

ХАРАКТЕРНЫЕ ВРОСТКИ КУММИНГТОНИТА В АНТОФИЛЛИТ-ЖЕДРИТЕ С КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Ромбические амфиболы ряда антофиллит-жедрит являются характерными минералами высокоглиноземистых кристаллических сланцев. Последние входят в состав червуртской свиты, которая вместе с другими свитами метаосадочных и метавулканогенных пород слагает нижнепротерозойскую грабен-синклиналь Колмозеро-Воронья. Породы синклинали в районе Вороньих Тундр метаморфизованы в условиях средних ступеней амфиболитовой фации регионального метаморфизма (Болотов, Белолипецкий, 1972; Глаголев, Боронихин, 1976).

Жедрит и антофиллит сравнительно широко распространены в высокоглиноземистых кристаллических сланцах и встречаются в амфиболитах Вороньих Тундр. По-видимому, это можно объяснить общей обедненностью пород калием, при достаточном количестве которого вместо жедрита образуется биотит (Маракушев, 1968).

В нескольких образцах высокоглиноземистых кристаллических сланцев были встречены крупные призмы ромбического амфибола, содержащие характерные тонкие вrostки куммингтонита (рис. 1). Интересно отметить, что в таких образцах почти в каждой из крупных призм ортоамфибола как раз посредине кристалла находится один тонкий вrostок куммингтонита. Для пород Вороньей Тундры это довольно редкое явление: из нескольких сот образцов такие вrostки встретились всего в трех.

Оптическим изучением установлено, что вrostки куммингтонита имеют четкую плоскопараллельную форму. Толщина вrostка не зависит от размера призмы жедрита и колеблется от сотых долей до 0,2 мм. Тонкие вrostки обычно монокристаллически, более широкие представлены полисинтетически сдвойникованным куммингтонитом (рис. 1). При одном никеле в шлифах куммингтонитовые полосы выделяются своей бесцветностью на фоне слабо плеохроирующего в голубовато-буровато-серых тонах ромбического амфибола.

Исследование вrostков на федоровском столике показало четкую взаимную ориентировку жедрита и куммингтонита (рис. 2 и 3). Вrostки расположены параллельно кристаллографической плоскости (100) жедрита; с этой же плоскостью совпадают двойниковые швы и плоскость (100) куммингтонита. Оси оптических индикатрисс N_g индивидов двойников моноклинного куммингтонита симметрично повернуты в обе стороны на $19,5^\circ$ от общей для обоих амфиболов кристаллографической оси c и совпадающего с ней направления N_g жедрита.

Тщательное оптическое наблюдение призм жедрита позволило обнаружить в нем признаки распада твердого раствора. В сечениях, перпендикулярных оси c , при больших увеличениях можно различить серии одинаково ориентированных полосок, чередующихся жедрита и антофиллита (рис. 4 и 5). Они различаются по показателю преломления (рельефу) и довольно слабо по двупреломлению (интерференционным окраскам). Частота смены полосок по замеру с помощью окуляр-микрометра — 0,005—0,007 мм. Важно отметить, что вrostки распада твердых растворов расположены параллельно оси c , но не совпадают ни с одним направ-

лением спайности. Они приблизительно перпендикулярны то одной, то другой из призматических спайностей. Расчет индексов плоскостей пластинок распада твердого раствора проведен Т. А. Яковлевской. Если принять индекс призматической спайности ортоамфибола за (210) (Дир и др., 1965), то пластинки распада совпадают с кристаллографическими плоскостями (120). Плоскость спайности (210) образует с кристаллографической плоскостью (120) угол в 92° . Если же, как это более принято, считать плоскость призматической спайности за (110), то в качестве кристаллографической плоскости, по которой образуются востки распада твердого раствора, должна считаться плоскость (140). Угол между спайностью и этой плоскостью равен $91^\circ 22'$. Замеренный на плоском столике микроскопа угол между спайностью и полосками востков составляет $91-92^\circ$ и, таким образом, подтверждает выбранные индексы этих плоскостей независимо от выбранной установки.

Иногда видно, что участки с одинаковым расположением пластинок распада по отношению к участкам с другим расположением (см. рис. 5) выявляют строение призм ортоамфибола, напоминающее двойниковое строение.

