

А. Г. ДАВЫДЧЕНКО, В. И. БУДАНОВ, К. Т. БУДАНОВА

**ЖЕЛЕЗО-МАГНЕЗИАЛЬНЫЕ СЛЮДЫ, ГРАНАТЫ  
И АМФИБОЛЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОД  
ЮГО-ЗАПАДНОГО ПАМИРА**

Метаморфические породы Юго-Западного Памира давно привлекают внимание исследователей. Геолого-петрографической характеристике этих пород посвящены работы В. А. Николаева (1932), М. И. Клунникова (1936), В. И. Масленникова (1955), А. Г. Давыдченко (1966) и других геологов. Однако отдельные минералы пород района изучены еще слабо.

Имеющиеся литературные данные по изучению слюд, роговых обманок и гранатов показывают, что эти минералы в отдельных петрографических комплексах обладают определенными, в той или иной мере устойчивыми особенностями, которые обнаруживаются в химическом составе и соответственно в оптических свойствах минералов. Широкие колебания состава этих минералов, зависящие от исходного состава и условий формирования пород, позволяющие на основе парагенетического анализа минералов изучать физико-химические условия различных петрогенетических процессов.

**ЖЕЛЕЗО-МАГНЕЗИАЛЬНЫЕ СЛЮДЫ**

Ряд исследователей (Harry, 1950; Snelling, 1957), занимавшихся изучением химического состава биотитов метаморфических пород, указывают на повышение степени замены  $Si^{4+} \rightarrow Al^{3+}$  в алюмокремнекислородных тетраэдрах с повышением температуры. К противоположному выводу пришли Л. П. Никитина и В. Я. Хильтова (1964, 1965). Железомagneзиальные слюды, по их мнению, при повышении степени метаморфизма обогащаются кремнием и титаном. По данным С. П. Кориковского (1965), температурная зависимость величины  $a_{Si}$  (степень замены  $Si^{4+} \rightarrow Al^{3+}$  в тетраэдре) в слюдах отсутствует. Соотношение элементов, находящихся в октаэдрической позиции ( $Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}$ ), определяется, по мнению Л. П. Никитиной и В. Я. Хильтовой, главным образом концентрацией этих элементов в породе.

По данным А. А. Маракушева (1965) и ряда других исследователей, в невариантных парагенезисах железистость биотита, как и других железо-магнезиальных минералов, определяется физико-химическими условиями формирования пород. На содержание алюминия в шестерной координации в слюдах кроме первичного состава породы может оказывать влияние кислотность — щелочность среды. Повышение щелочности смещает состав биотита в направлении (истонит — сидерофиллит)  $\rightarrow$  (флогопит — аннит).

Степень окисления железа в биотитах метаморфических пород определяется первичным содержанием  $Fe_2O_3$  в породах и местными реакциями,

что связано с инертным поведением кислорода при метаморфизме (Коржинский, 1963). Повышение  $Fe^{3+}/Fe$  ведет к изменению цветов плеохроизма с появлением зеленоватых оттенков (Островский, Петров, 1940; Наума, 1959).

По результатам химического анализа и изучения оптических свойств железо-магнезиальных слюд Юго-Западного Памира построена диаграмма (рис. 1) зависимости показателя преломления  $N_g$  от железистости  $F$  ( $F = \frac{FeO + 2Fe_2O_3}{FeO + 2Fe_2O_3 + MgO}$ ), на которую нанесены кривые зависимости  $N_g$  от  $F$  для различных слюд. Как видно, большинство полученных точек изученных слюд ложится вблизи кривой 5 для слюд метаморфических пород. На линию 2 для биотитов из пегматитов, по В. С. Соболеву, ложатся точки биотитов из силлиманит-, кианит- и мусковитсодержащих пород, образовавшихся в результате процессов кислотного выщелачивания регрессивной стадии метаморфизма и ультраметаморфизма (Давыдченко, 1966). К линии 1 для биотитов из гранитов, по В. С. Соболеву, тяготеют слюды из различных по составу ультраметаморфических гранито- и гранодиорито-гнейсов. Для них же, а также для слюд из продуктов кислотного выщелачивания характерна наиболее высокая железистость.

