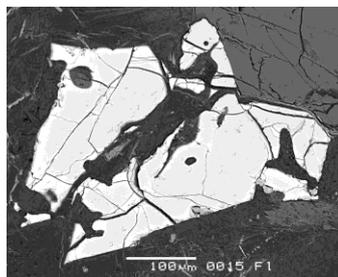


Рис. 2. Псевдоморфоза магнезиального ильменита с 8 масс. % MgO по армолкоlitу. В отражённых электронах.

Таблица 2. Химический состав (масс. %) магнезиального ильменита.

Плагиоцеролиты и оливиновые габбро-норит-долериты. Балаклава, Крым

Примечания. Количество FeO и Fe₂O₃ рассчитано по стехиометрии; нпо – ниже предела

Компо- ненты	9	10	11	12	13	14	15	16
MgO	8.23	8.26	8.17	8.18	7.54	7.23	6.91	5.40
NiO	нпо	Нпо	нпо	нпо	нпо	0.20	0.14	0.21
FeO	30.89	31.24	30.90	31.25	31.45	33.30	34.21	36.03
MnO	0.38	0.39	0.38	0.39	0.32	0.42	0.44	0.35
ZnO	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
TiO ₂	51.08	51.55	51.07	51.44	50.32	52.09	52.50	51.40
Fe ₂ O ₃	7.39	7.03	7.60	6.93	7.91	5.96	6.49	5.87
Al ₂ O ₃	нпо	Нпо	нпо	нпо	нпо	0.09	0.12	0.04
V ₂ O ₃	0.91	0.89	0.91	0.89	0.93	0.78	0.94	0.93
Cr ₂ O ₃	0.73	0.72	0.73	0.72	0.70	0.42	0.67	0.33
Сумма	99.61	100.08	99.76	99.80	99.17	100.49	102.43	100.56
Содержание миналов, мол. %								
MgTiO ₃	29.3	29.3	29.2	29.1	27.1	25.7	24.2	19.5
NiTiO ₃	-	-	-	-	-	0.4	0.3	0.4
FeTiO ₃	61.7	62.1	61.8	62.3	63.5	66.4	67.2	72.8
MnTiO ₃	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6	0.8	0.9	0.7
Сумма	91.8	92.2	91.8	92.2	91.2	93.3	92.6	93.4
FeFeO ₃	6.6	6.3	6.6	6.3	7.1	5.3	5.7	5.3
AlAlO ₃	-	-	-	-	-	0.2	0.2	0.1
VVO ₃	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9
CrCrO ₃	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.4	0.6	0.3

обнаружения.

содержит 5-8.5 масс. % MgO, беден марганцем, с ростом магнезиальности в ильмените несколько увеличивается содержание хрома (табл. 2). В единичном образце обнаружена примесь ниобия – 0.07 масс. % Nb₂O₅. Магнезиальный ильменит на одну треть - одну четверть состоит из минала гейкилита (рис. 3).

С магнезиальным ильменитом и бадделитом иногда образуют сростания ещё одни раннемагматические минералы, богатые титаном, - диморфы чевкинит-(Ce) и перрьерит-(Ce)(REE,Ca)₄(Fe²⁺,Mg)₁(Fe³⁺,Ti,Al)₂Ti₂[O₈/Si₈O₂₈] (Спиридонов и др., 2019б).

Габбро-норит-долериты оливиновые, безоливиновые, кварцевые. В этих породах ведущий минерал титана – титаномагнетит, содержание которого в отдельных типах габброидов Аю-Дага достигает 15-20 об. %. В средне-крупнозернистых габбро-норит-долеритах в центре интрузивов титаномагнетит обычно образует сидеронитовые агрегаты, цементирующие ромбический и моноклинный пироксены, анортит и битовнит; размер его ксеноморфных кристаллов до 3-6 мм. В мелко-среднезернистых габброидах мелких интрузивных тел и фации эндоконтакта крупных развиты обособленные скелетные кристаллы титаномагнетита. Титаномагнетит оливиновых габбро-норит-долеритов содержит от 0.15 до 2.1 масс. % Cr₂O₃, 12.3-15.4 масс. % TiO₂, до 4.2 % Al₂O₃, до 3.4 %

V₂O₃, 0.1-0.9 % MnO, 0.3-0.5 % ZnO. В титаномагнетите безоливиновых габброидов ПАИК

хром не обнаружен. Титаномагнетит безоливиновых габброидов ПАИК, ассоциирующий с минералом – концентратором Mn - ильменитом, содержит 11.8-15.6 масс. % TiO_2 , до 3.9 % Al_2O_3 , 0.4-2.6 % V_2O_5 , 0.1-0.9 % MnO , 0.2-0.5 % ZnO . В редком типе габброидов ПАИК – в Кушнарёвском интрузиве ильменит отсутствует, титаномагнетит в них обогащён марганцем, содержит 3.6-4.6 масс. % MnO .

