

**МАГНЕТИТ-ОРТОПИРОКСЕНОВЫЕ СИМПЛЕКТИТЫ В УРАЛЬСКИХ  
ОЛИВИНОВЫХ ГАББРО: СТРУКТУРНЫЙ СЛЕД РЕАКЦИЙ ОКИСЛЕНИЯ  
В СВЯЗИ С ПРОЦЕССОМ ВОДНОГО МЕТАМОРФИЗМА**

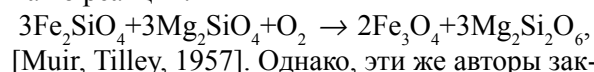
**А.А. Ефимов, К.Н. Малич**

**Введение**

Тонкие «мирмекитоподобные» графические выделения магнетита в уральских оливиновых габбро, обособленные от гораздо более крупных, обычно сидеронитовых выделений магнетита, давно обратили на себя внимание петрографов. Н.К. Высоцкий [1913, табл. 21, фиг. 6] впервые привел микрофотографию таких выделений, не упомянув, однако, о том, с каким из фемических силикатов ассоциирует магнетит. Е.В. Свешникова [1959, с. 61, рис. 3] упоминает о «вростках магнетита в гиперстене, заместившем оливин». О.А. Воробьева и др. [1962, с. 188, рис. 76] упоминают о «мирмекитоподобных сростаниях титаномагнетита с оливином... в оливиновых габбро», считая их продуктами метасоматического замещения оливина. С.А. Кашин [1948, рис. 11, 21] приводит микрофотографии симплектитов, отмечая «выделения рудного минерала в форме графических сростаний с ромбическим пироксеном» (с. 18). Упоминания о графических сростаниях магнетита с силикатами в габбро Урала и других регионов многочисленны [Сирин, 1962; Фоминых и др., 1982; Ленников, 1968; Irvine, 1974; Himmelberg et al, 1986 и мн. др.].

Во всех этих случаях речь идет о характерных для уральских оливиновых габбро магнетит-ортопироксеновых симплектитах; упоминание о магнетит-оливиновых симплектитах [Воробьева и др., 1962], по-видимому, ошибочно. Этим образованиям свойственны две особенности: во-первых, они неизменно тяготеют к оливину, но не имеют морфологии корон, т. е. их нельзя рассматривать как реакционные зоны на границе оливина с другими минералами; во-вторых, симплектиты содержат ортопироксен, хотя порода обычно не содержит «первичного» ортопироксена. Поэтому возникновение предположения о замещении оливина «вторичным» ортопироксеном вполне понятно. Понятно также, что до появления микрозонда симплектиты не могли быть детально изучены. Тем не менее уже 50 лет тому назад вкрапленники оливина с магнетит-ортопироксеновыми обособлениями в термически метаморфизованных пикритовых базальтах были истолкова-

ны как образовавшиеся при окислении оливина по реакции:



В чистом виде указанная реакция наблюдалась лишь в субэральных потоках базальта и в лабораторных экспериментах, в которых оливин нагревался на воздухе [Haggerty, Baker, 1967].

**Постановка вопроса**

Несоответствие состава симплектитов теоретической реакции окисления оливина, очевидно, явилось главной причиной того, что в обширной на данный момент литературе по магнетит-ортопироксеновым симплектитам преобладают объяснения, так или иначе связанные с позднемагматическими реакциями оливина с расплавом или даже с кристаллизацией из расплава, как предполагалось С.А. Кашиным [1948, с. 48] для волковских габбро на Урале: «Более правильным было бы... считать, что образование графических структур магнетита с силикатами может произойти путем одновременного отложения этих минералов при кристаллизации в точке эвтектики». Те же симплектиты в габбро Платиноносного пояса Аляски рассматривались как результат реакции: оливин+расплав → ортопироксен+магнетит [Himmelberg et al, 1986]. В габбро Wateranga (Австралия), как предполагалось, оливин реагировал с остаточным расплавом в каше кристаллов, давая подобные эвтектике прорастания ортопироксена и магнетита [Ambler, Ashley, 1977]. Для ортопироксен-магнетит-ильменитовых симплектитов интрузии Скергаард предполагалось образование путем окисления включений Ti-магнетита в магматическом ортопироксене [Haselton, Nash, 1975]. Наконец, симплектиты в габбро из юго-западной Швеции рассматривались как продукты замещения оливина, образовавшиеся одновременно с замещением ильменита и Ti-магнетита биотитом, ро-