Магнезиальные члены ряда железо-магнезиальных слюд из различных по генезису пород района характеризуются близкой железистостью ( $F = 2,6 - 7,5\%$ ), однако по показателю преломления  $N_g$  отчетливо выделяются две группы слюд: из метаморфических карбонатных пород без заметных следов метасоматических процессов ( $N_g = 1,561 - 1,567$ ) и из метасоматических карбонатных пород ( $N_g = 1,575 - 1,582$ ). Учитывая близкие значения в обеих группах слюд железистости и титанистости, можно предположить, что указанные различия в показателе преломления обуславливаются различным содержанием фтора, поскольку последний наряду с Fe, Ti и  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  оказывает большое влияние на показатели преломления (Соболев, 1949, 1950). При замещении всего гидроксила фтором  $N_g$  понижается на 0,02 (Deer а. о., 1963). С высокой фтористостью слюд, по-видимому, связано также значительное отклонение точек от линии 4 (см. рис. 1).

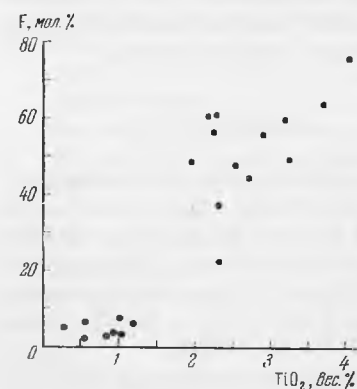


Рис. 2. Связь железистости и титанистости железо-магнезиальных слюд

Изменение титанистости в значительной мере согласуется с железистостью (рис. 2). Отклонения с аномально повышенной железистостью отмечаются для слюд из мусковит-силлиманит- и кианитсодержащих гнейсов.

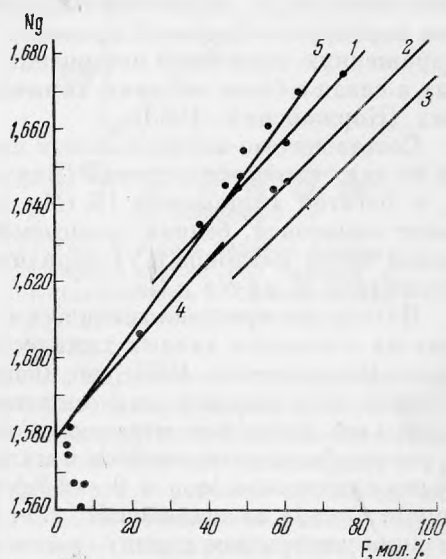


Рис. 1. Диаграмма для определения железистости по показателю преломления  $N_g$  железо-магнезиальных слюд

1 — биотиты из гранитов; 2 — биотиты из пегматитов; 3 — биотиты, богатые фтором; 4 — магнезиальные и железо-магнезиальные слюды из флогопитовых и скарновых месторождений; 5 — железо-магнезиальные слюды метаморфических пород (1—3 — по В. С. Соболеву, 1950; 4 — по Л. И. Шабынину, 1958; 5 — по Л. Н. Никитиной, 1963)

Высокотитанистые биотиты характерны для мигматитов, пегматитов, гранито- и гранодиорито-гнейсов.

Степень окисления железа ( $f_0 = \frac{Fe_2O_3}{Fe_2O_3 + FeO} \cdot 100\%$ ) для анализированных биотитов из различных генетических групп пород и в целом для района варьирует в широких пределах (3,7—38,6%). Можно подметить слабо выраженную тенденцию повышения  $f_0$  в основных богатых кальцием породах в связи с более высоким химическим потенциалом кислорода в последних (Коржинский, 1963).