На признаки распада ортоамфиболового твердого раствора на жедрит и антофиллит указывали Робинсон и соавторы (Robinson e. a., 1969). Изученный ими ромбический амфибол представлял собой субмикроскопический сросток жедрита и антофиллита. Полоски распада были ориентированы в плоскости (010) этого ромбического амфибола.

В других разрезах (более близких к параллельным оси *c*) полоски распада совершенно не видны из-за следов спайности по призме, совпадающих по направлению, и связанных с ними дефектов шлифовки.

Ортоамфибол и востки куммингтонита, а также другие ассоциирующие с ними минералы, были исследованы с помощью микроанализатора «Сомеса» с электронным зондом MS-46. Рабочее напряжение 20 кВ, ток 50 нА. Диаметр зонда 3–10 мкм. На поверхность прозрачно-полированных шлифов и эталонов напылялась углеродная пленка толщиной 300–500 Å. При измерении по точкам использовалась двухканальная регист-

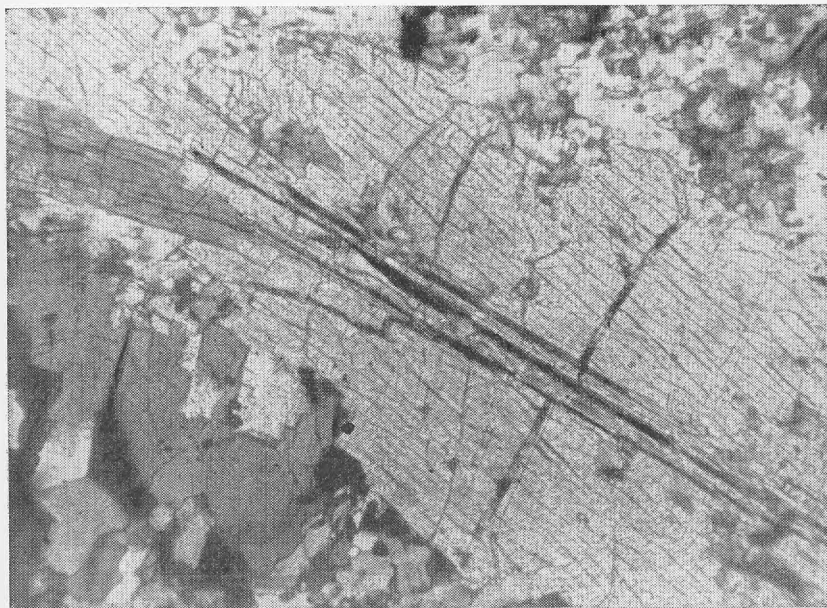


Рис. 1. Призма жедрит-антофиллита с востком сдвойникового куммингтонита в гранат-кордиерит-жедритовом кристаллическом сланце. Прозрачный шлиф, увел. 21. Никели скрещены

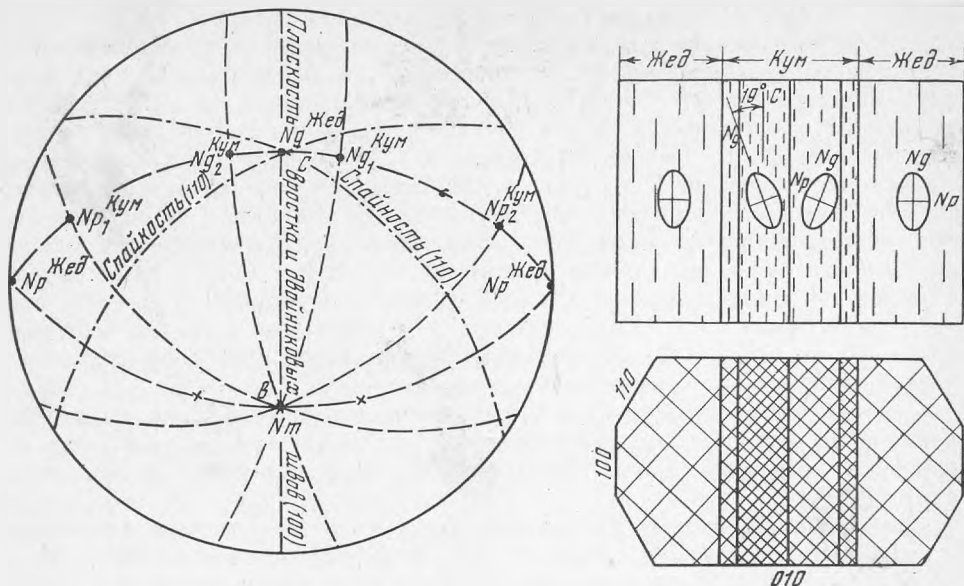


Рис. 2. Проекция плоскостей двойниковых швов, оптических индикатрисс и спайностей жедрит-антофиллита и вростков сдвойникового куммингтонита на сетку Вульфа