говой обманкой и шпинелью во время, или медленно после магматической кристаллизации при температурах приблизительно 660-680 °C [Zeck et al, 1982].

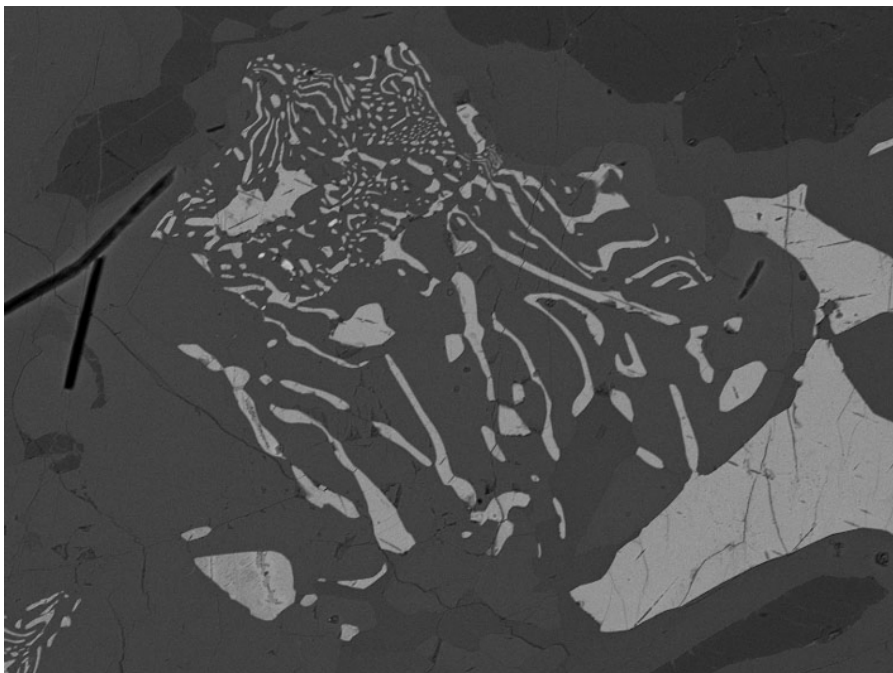
При строго определенном составе оливина ( $Fa_{50}Fo_{50}$ ) возможна реакция:  
 $3Fe_2SiO_4 + 3Mg_2SiO_4 + O_2 \rightarrow 2Fe_3O_4 + 3Mg_2Si_2O_6$ ,  
 т. е. окисление фаялита с образованием магнетита и энстатита. Однако, при окислении характерного для габбро оливина, более магнезиального, чем  $Fa_{50}$ , невозможно образование одного магнетит-ортопироксенового продукта, – неизбежен избыточный форстерит. Если допустить, что данные симплектиты – продукт окисления такого оливина в некоей замкнутой системе и игнорировать избыточный форстерит, следовало бы ожидать, что новообразованные ортопироксен и магнетит (поскольку образовались по оливины) будут иметь специфический состав: первый не должен содержать Fe, Al, Ca, Ti, а второй, в отличие от породообразующего магнетита, не должен содержать Ti и V. При соблюдении этих условий предположение об окислении оливина в объеме, занимаемом симплектитом, было бы доказано однозначно. Однако, как установлено исследованиями с применением микронзонда, существенной разницы в составе между фазами симплектитов и габбро не наблюдается [Van Lamoen, 1979; Zeck et al., 1982; Ефимов, 1994 и др.]. Из этого как

будто-бы следует, что теоретические соображения, на основании которых симплектиты можно было бы считать запечатленными в породе, структурно изолированными продуктами реакции оливина с кислородом, не подтверждаются.