Состав железо-магнезиальных слюдов обычно представляется в виде смеси из двух изоморфных серий (Винчелл, 1953): истонит-сидерофиллитовой, т. е. богатой глиноземом  $[K(Mg, Fe)_{2,5}Al_{0,5}(Si_{2,5}Al_{1,5}O_{10})(OH)_2]$  и флогопит-аннитовой, бедной глиноземом  $[K(Mg, Fe)_3Si_3AlO_{10}(OH)_2]$ , с заменой части катионов в VI координации на Ti,  $Fe^{3+}$ , Mn и некоторым изоморфизмом K на Na и Ca.

Исходя из кристаллохимических формул изученных слюдов, рассчитанных на основании данных химического анализа катионным методом (Борнеман-Старынкевич, 1964), по процентному содержанию алюминия в шестерной координации ( $a_{VI}$ ) выделяются две обособленные группы слюдов. Слюды из мраморов, метасоматических карбонатных пород, амфиболитов и роговообманковых гнейсов и мигматитов, т. е. богатых кальцием пород, бедны глиноземом ( $a_{VI} = 0 - 8\%$ ) и приближаются к флогопит-аннитовой серии. Слюды из целлитовых, т. е. богатых  $Al_2O_3$  пород, образуют обогащенную глиноземом группу ( $a_{VI} = 12 - 23\%$ ). К этой же группе относятся истониты ( $F = 6,9\%$ ;  $Ng = 1,564$ ;  $a_{Si} = 28,0\%$ ;  $a_{VI} = 19,7\%$ ) из диопсид-плагноклаз-кварцевых пород.

Степень замены кремния алюминием ( $a_{Si} = 26 - 32\%$ ) не контролируется ни генезисом, ни принадлежностью биотита к той или иной ступени минерального равновесия, что могло бы говорить о температурной или другой зависимости содержания алюминия в четверной координации.

Отсутствует также какая-либо заметная связь между  $a_{Si}$  или  $a_{VI}$  и железистостью, что согласуется с выводами С. П. Кориковского (1965). Однако для суммарного содержания алюминия в биотитах в зонах прогрессивного метаморфизма устанавливается тенденция понижения его с переходом к более высокотемпературным минеральным парагенезисам.

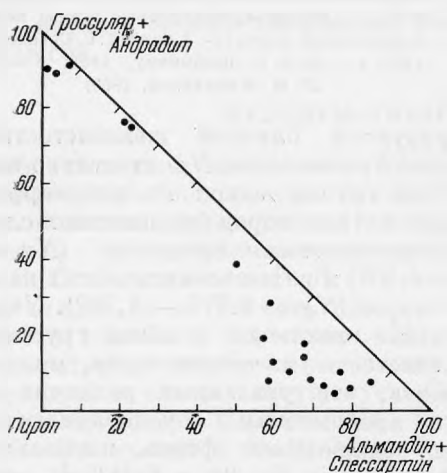


Рис. 3. Диаграмма состава гранатов

## ГРАНАТЫ

Для гранатов общепризнанным является увеличение предельного содержания магния по мере увеличения степени метаморфизма (Маракушев, 1965). Отмечается тенденция замены  $(CaO - MnO)$  на  $(FeO + MgO)$  с температурой (Sturt, 1962).

Составы анализированных гранатов метаморфических пород Юго-Западного Памира нанесены на диаграмму (рис. 3), из которой видны колебания в содержании ведущих компонентов. Выделяются гранаты из скарнов, связанных с гранитоидами возраста  $J_3 - Cr_1$ . Эти гранаты — гроссулярового состава с незначительным содержанием андрадитового (5—14,6%) и Mg- $Fe^{2+}$ -Mn-(9,2—24,5%) компонентов. В гранато-везувияновом и гранато-пироксеновом скарнах отмечается повышенное содержание альмандина (21,9% и 18,0% соответственно).