В габбро-норит-долеритах ильменит обычно слагает мелкие пластинчатые кристаллы и их агрегаты, не столь редки скелетные кристаллы, по форме напоминающие титаномагнетит. Ильменит нередко содержит мельчайшие пластинчатые выделения – ламелли распада гематита. По составу ильменит беден магнием, содержит от следов до 1.7 масс. % MgO . Содержания марганца широко варьируют от 0.3 (редко), обычно от 1.2 до 4.5-8, изредка до 11.2 % MnO . Ильменит с заметным количеством магния содержит от 0.03 до 0.3, изредка до 0.6 масс. % Cr_2O_3 . Содержания ванадия в ильмените габброидов ПАИК до 1.5 масс. % V_2O_5 , цинка и никеля – до 0.3 %. Единичные образцы ильменита содержат от 0.05-0.06 до 0.17- 0.20 масс. % Nb_2O_5 . Аналогичный по составу ильменит, бедный Mg и обогащённый Mn, развит в плагиолерцолитах и богатых оливином габбро-норит-долеритах, где этот ильменит активно замещает армоколлит.

На диаграмме (рис. 3) поля состава магнезиального ильменита богатых оливином пород ПАИК (крестики) и ильменита обычных габброидов ПАИК (квадраты) обособлены.

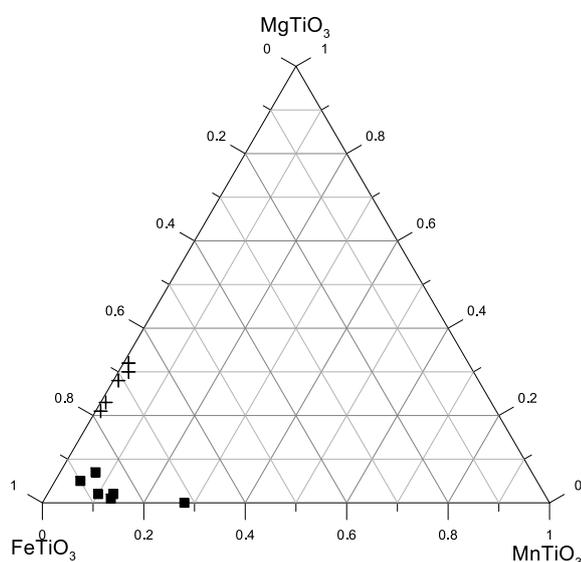


Рис. 3. Состав ильменита ПАИК. Кресты - магнезиальный ильменит. Квадраты – ильменит, бедный магнием и обогащённый марганцем.

В силлообразном интрузиве у реки Бодрак в участке его резкого изгиба оливиновые габбро-норит-долериты содержат заметную вкрапленность амфиболов ряда керсутит – гастингсит и жилы лампрофиров, богатые этими амфиболами. НизкоTi керсутит и гастингсит, содержащие до 3.8 масс. % TiO_2 , активно замещают титаномагнетит и авгит.

Габбро-норит-диориты бескварцевые и кварцевые, кварцевые диориты. Эти породы содержат множество мелких выделений титаномагнетита и реже ильменита, состав которых близок к составу титаномагнетита и ильменита кварцевых габбро-норит-долеритов.

В целом, состав ильменита пород ПАИК достаточно типичен для известково-щелочных магматических пород пониженной щёлочности (Багдасаров, 1986).