### Результаты

Авторы изучили состав магнетит-ортопироксеновых симплектитов в 20 образцах оливинсодержащих габбро, главным образом, из массивов Платиноносного пояса Урала. Породы представлены троктолитами, оливиновыми габбро и габбро-норитами с оливином; все они содержат «первичный» сидеронитовый магнетит, свидетельствующий о том, что их фемические минералы насыщены железом. На микрорентгеноспектральном анализаторе CamScan MV2300 (ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург) был определен химический состав магнетита и ортопироксена симплектитов и минералов вмещающей породы – оливина, клинопироксена, магнетита и плагиоклаза. Анализами охвачен весь диапазон железистости фемических минералов – от 20 до 50 ат. %, при диапазоне железистости пород от 33 до 65 ат. % и составе плагиоклаза от  $An_{50}$  до  $An_{90}$  (табл. 1).

В простейшем случае симплектит представляет собой одно оптически однородное зерно (т. е. монокристалл) ортопироксена непра-



SEM MAG: 250 x    DET: BSE Detector    200 µm  
 HV: 20.0 kV    DATE: 12/12/06  
 VAC: HiVac    Device: MV2300    Vega ©Tescan  
 Digital Microscopy Imaging

Рис. 1. Скопления магнетит-ортопироксеновых симплектитов на месте оливина в оливиновом габбро-норите 25375 (Кумбинский массив). Графические и крупные сидеронитовые («первичные») выделения магнетита близки по содержанию  $TiO_2$  (соответственно 6,62 и 7,31 мас. %).

Химические характеристики минералов симплектитов и вмещающих оливинсодержащих габбро (по данным микрозондовых анализов)

№ обр	Массив	Порода	Порода F	Орх F	Olv F	Срх F	Mt1 TiO <sub>2</sub>	Mt2 TiO <sub>2</sub>	Plg An	Ilm MgO
592a	дж	ТР	33,6	22,96	22,00	–	0,04	0,07	88,69	–
592a	дж	ТР	33,6	19,80	21,10	–	0,45	0,65	90,11	–
592e	дж	ТР	33,5	21,54	23,00	–	0,39	0,45	89,50	–
1605	кчк	ОГ	48,5	23,27	25,10	–	2,83	3,4	–	–
1693	пвд	ОГ	54,1	25,89	28,31	–	5,88	10,58	–	–
1712	пвд	ОГ	50,2	26,90	30,50	–	6,09	7,27	83,56	–
7059a	пвд	ОГ	49,2	21,32	22,50	–	0,13	1,27	73,58	3,33
7087	пвд	ГН	51,6	27,08	36,55	–	1,41	2,49	–	0,04
7087	пвд	ГН	51,6	27,08	31,10	–	7,27	7,82	–	–
11381	хдт	ОГ	47,8	30,05	35,09	25,71	0,37	1,28	88,69	0,54
11381	хдт	ОГ	50,1	31,09	37,30	27,75	0,37	1,28	88,69	–
11433	хдт	ОГ	51,1	30,16	32,27	23,36	0,39	3,94	73,58	3,07
25116	кмб	ГН	52,2	36,92	42,68	29,36	10,16	10,78	55,41	–
25119	кмб	ГН	59,2	40,93	50,00	36,00	10,45	10,16	61,91	–
25120	кмб	ГН	54,8	33,85	42,93	29,63	7,96	8,72	51,05	2,85
25126	кмб	ГН	61,9	43,08	48,47	35,71	5,17	8,62	70,46	0,94
25128	кмб	ГН	65,4	41,88	–	36,35	11,33	12,27	54,90	1,56
25196	кмб	ГН	53,9	45,13	–	38,46	3,24	3,48	57,58	0,27
25242	кмб	ГН	59,4	42,41	54,50	34,21	10,01	10,58	66,58	1,16
25373	кмб	ГН	50,3	33,33	40,20	29,09	5,69	6,12	83,15	2,43
25375	кмб	ГН	54,6	33,33	42,13	30,02	6,62	7,31	69,73	–
25375	кмб	ГН	54,6	34,01	42,13	30,02	5,91	6,15	63,37	–
25587	ктл	ГН	56,3	36,65	45,45	36,80	5,81	6,77	51,57	–