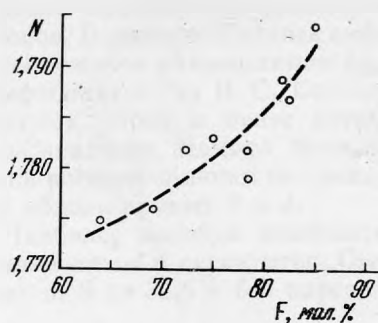


Рис. 4. Зависимость показателя преломления гранатов от их железистости

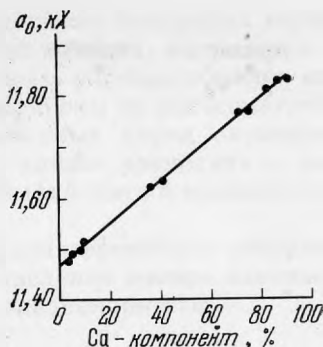


Рис. 5. Связь размера элементарной ячейки ( $a_0$ ) граната с содержанием Са-компонента (андрадит + гроссуляр)

Гранаты с повышенным содержанием пиропового компонента (до 32,7%) характерны для наиболее метаморфизованных пород центральных частей Юго-Западного Памира. Гранаты из мигматитов и пегматитов отличаются повышенной железистостью; их состав отвечает альмандину с существенным или даже высоким (в парагенезисе с роговой обманкой) содержанием кальциевого компонента (до 37,0%). Наиболее низким содержанием пироба (8,1%) и довольно высоким — спессартина (9,1%) характеризуется гранат из пегматитов возраста  $J_3 - C_{r1}$ .

О связи показателя преломления гранатов с общей железистостью можно судить по диаграмме (рис. 4).

Параметр  $a_0$  элементарной ячейки гранатов изменяется от 11,48 до 11,83 кХ и линейно зависит от содержания Са-компонента (рис. 5). Подобная зависимость  $a_0$  от содержания СаО (мол. %) в составе граната получена Б. В. Чесноковым (1961). Почти однозначная зависимость параметра  $a_0$  от содержания СаО объясняется тем, что кальций обладает наибольшим радиусом, а размер входящих в состав гранатов катионов, по данным М. А. Гневушева и других (1956), определяет размер элементарной ячейки.

#### АМФИБОЛЫ

Составы роговых обманок принято представлять как смесь четырех изоморфных серий (Deer, а. о., 1963):

тремолит-актинолит:  $Ca_2(Mg, Fe)_5 \times [Si_8O_{22}] (OH, F)_2$ ;

эдениит-ферроэдениит:  $NaCa_2(Mg, Fe)_5 [Si_7AlO_{22}] (OH, F)_2$ ;

паргасит-феррогастингсит:  $NaCa_2(Mg, Fe)_4 (Al, Fe^{3+}) [Si_6Al_2O_{22}] (OH, F)_2$ ;

чермакит-феррочермакит:  $Ca_2(Mg, Fe)_3 (Al, Fe^{3+})_2 [Si_6Al_2O_{22}] (OH, F)_2$ .

Сочетание различных типов изо- и гетеровалентного изоморфизма (Гинзбург, 1961) приводит к широкому колебанию состава амфиболов в сторону любого из крайних членов. Имеются высказывания о возможности широкого изоморфизма в группе амфиболов с непрерывным изменением состава от куммингтонита до актинолита и обыкновенной роговой обманки (Винчелл, 1953) и даже до ромбических амфиболов (Борнеман-Старынкевич, 1964).

Для амфиболов считается характерным с ростом температуры увеличение количества алюминия в четверной координации (Foslie, 1945; Sundius, 1946; Закруткин, 1961; А. а. С. Engel, 1962; Никитина, Хильтова, 1964, и др.), увеличение содержания титана и щелочей и уменьшение степени окисления железа.