Рис. 3. Схема расположения вростка сдвойникового куммингтонита в жедрит-антофиллите

радия цифрорпечатающим устройством, при проведении профиля распределения элементов — одноканальная регистрация самописцем, а при получении растровых изображений — одноканальная регистрация на фотопленку с экрана осциллографа.

Эталонами для количественного анализа служили минералы с данными валового химического анализа ЦХЛ ИГЕМ АН СССР. Расчет поправок на разницу составов и эталонов производился по программе для БЭСМ-6 на языке АЛГОЛ (Тронева и др., 1972).

Точность определений составляет, в согласии с литературными данными для водных силикатов, 2—5% от суммы. В случае малых содержаний, небольших размеров исследуемых фаз, дефектов рельефа поверхности шлифа и т. д. точность падает на 10—20% и ниже.

Поскольку регистрация интенсивностей α -излучения Ca—Si, Fe—Al, Mn—Mg и K—Na проводилась попеременно с эталонами, а положение точки образца, в котором определялся состав, фиксировалось визуально с точностью 1—5 мкм (из-за люфта механизма перемещения образца), постольку результаты количественного анализа отягощены рассеянием, связанным с неоднородностью анализируемых фаз.

Результаты части анализов помещены в табл. 1. Взятые подряд шесть точек по разрезу через куммингтонитовый вросток (анализы 1 и 2) и далее через жедритовую призму (анализы 3—6) показали резкое различие содержаний глинозема в куммингтоните и ортоамфиболе вблизи границы вростка. Далее от вростка ромбический амфибол становится малоглиноземистым и фактически превращается в антофиллит. Остальные анализы ромбического амфибола, сделанные в других точках, как в призмах с вростками куммингтонита, так и без них, показали значения, промежуточные между жедритом и антофиллитом (рис. 6). На этой же диаграмме показаны анализы куммингтонита.

Была сделана попытка выяснить распределение глинозема и других компонентов в ромбическом амфиболе с помощью растровых изображений

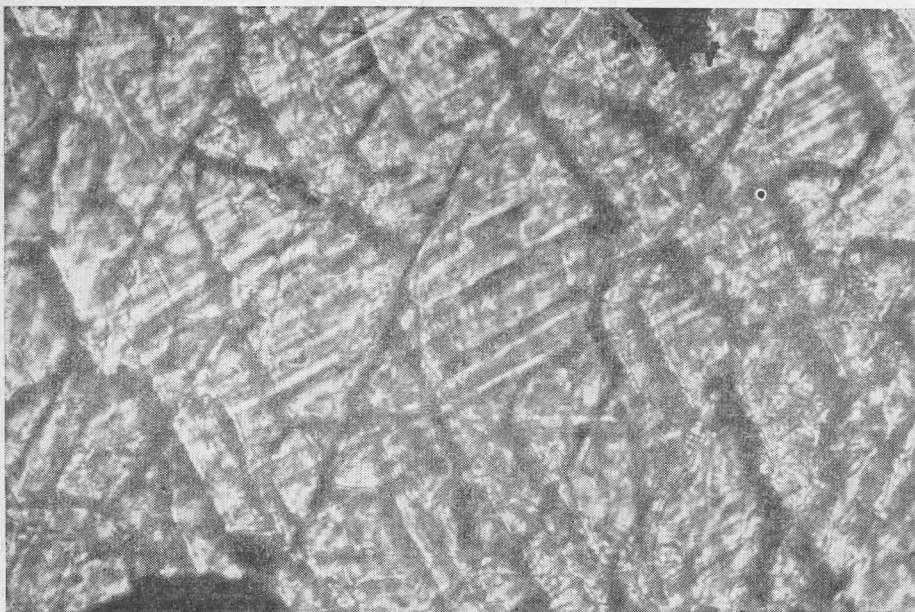


Рис. 4. Тонкие вростки распада твердого раствора антофиллит-жедрит

Направление вростков (светлое) приблизительно перпендикулярно одной из плоскостей спайности (темное). Разрез призмы жедрит-антофиллита — перпендикулярно оси *c*. Прозрачный шлиф, увел. 570. Без анализатора