Примечание: **Массивы:** дж – Денежин Камень, кчк – Качканарский, пвд – Павдинский, хдт – Хада-тинский (Масловский блок), кмб – Кумбинский, ктл – Кытлымский. **Горные породы:** ТР – троктолит, ОГ – оливиновое габбро, ГН – габбро-норит. **Минералы:** Орх – ортопироксен симплектитов (железистость, ат. %), Oliv, Срх – «первичные» оливин и клинопироксен (железистость, ат. %), Mt1 – магнетит симплектитов, Mt2 – «первичный» сидеронитовый магнетит (содержание TiO<sub>2</sub>), Plg плагиоклаз (An, мол. %), Ilm ильменит (содержание MgO).

вильно-изометрических очертаний в сростании с оливином, до 500 мкм в поперечнике, содержащее вросстки магнетита с прихотливыми, «мирмекитоподобными» очертаниями, шириной в шлифе до 20-30 мкм. Обычны скопления таких зерен ортопироксена различной величины, каждое со своим рисунком магнетитовых вростков (рис. 1), иногда замещающие оливин полностью или почти полностью.

Из полученных данных (см. табл. 1) следует, что существенной разницы в составе между фазами симплектитов и габбро не обнаружено. Железистость ортопироксена симп-

лектитов и оливина во всем диапазоне составов связаны моновариантной зависимостью (рис. 2); линейный химический тренд с коэффициентом корреляции 0,97 закономерно отклоняется от линии равных значений при отношении  $F_{olv}:F_{орх}$ , равном примерно 1,2. Хорошая корреляция наблюдается также между составами ортопироксена симплектитов и клинопироксена породы: линейный химический тренд с коэффициентом корреляции 0,90 закономерно отклоняется от линии равных значений при отношении  $F_{орх}:F_{срх}$ , равном примерно 1,2 (рис. 3). По этим данным можно очень грубо оценить темпера-

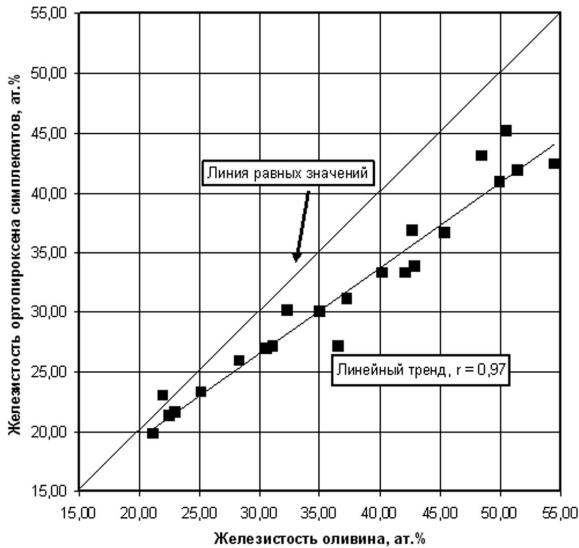


Рис. 2. Корреляция составов оливина в породах и ортопироксена в симплектитах.

туру образования оливин-ортопироксен-клинопироксеновой ассоциации в 700-800 °С. Наконец, содержание важнейшей примеси –  $TiO_2$  в магнетите симплектитов и в сидеронитовом магнетите породы почти одинаково в диапазоне от долей процента до 12 мас. % (рис. 4).