По степени замены  $Si^{4+} \rightarrow Al^{3+}$  в тетраэдре, характеризующей степень метаморфизма, В. В. Закруткин (1961) выделил 4 группы амфиболов:

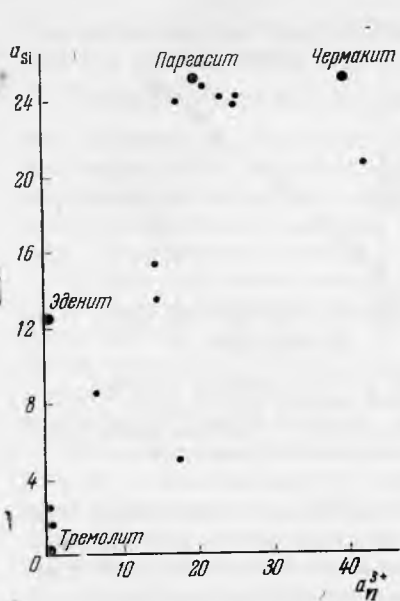


Рис. 6. Соотношение  $a_{Si}$  и  $a_{VI}^{3+}$  в амфиболах

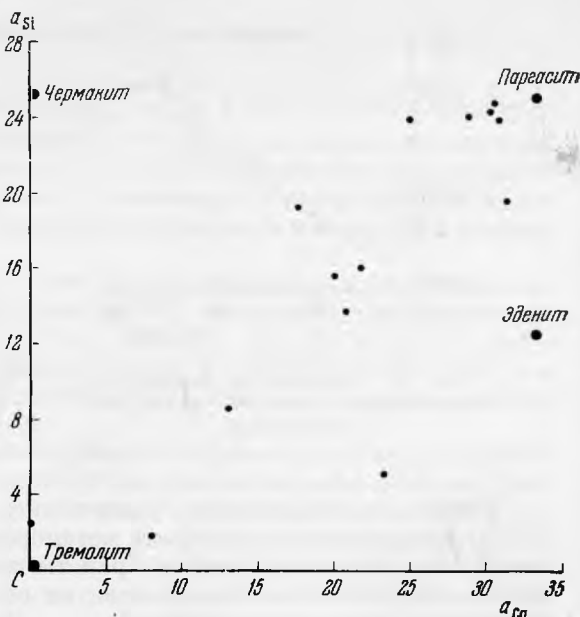


Рис. 7. Соотношение  $a_{Si}$  и  $a_{Ca}$  в амфиболах

от тремолит-актинолитовой ( $Al_{IV} = 0 - 0,8$ ), наиболее низкотемпературной серии, характерной для зеленосланцевой фации метаморфизма, до гастингситов ( $Al_{IV} = 1,6 - 2,2$ ), характеризующих гранулитовую фацию и интрузивные породы.

Из анализированных амфиболов Юго-Западного Памира наиболее высокие значения  $a_{Si}$ ,  $a_{Ca}$  ( $\frac{Na + K}{Na + K + Ca} \times$

$\times 100\%$ ),  $a_{VI}^{3+}$  (относительное количество Al, Ti,  $Fe^{3+}$  в шестерной координации), близкие к гастингситовым (рис. 6, 7) имеют амфиболы из ультраметаморфических образований центральных частей района. Для эпидотовых амфиболитов восточных и северных частей района и метасоматических карбонатных пород величина  $a_{Si}$  в амфиболах значительно меньше (1,6—2,3%), что приближает последние к тремолит-актинолитам.

В контактово-метаморфических и метасоматических породах в связи с гранитами верхнеюрско-нижнемелового возраста встречаются амфиболы автофиллит-жедритовой серии — куммингтониты. И. В. Гинзбург и Г. А. Осолодкина (1966) из пород на контакте пегматит — магнетитовый мрамор описали магнезиальный автофиллит, по составу очень близкий к теоретическому.