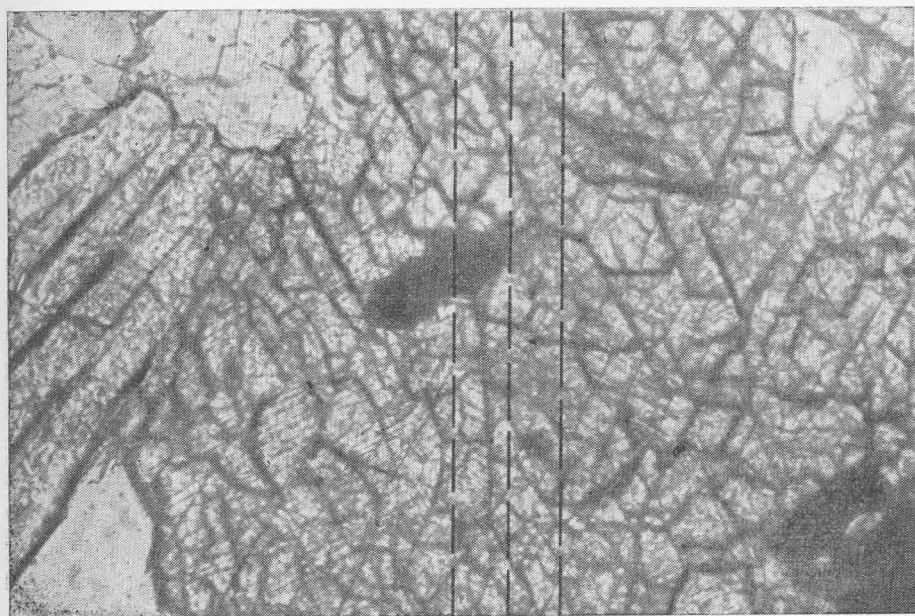


Рис. 5. Вростки распада твердого раствора антофиллит жедрит

Заштрихованы участки одинакового направления вростков. Прозрачный шлиф, увел. 220. Без анализатора

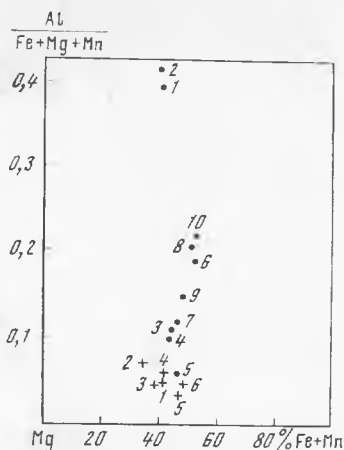
Таблица 1

Химический состав ромбических амфиболов и куммингтонитов по данным электронного микрозондирования

Компонент	1	2	3	4	5	6
	Кум-1	Кум-2	Жед-1	Жед-2	Жед-3	Жед-4
SiO ₂	57,40	55,00	49,37	50,44	51,46	52,51
TiO ₂	0,02	0,02	0,09	0,08	0,04	0,04
Al ₂ O ₃	1,82	2,77	12,62	12,47	3,57	4,19
FeO	20,37	18,84	18,82	17,49	23,84	21,63
MnO	0,20	0,19	0,20	0,18	0,22	0,21
MgO	16,77	19,55	15,26	17,71	16,06	15,92
CaO	0,30	0,32	0,35	0,34	0,33	0,33
Na ₂ O	0,15	0,14	0,80	0,89	0,11	0,15
K ₂ O	—	—	—	—	—	—
Сумма	97,03	96,83	97,51	96,60	95,62	94,98
Si	8,19	7,87	6,96	7,10	7,88	7,78
Ti	—	—	0,01	0,01	—	—
Al	—	0,13	1,03	0,89	0,12	0,22
Al	0,31	0,34	1,07	1,18	0,51	0,51
Fe	2,43	2,25	2,22	2,05	2,97	2,68
Mn	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Mg	3,57	4,16	3,20	3,08	3,57	3,51
Ca	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Na	0,04	0,04	0,22	0,25	0,04	0,04
K	—	—	—	—	—	—
100×(Fe+Mn) Fe+Mn+Mg	41	35	41	40	44	44