### Обсуждение

Из всего этого следует, что все «первичные» минералы габбро – оливин, клинопироксен, плагиоклаз и магнетит (а в оливинсодержащих габбро-норитах – еще и «первичный» ортопироксен) вместе с ортопироксеном и магнетитом симплектитов в совокупности составляют минеральную ассоциацию, находящуюся в состоянии химического равновесия. Эта ассоциация, однако, структурно неравновесна: с одной стороны – главная масса породы, сложенная зернистым (обычно примерно равнозернистым) агрегатом силикатов и магнетита, с другой – тяготеющие к выделениям оливина, в общем ничтожные по объему, симплектиты, к тому же содержащие ортопироксен, который, как правило, в зернистом агрегате отсутствует. Структурная картина убеждает в том, что симплектиты возникли на месте оливина в результате какого-то твердофазного преобразования. И хотя составы минералов не дают возможности различить ранние и поздние минералы, появление симплектитов в породах, до этого претерпевших твердо-пластичного течения и рекристаллизацию, по-видимому, несомненно. Эти преобразования не являются

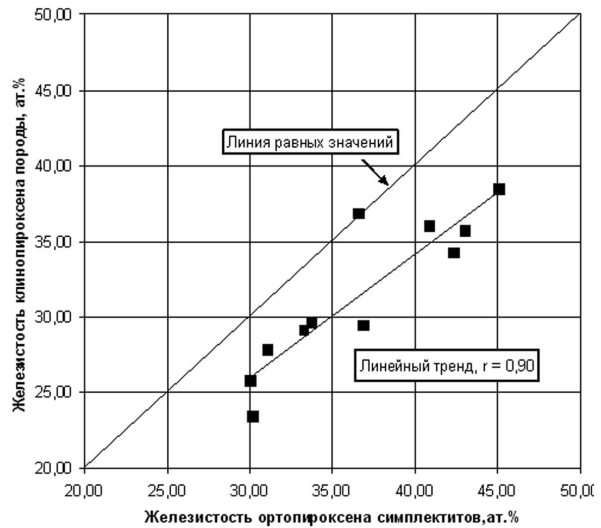


Рис. 3. Корреляция составов клинопироксена в породах и ортопироксена в симплектитах.

какими-то «субсолидусными» или вообще связанными с воздействием расплава, их следует рассматривать как связанные с каким-то метаморфическим процессом. Вопрос в том, что это был за процесс.

Было показано [Ефимов, 1984], что минеральный состав фемической части габбровых парагенезисов в самом общем виде определяется двумя принципиально различными метаморфическими реакциями, протекающими в твердой породе:

(1) Первая – управляемая масштабом привноса/выноса  $SiO_2$ : *Оливин* +  $SiO_2 \rightarrow$  *ортопироксен* (в пределе приводящая к исчезновению оливина и к появлению избыточного кварца при неизменных железистости фемических силикатов и количестве магнетита). В составах, не содержащих оливина, все ограничивается появлением (или увеличением количества) кварца.

(2) Вторая – управляемая летучестью кислорода реакция окисления/восстановления: *Оливин (точнее, фаялитовая компонента оливина)* +  $O_2 \rightarrow$  *ортопироксен* + *магнетит* (ведущая к понижению железистости фемических силикатов, к увеличению количества ортопироксена и магнетита за счет оливина, а в мыслимом пределе – к возникновению парагенезиса безжелезистых фемических силикатов и магнетита).

В природных объектах имеют место обе реакции. Во всех случаях изменения, захватывают всю массу породы, т. е. равновесия непрерывно смещаются в ту или иную сторону, в