На диаграмму для определения железистости роговых обманок по по-

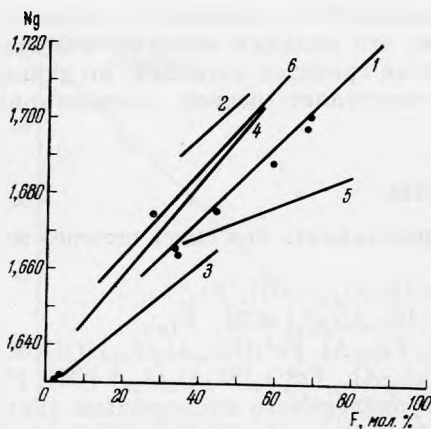


Рис. 8. Диаграмма для определения общей железистости роговых обманок по показателю преломления:

1 — зеленые роговые обманки из гранитов и амфиболитов; 2 — бурые роговые обманки из андезитов; 3 — ряд тремолит-актинолит; 4 — метасоматические сине-зеленые роговые обманки; 5 — сине-зеленые роговые обманки кристаллических сланцев и роговиков; 6 — роговые обманки из пород гранулитовой фации (1—3 — по В. С. Соболеву, 1950; 4 — по Л. И. Шабьину, 1958; 5 — по данным В. И. Лебединского и М. Е. Яковлевой из работы Л. И. Шабьина, 1958; 6 — по Б. Г. Лутцу, 1962)

казателю преломления (рис. 8) нанесены точки некоторых изученных амфиболов. Большинство точек амфиболов из гнейсов, мигматитов и амфиболитов ложится вблизи линии  $I$  для зеленых роговых обманок из гранитов и амфиболитов (по В. С. Соболеву). Амфиболы из метасоматических карбонатных пород и менее метаморфизованных пород окраинных частей Юго-Западного Памира попадают на линию тремолита — актинолита. Точка роговой обманки из гранатового амфиболита в мраморах располагается вблизи кривых  $b$  и  $4$ .

Наиболее высокой железистостью характеризуются роговые обманки из мигматитов и пегматитов. Степень окисления железа изменяется в пределах от 0 до 32,6% без определенной закономерности.

## ВЫВОДЫ

1. По показателю преломления  $N_g$  отчетливо различаются флогопиты метаморфических и метасоматических пород района.

2. Эмпирически определены зависимости показателя преломления  $N_g$  от общей железистости биотитов, гранатов и амфиболов метаморфических пород Юго-Западного Памира.

3. Содержание Са-компонента в гранате почти однозначно определяется по параметру  $a_0$  элементарной ячейки.

4. Железистость слюд, гранатов и амфиболов увеличивается при мигматизации.

5. Для амфиболов высокотемпературных зон метаморфизма и ультраметаморфизма характерны гастингситовые и феррогастингситовые составы с несущественной изоморфной примесью молекул других серий роговых обманок.

6. Степень замены  $Si^{4+}$  на  $Al^{3+}$  в биотитах изменяется незакономерно, в амфиболах — увеличивается и в мигматитах и пегматитах.