Все типы интрузивных пород ПАИК, как и иные породы Горного Крыма допозднеюрского возраста, захвачены низкоградным метаморфизмом погружения в условиях цеолитовой и пренит-пумпеллиитовой фаций (Спиридонов, 2018; Спиридонов и др., 2018a). При этом часть плагиоклаза заместили агрегаты ломонтита, альбита, пренита,

пумпеллиита, клиноцоизита; оливин и ромбический пироксен были замещены лизардитом, затем антигоритом и антофиллитом; армоколлит, титаномагнетит и ильменит были частично замещены титанитом, псевдобрукитом, гематитом, рутилом, анатазом, пиритом.

Поэтому, многие типы габброидов ПАИК, например, интрузива Аю-Даг, изначально богатые титаномагнетитом, имеют низкую магнитную восприимчивость.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-05-00490).

Литература

Багдасаров Э.А. Сравнительная характеристика состава ильменитов изверженных пород // Зап. ВМО. 1986. Ч. 115. Вып. 2. С. 151-165.

Заварицкий А.Н. Изверженные горные породы. М.: изд. АН СССР. 1955. 480 с.

Спиридонов Э.М. Метаморфические образования киммерид Горного Крыма // Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. М.: Геос. 2018. Т. II. С. 223-227.

Спиридонов Э.М., Семиколенных Е.С., Лысенко В.И., Филимонов С.В., Коротаева Н.Н., Кривицкая Н.Н. Армоколлит-содержащие островодужные плагиоцерциты и оливиновые габбро-норит-долериты Балаклавы, Крым // Вестн. МГУ. Серия геолог. 2019а. № 5. С. 39-52.

Спиридонов Э.М., Семиколенных Е.С., Филимонов С.В., Коротаева Н.Н., Кривицкая Н.Н. Чевкинит-(Се) и перьерит-(Се) островодужных кварцевых габбро-норит-долеритов интрузива Аю-Даг, Горный Крым // Зап. РМО. 2019б. Ч. 148. № 5. С. 57-72.

Спиридонов Э.М., Фёдоров Т.О., Ряховский В.М. Магматические образования Горного Крыма. Статьи 1 и 2 // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1990. Т. 65. Вып. 4. С. 119-134. Вып. 6. С. 102-112.

Спиридонов Э.М., Филимонов С.В., Руденко И.Е., Путинцева Е.В., Коротаева Н.Н., Кривицкая Н.Н., Фролова Ю.В., Ладыгин В.М., Овсянников Г.Н. Петля регионального низкоградного метаморфизма вулканогенных, интрузивных и терригенных пород мезозой Горного Крыма // Ломоносовские чтения–2018. МГУ: 2018а. <https://conf.msu.ru/rus/event/4912/>

Спиридонов Э.М., Филимонов С.В., Семиколенных Е.С., Коротаева Н.Н., Кривицкая Н.Н. Цирконолит, бадделит, циркон и торит островодужных анортит-битовнитовых кварцевых габбро-норит-долеритов Аю-Дага, Крым // Вестн. МГУ. Серия геолог. 2018б. № 5. С. 70-78.

Фрондел Дж. Минералогия Луны. М.: Мир. 1978. 333 с.

Ярошевский А.А. Проблемы современной геохимии. Новосибирск: изд. НГУ. 2004. 194 с.

Anderson A.T., Bunch T.E., Cameron E.N. Armalcolite: a new mineral from the Apollo 11 samples // Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf. Geochim. Cosmochim. Acta. 1970. Vol. 34. Suppl. 1. P. 55-63.

Cawthorn R. C., Biggar G. M. Crystallization of titaniferous chromite, magnesian ilmenite and armalcolite in tholeiitic suites in the Karoo igneous province // Contrib. Miner. Petrol. 1993. Vol. 114. P. 221—235.

Friel J.J., Harker R.I., Ulmer G.C. Armalcolite stability as a function of pressure and oxygen fugacity // Geochim. Cosmochim. Acta. 1977. Vol. 41. P. 404-410.

Philpotts A.R., Ague J.J. Principles of igneous and metamorphic petrology. Cambridge University Press. 2009. 667 p.

Sørensen H. The agpaitic rocks: an overview // Mineral. Mag. 1997. Vol. 61. P. 485-498.

Steele I.M. Ilmenite and armalcolite in Apollo 17 breccias // Amer. Mineral. 1974. Vol. 59. P. 681-689.

Velde D. Armalcolite – Ti-phlogopite – diopside – analcite – bearing lamproites from Smoky Butte, Garfield County, Montana // Amer. Mineral. 1975. Vol. 60. P. 566-573.