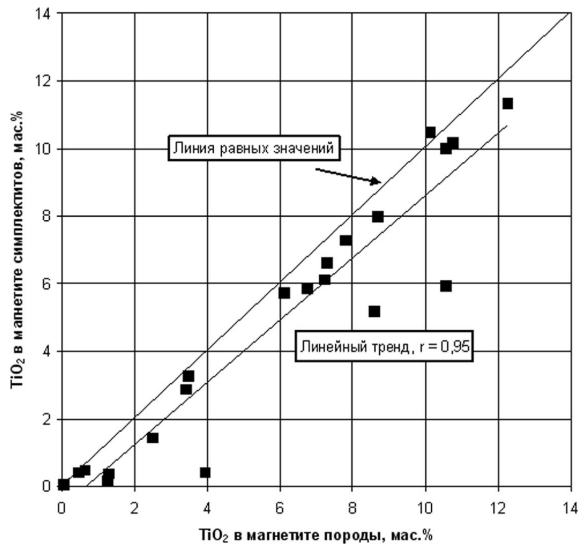
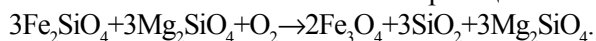


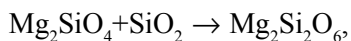
Рис. 4. Корреляция содержаний  $TiO_2$  в сидеронитовом магнетите в породах и в «мирмекитоподобном» магнетите симплектитов.

результате чего видимых следов реакций не наблюдается. В этом смысле случай с появлением магнетит-ортопироксеновых симплектитов на месте оливина – исключительный, позволяющий наблюдать начальные этапы реакции второго типа, т. е., в принципе, реакции окисления оливина. А если принять во внимание (см. рис. 2-4) тот факт, что все минералы изученных пород слагают равновесный парагенезис, можно считать, что образование симплектитов символизирует процесс окисления породы, всех ее фемических минералов, во всем ее объеме. Очень убедителен, в частности, факт появления в оливиновых габбро новой, совершенно равноправной фазы фемического парагенезиса – ортопироксена – в ничтожном количестве, в особой структурной форме.

Таким образом, фактическая картина не противоречит предположению о том, что появление магнетит-ортопироксеновых симплектитов в оливиновых габбро в принципе связано с окислением оливина в твердой породе без всякого участия расплава. Можно представить себе некий ступенчатый процесс (на самом деле этот процесс непрерывен). Оливин  $Fa_{50}Fo_{50}$  в локальном объеме окисляется по реакции:



Избыточная  $SiO_2$  немедленно реагирует с как бы не участвующим в реакции форстеритом;



т.е. образуется эквивалентное количество ортопироксена, железистость которого вслед-

ствие химического обмена  $Mg \leftrightarrow Fe$  со всей массой вмещающей породы приходит в соответствие с таковой оливина габбро. Экстрагированное из фаялита железо остается в точке реакции в виде «мирмекитоподобных» выделений магнетита в новообразованном ортопироксене, заимствующих из окружающей породы  $Ti$  и другие характерные примеси.

При окислении оливина другого состава, например, характерного для габбро  $Fa_{25}Fo_{75}$ , образуется избыточный форстерит, для превращения которого в ортопироксен  $SiO_2$  уже не хватает. Он легко реагирует с окружающим оливином, растворяясь в нем:



Эта небольшая добавка к оливину габбро делает последний менее железистым, однако, ввиду ничтожности массы избыточного форстерита эти изменения почти неощутимы.

### Выводы

Таким образом, все противоречия достаточно корректно объясняются исходя из единственного допущения, подтверждаемого микронзондовыми анализами (см. рис. 2-4): в окислении того объема оливина, на месте которого возникло симплектитовое скопление, участвовало не вещество этого объема, а *весь объем породы*, т. е. расстояния диффузии компонентов были достаточно велики. Тем не менее, кинетические следы реакции остаются в виде структурно неравновесного с окружением «пятна» симплектита в оливине. При дальнейшей рекристаллизации эти микроструктурные следы реакции могут исчезнуть.