## ЛИТЕРАТУРА

- Борнеман-Старынкевич И. Д. Руководство по расчету формул минералов. Изд-во АН СССР, 1964.
- Винчелл А. Н., Г. Винчелл. Оптическая минералогия. ИЛ, 1953.
- Гинзбург И. В. Гастингсит зоны щелочно-гранитного метасоматоза и изоморфизм в моноклинных амфиболах. — Труды Минерал. Музея АН СССР, 1961, вып. 2.
- Гинзбург И. В., Осолодкина Г. А. О самом магнезиальном антофиллите. — Новые данные о минералах СССР, 1966, вып. 17.
- Гневущев М. А., Калинин А. И., Михеев В. И., Смирнов Г. И. Изменение ячейки гранатов в зависимости от состава. — Зап. Всес. минерал. об-ва, 1956, ч. 85, вып. 4.
- Давыдченко А. Г. Метаморфическая зональность и петрологическое взаимоотношение ваханской серии и рушанского комплекса (Юго-Западный Памир). — Докл. АН СССР, 1966, 168, № 6.
- Закруткин В. В. Амфиболы из пород амфиболитовой и гранулитовой фаций Анабарского щита. — Геол. и геофиз. 1961, № 9.
- Клунников С. И., Попов А. И. Метаморфические толщи Ю.-З. Памира. — Труды ТПЭ АН СССР, 1936, вып. 69.
- Коржинский Д. С. Термодинамические потенциалы открытых систем, кислотность и восстановительный потенциал которых определяется внешними условиями. — Докл. АН СССР, 1965, 152, № 3.
- Кориковский С. П. Биотиты из пород зелено-сланцевой и амфиболитовой фаций метаморфизма. — Докл. АН СССР, 1965, 160, № 1.
- Лутц Б. Г. Диаграмма для определения железистости роговых обманок в породах гранулитовой фации. — Зап. Всес. минерал. об-ва, 1962, ч. 91, вып. 3.
- Маракушев А. А. Проблема минеральных фаций метаморфических и метасоматических горных пород. Изд-во «Наука», 1965.
- Масленков В. А. Докембрийская кристаллическая толща Ю.-З. Памира. — Труды ЛАГЕД АН СССР, 1955, вып. 5.
- Никитина Л. П. Железистость железо-магнезиальных слюд метаморфических пород. — Зап. Всес. минерал. об-ва, 1963, ч. 92, вып. 1.
- Никитина Л. П., Хильтова В. Я. Особенности кристаллохимического строения железо-магнезиальных слюд и роговых обманок метаморфических пород.

- Сб. «Петрография метаморфических и изверженных пород Алданского щита». Изд-во «Наука», 1964.
- Н и к и т и н а Л. П. О содержании кремния в железо-магнезиальных слюдах метаморфических пород.— В кн. «Региональный метаморфизм докембрийских формаций СССР». Изд-во «Наука», 1965.
- Н и к о л а е в В. А., В е н д л а н д К. Н. Материалы к петрологии Памира.— Труды ТПЭ АН СССР, 1932.
- О с т р о в с к и й И. А., П е т р о в В. П. Материалы по связи оптики и химического состава магнезиально-железистых слюд.— Труды ИГН АН СССР, 1940, вып. 37.
- С о б о л е в В. С. Введение в минералогию силикатов.— Изд. Львовск. гос. ун-та, 1949.
- С о б о л е в В. С. Значение железистости фемических минералов и вспомогательные диаграммы для определения состава биотитов, роговых обманок и ромбических пироксенов.— Минерал. сб. Львовск. геол. об-ва, 1950, № 4.
- Ч е с н о к о в Б. В. Изменение состава гранатов при метаморфизме эклогитов Южного Урала.— Изв. АН СССР, серия геол., 1961, № 7.
- Ш а б ы н и н Л. И. Еще раз о значении железистости фемических минералов.— Минерал. сб. Львовск. геол. об-ва, 1958, № 12.
- D e e r W. A., H o w i e R. A., Z u s s m a n J. Rock Forming Minerals, 1963.
- E n g e l A. с. J. E n g e l C. G. Hornblendes formed during progressive metamorphism of amphibolites northwest Adirondack Mountains. N.-Y.— Bull. Geol. Soc. Am., 1962, 73, N 12.
- F o s l i e S. Hastingsites and amphiboles from the epidoteamphibolites facies.— Norsk. geol. tidsske, 1945, N 25.
- Н а у а м а Y. Some considerations on the colour of biotite and its relations to metamorphism.— J. Geol. Soc., Japan, 1959, 65, N 21.
- H a r r y W. T. Aluminium replacing silicon in some silicate lattice.— Min. Mag., 1950, 36.
- S n e l l i n g N. J. Notes on the petrology and mineralogy on the Barrovian metamorphic zones.— Geol. Mag., 1957, 44, N 4.
- S t u r t B. A. The composition of garnets from pelitic schists in relation to the grade of regional metamorphism.— J. Petrol., 1962, 3, N 2.
- S u n d i u s N. The classification of the hornblendes and the solid solution relations in the amphibole group.— Arsbok sveriges Geol. Undersök., 1946, 40, N 4.