Рис. 6. Состав ортоамфиболов и куммингтонита. Соотношения даны в молекулярных количествах

Точки — антофиллит и жедрит, крестики — куммингтонит. Номера см. табл. 1



в рентгеновском K_{α} -излучении Ca, Al, Fe и Mg, полученных путем сканирования электронным зондом по вертикали и горизонтали участков этого минерала в прозрачно-полированном шлифе (рис. 7, 8). Очевидно, разрешающая способность сканирующего устройства недостаточна для демонстрации полосок распада твердого раствора из-за малой их ширины. Таким образом, так же как и точечные микроанализы, растровые изображения дают суммарный усредненный состав ромбического амфибола.

По приведенным фотографиям растровых изображений можно судить о степени химической гомогенности ортоамфибола. Участок 1 (рис. 7) расположен в призме жедрит-антофиллита с включениями плагиоклаза (светлое CaK_{α} - и AlK_{α} -излучения и черное в FeK_{α} - и MgK_{α} -излучении) и тонким вростком куммингтонита, плоскость которого лежит косо к поверхности шлифа. Вросток (из-за косоного положения слабо и расплывчато) выражен на снимке *в*, как наиболее темная полоса, идущая диагонально в темно-сером поле малоглиноземистого ортоамфибола — антофиллита. В отношении других компонентов (*б*, *г*, *д*) эта полоса никак не проявлена.

На снимках участка 2 (рис. 8) видно поле жедрит-антофиллита с относительно широким вростком куммингтонита, трещиной (левее и выше этого вростка) и неправильными включениями плагиоклаза в ортоамфиболе и куммингтоните. Полоска куммингтонита выделяется на снимке в AlK_{α} -излучении (*в*) более темным, чем жедрит, цветом и совершенно не выделяется на изображениях в Ca -, Mg -, FeK_{α} -излучениях (*б*, *г*, *д*).

Неравномерность содержания Al_2O_3 в ромбическом амфиболе хорошо видна на рис. 8, *в*, где половина поля (правее и ниже полоски куммингтонита) занята жедрит-антофиллитом с включениями плагиоклаза. На сером фоне жедрита резко выделяются белые пятна плагиоклаза и черные полоски дефектов полировки шлифа (они, как и трещины, черные на всех снимках). Однако серое поле ортоамфибола также имеет более светлые и более темные (сравнимые с куммингтонитом) участки разного содержания глинозема. В общем, (в пределах этого снимка) вблизи куммингтонита ромбический амфибол более богат глиноземом (на снимках более светлый) и представлен жедритом, а дальше от вростка обедняется глиноземом и превращается в антофиллит (более темный). И в той и в другой части имеются пятна, отличающиеся по составу. Распределение Ca, Mg и Fe более равномерное по всему полю призмы ортоамфибола и в куммингтоните.

Можно лишь предположить, как ведут себя пластинки распада твердого раствора жедрит-антофиллит в участках ортоамфибола с различным суммарным составом. Вероятно, максимальное количество пласти-