Образование магнетит-ортопироксеновых симплектитов, безусловно, связано с каким-то моментом тектоно-метаморфической эволюции габбро-гипербазитового комплекса, когда фугитивность кислорода повышалась до уровня, превосходившего таковой буфера FMQ (фаялит-магнетит-кварц). В Платиноносном поясе появление свободного кислорода, скорее всего, связано с диссоциацией воды, проникшей в моноклинный, первично безводный комплекс в эпоху растяжения и высокотемпературной гидратации [Ефимов, 1999]. Следы начальной гидратации в габбро Пояса повсеместны и выражены, в числе прочего, в образовании амфибола и амфибол-шпинелевых симплектитов, слагающих короны на стыках оливина с другими минералами. Магнетит-ортопироксеновые симплектиты связаны с коронами и часто слага-

ют их внутренние (непосредственно прилегающие к оливину) зоны; столь же часто эти зоны сложены новообразованным «оксигенным» ортопироксеном, который можно рассматривать как результат окисления оливина, предшествовавшего гидратации. Дальнейшее развитие гидратации с образованием линейных зон и ареалов роговообманковых габбро, в конечном счете, приводит к полному исчезновению структур и продуктов окисления оливина, да обычно и самого оливина.

*Список литературы*

*Воробьева О.А., Самойлова Н.В., Свешникова Е.В.* Габбро-пироксенит-дунитовый пояс Среднего Урала. Тр. ИГЕМ АН СССР. Вып. 65. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 319 с.

*Высоцкий Н.К.* Месторождения платины Исовского и Нижне-Тагильского районов на Урале. Тр. Геол. Ком. Нов. Сер. № 62. СПб.: 1913. 694 с.

*Ефимов А.А.* Габбро-гипербазитовые комплексы Урала и проблема офиолитов. М.: Наука, 1984. 232 с.

*Ефимов А.А.* Платиноносный пояс Урала: тектоно-метаморфическая история древней глубинной зоны, записанная в ее фрагментах // Отечеств. геология. 1999. № 3. С. 31-39.

*Кашин С.А.* Медно-титаномагнетитовое оруденение в основных интрузивных породах Урала. Тр. ИГН АН СССР. Вып. 91. Серия рудн.-м-ний. № 9. М.: Изд-во АН СССР, 1948. 132 с.

*Ленников А.М.* Петрология Джугджурского анортозитового массива. М.: Наука, 1968. 159 с.

*Свешникова Е.В.* Габброидные породы Кумбинского массива на Северном Урале // Вопросы магматизма Урала. Тр. ИГЕМ АН СССР. Вып. 32. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 52-91.

*Сурин Н.А.* Магматизм и его металлогенические особенности на Приполярном и Полярном Урале. М.: Гостеолтехиздат, 1962. 288 с.

*Фоминых В.Г., Ларина Н.В., Гмыра В.Г.* Условия формирования ильменит-магнетитовых мирмекитовых агрегатов в титаномагнетитовых рудах Урала // Докл. АН СССР. 1982. Т. 267. № 4. С. 926-929.

*Ambler E.P., Ashley P.M.* Vermicular orthopyroxene-magnetite symplectites from the Wateranga layered mafic intrusion, Queensland, Australia // Lithos. 1977. V. 10. P. 163-172.

*Haggerty S.E., Baker I.* The alteration of olivine in basaltic and associated lavas // Contrib. Mineral. Petrol. 1967. V. 16. P. 233-257.

*Himmelberg G.R., Loney R.A., Craig J.T.* Petrogenesis of the ultramafic complex at the Blaschke Islands, Southeastern Alaska // U.S. Geol. Survey Bull. 1662. 1986. 14 p.

*Irvine, T.N.* Petrology of Duke Island Complex Ultramafic complex, southeastern Alaska. Geol. Soc. Am. Mem. № 138. 1974. 240 p.

*Muir I.D., Tilley C.E.* Contribution to the petrology of Hawaiian basalts, I. The picritic basalts of Kilauea // Am. J. Sci. 1957. V. 255. P. 241-253.

*Van Lamoen H.* Coronas in olivine gabbros and iron ores from Susimäki and Riuttamaa, Finland // Contrib. Miner. Petrol. 1979. V. 68. P. 259-268.

*Zeck H.P., Shenouda H.H., Runnsbo J.G. et al.* Hypersthene-ilmenite(/magnetite) symplectites in coronitic olivine-gabbro-norites // Lithos. 1982. V. 15. № 3. P. 173-182.