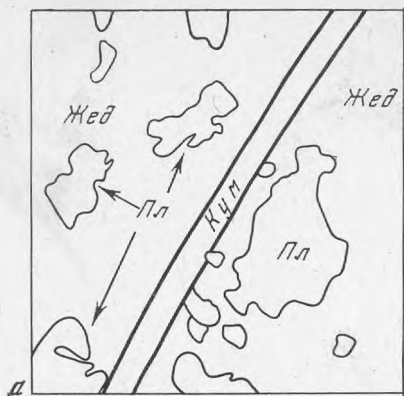
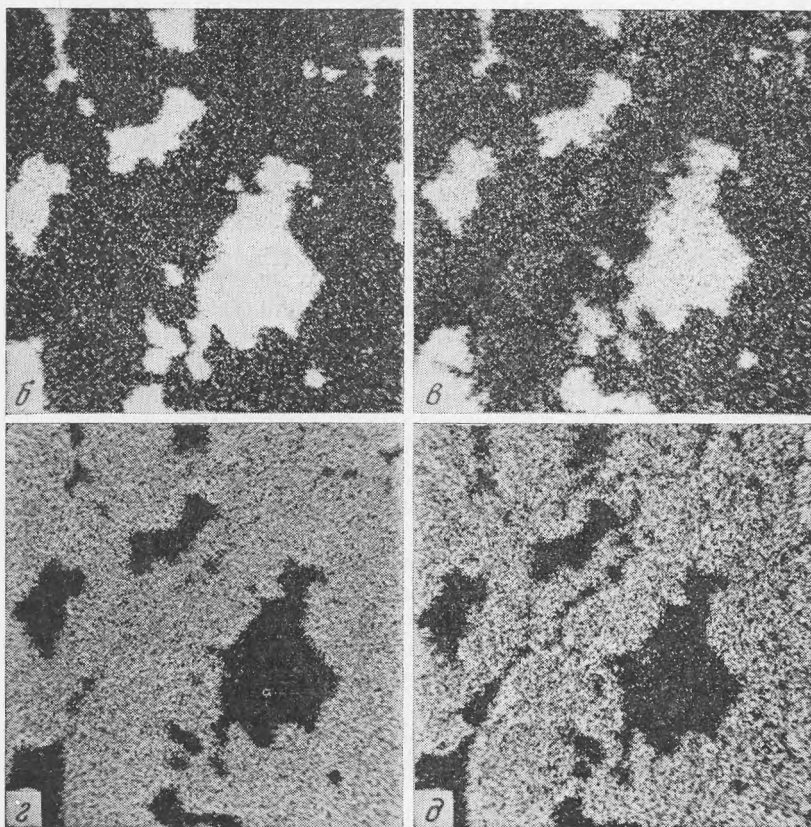


Рис. 7. Растровые изображения участка 1 в рентгеновском K_{α} -излучении

- а — схема расположения минералов;
 б — K_{α} -Са-,
 в — K_{α} -Al-,
 г — K_{α} -Fe-,
 д — K_{α} -Mg-излучение. Размер участка 300×300 мкм



нок распада присутствует в глиноземистых жедритах и минимальное — в малоглиноземистых.

Вростки куммингтонита в жедрите (так же как и параллельные сростания других амфиболов) из разных местностей неоднократно отмечались в литературе. Эскола (Eskola, 1914) для магнезиально-глиноземистых пород района Ориярви (Финляндия) детально описал такие сростания. Однако, в отличие от очень тонких вростков Вороньих Тундр, он отмечает, что количественные соотношения между ромбическим амфиболом и куммингтонитом различны. Иногда куммингтонит окаймляется только узкими бордюрами антофиллита.

С появлением электронных микроанализаторов петрографы получили возможность сравнивать составы ромбического амфибола и куммингтони-

Таблица 2

Химический состав антофиллита (*Ант*) и куммингтонита (*Кум*) из пластинчатых сростков в породах района Хирвас Северная Финляндия (Härme, Perttunen, 1971)

Компонент	1-я призма		2-я призма	
	<i>Кум</i>	<i>Ант</i>	<i>Кум</i>	<i>Ант</i>
SiO ₂	52,4	52,2	—	—
TiO ₂	0,15	0,13	—	—
Al ₂ O ₃	2,40	2,20	2,71	2,75
FeO	19,0	18,5	15,9	15,1
MnO	0,16	0,16	—	—
MgO	20,1	20,2	18,6	18,7
CaO	0,77	0,26	0,36	0,31
Σ	94,98	93,65		

га в сростках. М. Хэрме и В. Пертунен (Härme, Perttunen, 1971) проанализировали составы антофиллита и куммингтонита из сростков в кордиерит-антофиллит-плагноклазовых породах Хирваса, Северная Финляндия. Анализы (см. табл. 2) показали практически одинаковые составы антофиллита и куммингтонита. В одном случае содержание Al₂O₃ в куммингтоните оказалось даже выше, чем в антофиллите.

Аналогичные прорастания двух амфиболов отмечает Стаут (Stout, 1972) в гранат-кордиерит-жедритовых породах Телемарка (Норвегия) в качестве типичной ассоциации жедрита и антофиллита с куммингтонитом. Стаут отмечает, что с вростками куммингтонита бывает как антофиллит, так и жедрит с содержанием 10,5—12,6 вес. % Al₂O₃. Р. К. Лал и Р. С. Шукла (Lal, Shukla, 1975) для жедрит-кордиерит-гранатовых пород района Кхетри (Раджастан, Индия) указывают на очень похожие прорастания жедрита и куммингтонита.

Рассматривая причины появления гомоосевых сростков куммингтонита и ромбического амфибола, большинство авторов склоняется к тому, что куммингтонит в сростках является реликтом, сохранившимся при образовании жедрит-антофиллита. Хотя Р. К. Лал и Р. С. Шукла не исключают возможности образования этих вростков в результате распада твердого раствора высокотемпературного ромбического амфибола на «бедный Al и Na и богатый Ca куммингтонит и богатый Na и Al и бедный Ca жедрит» при понижении температуры, они считают более вероятным, что куммингтонит является неравновесным реликтом в жедрите и всюду отделен от кордиерита каймой жедрита.

Возвращаясь к амфиболам Вороньих Тундр, следует сказать, что жедрит с вростками куммингтонита ассоциирует со следующими минералами: кордиерит (железистость, *f*, 25—26), гранат (82—85), биотит (36—42), хлорит (30—38%), плагноклаз (78—93) и ильменит. В другом шлифе этого же образца присутствует кварц, но нет хлорита. Наличие хлорита, как отмечается многими авторами, в этой ассоциации связано с недостатком кремнезема в породе.

Характер минеральной ассоциации показывает, что в присутствии жедрита куммингтонит не может быть равновесен с кордиеритом. Применяя минералогическое правило фаз к этой ассоциации, можно убедиться, что там присутствует лишняя фаза. Если взять ассоциацию с кварцем (без хлорита), то число независимых компонентов будет 7 (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃,

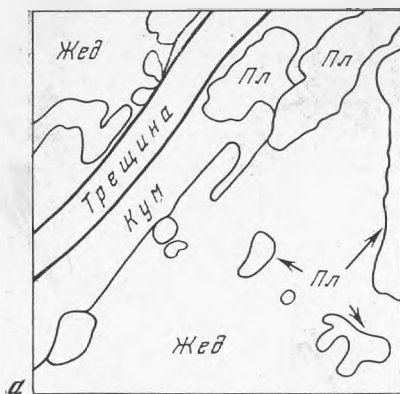
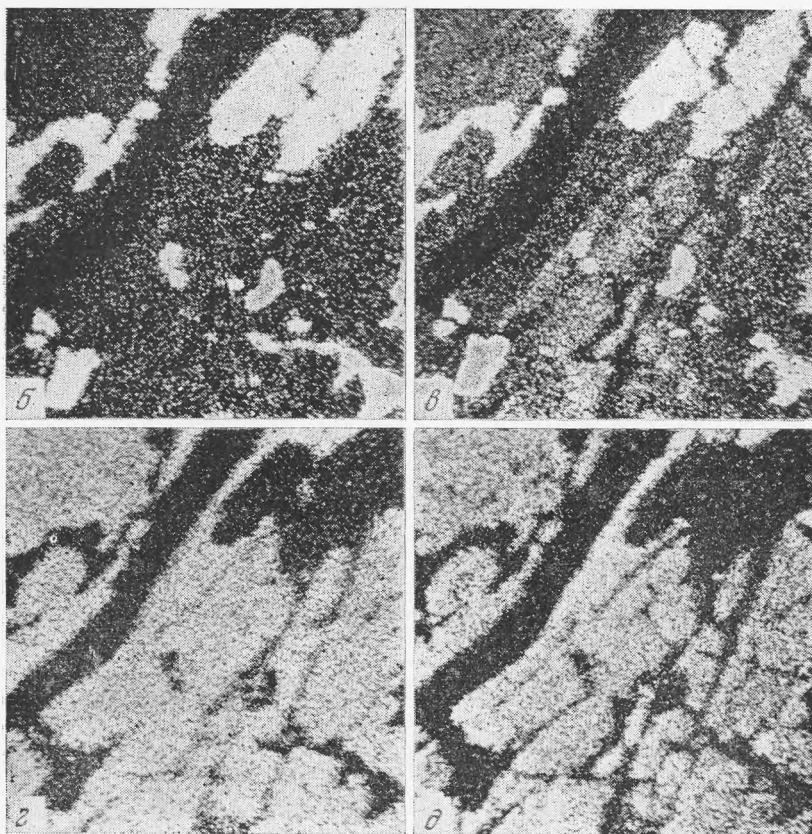


Рис. 8. Растровые изображения участка 2. Размер участка 300×300 мкм

Условные обозначения см. рис. 7



FeO, MgO, CaO, и K₂O). Na₂O, MnO и Fe₂O₃ можно рассматривать как компоненты-примеси, а H₂O — как вполне подвижный компонент. Семи независимым компонентам соответствуют 7 присутствующих минералов: кварц, ильменит, кордиерит, гранат, жедрит, плагиоклаз и биотит. Куммингтонит здесь — дополнительная, неравновесная фаза. То же число минералов и в хлорит-содержащей ассоциации, только вместо кварца — хлорит.

Можно предположить что куммингтонит остался от прежней минеральной ассоциации, устойчивой при более низкой температуре: куммингтонит + кордиерит + гранат + кварц + плагиоклаз + биотит + ильменит. Жедрит развивался в основном по куммингтониту, образуя гомоосевые псевдоморфозы, но отчасти — по кордиериту и другим минералам. Некоторым косвенным подтверждением таких соотношений является то, что

куммингтонит в качестве включений находится в жедрите не только в описанных закономерных вростках, но и иногда в виде мелких неориентированных призм, которые не могут быть ничем кроме реликтов ранее существовавшей ассоциации.

Наконец, характерное распределение вростков распада твердых растворов жедрит-антофиллит одного направления в призме ортоамфибола, упоминавшееся выше и напоминающее двойниковое строение (рис. 5), также говорит о развитии антофиллит-жедрита по куммингтониту, так как рисунок распределения вростков распада соответствует полисинтетическим двойникам куммингтонита, развившимся по плоскости (100). Механизм частичного унаследования структуры моноклинного сдвойникового куммингтонита образовавшимся по нему ромбическим амфиболом совершенно неясен.

Общий прогрессивный характер метаморфизма с замещением низкотемпературных ассоциаций более высокотемпературными устанавливается также по характерной зональности присутствующего в ассоциации граната. Как видно из схематического профиля на рис. 9, центральные части зерен граната обогащены MnO (более 3%) по сравнению с периферийными частями зерен (менее 1%).

Неравномерное распределение Al_2O_3 в ортоамфиболе, в общем, также говорит о не вполне достигнутом равновесии. Крупные призматические кристаллы жедрита образовывались по куммингтониту, кордиериту и другим минералам и в связи с устойчивостью в данных условиях ромбических амфиболов широкого диапазона составов в какой-то мере наследовали состав минералов, на месте которых они образовывались. Наиболее глиноземистый жедрит образовался по кордиериту, а антофиллит — по куммингтониту. Судя по снимкам растровых изображений (рис. 7, 8), составы жедрит-антофиллитов выравнивались в отношении разных элементов с разной скоростью. Например, MgO и FeO в жедрите, судя по растровым изображениям и постоянному соотношению этих компонентов в точечных анализах (рис. 6), выравнивались быстрее, чем глинозем. Однако в представленных анализах самые глиноземистые ортоамфиболы — одновременно и самые магнезиальные, хотя колебания железистости в них невелики. Медленность процесса выравнивания состава ромбического амфибола (гомогенизация) объясняется тем, что для этого необходима диффузия элементов через кристаллическую решетку.

Редкость нахождения вростков куммингтонита в жедрите в породах Вороньей Тундры, а также обычно малая толщина вростков, свидетельствуют о том, что породы этого района в основном — равновесные ассоциации в условиях данной ступени амфиболитовой фации регионального прогрессивного метаморфизма.

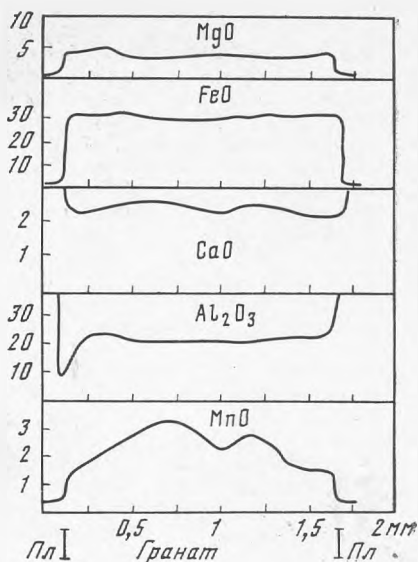


Рис. 9. Схема распределения некоторых элементов по профилю через зерно граната в K_{α} -рентгеновском излучении