

А. И. ГИНЗБУРГ

СПОДУМЕН И ПРОЦЕССЫ ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ

Общеизвестно, что сподумен является основным промышленным сырьем для извлечения лития, а также важным керамическим материалом, широкое применение которого открывает новые перспективы в современной электрокерамической промышленности.

В связи с этим нам казалось необходимым вновь вернуться к вопросам, затронутым нами ранее в работах 1944 и 1950 гг., тем более, что в последние годы собран большой новый фактический материал, который нуждается в обобщении.

Как известно, сподумен встречается только в гранитных пегматитах натро-литиевого типа, по классификации А. Е. Ферсмана, детальная минералого-геохимическая характеристика которых была дана нами ранее (Гинзбург, 1955). Он является основным рудным компонентом этих пегматитов и часто сопровождается другими литиевыми минералами, в частности, петалитом, амблигонитом, трифилином-литнофилитом, лепидолитом, а также натро-литиевым бериллом.

По составу все сподуменовые месторождения можно грубо разделить на два типа.

I. Собственно сподуменовые, в которых главным рудным минералом является сподумен, замещающийся в ряде месторождений петалитом. Такие пегматиты всегда бывают в той или иной степени альбитизированы, грейзенизированы и содержат обычно в виде попутных компонентов берилл, колумбит-танталит, касситерит, рубидийсодержащие слюдки типа мусковита-жилбертита и рубидийсодержащие микроклины.

II. Сподумено-лепидолитовые, характеризующиеся широким развитием, наряду с альбитизацией, лепидолитового замещающего комплекса, с которым связана целая гамма различных минералов. Попутными компонентами в этом случае являются: цезиево-литиевый берилл (воробьевит), поллуцит, колумбит-танталит, микролит и другие танталовые минералы, касситерит, лепидолит, амблигонит, богатые Rb мусковиты и микроклины, а также при наличии миароловых пустот, драгоценные камни (рубеллиты, полихромные турмалины, кунциты, воробьевиты).

Первый тип сподуменовых месторождений минералогически обычно весьма однообразен и содержит помимо микроклина, сподумена, кварца, альбита и мусковита из первичных минералов иногда петалит, трифилин, редко монтебразит, а также апатит, спессартин, касситерит, колумбит или колумбит-танталит, берилл, пирит, арсенипирит, сфалерит, цирколит и некоторые другие минералы.

Сподумено-лепидолитовые пегматиты минералогически значительно богаче. Геохимически они отличаются от предыдущего типа значительно большей ролью летучих, в первую очередь F и B, а также высокой концентрацией Cs и Rb (Гинзбург, 1955).

Размер кристаллов сподумена сильно колеблется часто в пределах даже одного месторождения. Известно, например, что самый крупный кристалл сподумена, когда-либо найденный в мире, был описан еще в 1916 г. Шаллером (Schaller, 1916) из пегматитов хребта Блэк Хиллс в Южной Дакоте (США) и достигал длины 15 м. Гигантские кристаллы сподумена встречаются также в пегматитах восточной части Манитобы (Канада), месторождения Кингс Маунтайн в Северной Каролине (США) и многих других районах.

В Советском Союзе самый крупный кристалл из Средней Азии достигал длины 8 м. Кристаллы же длиной в 1,5—2 м являются обычными во многих месторождениях. Как правило, подобные, гигантские по размеру кристаллы сподумена встречаются обычно в пегматитовых телах округлой формы—трубчатых, штокообразных и линзообразных. В то же время минимальные по величине кристаллы сподумена достигают часто десятых и даже сотых долей миллиметра.

В связи с тем, что размер кристаллов сподумена меняется от долей миллиметра до многих метров, возникает необходимость в разделении сподуменовых руд на несколько типов. Так, можно выделить следующие типы руд:

Микрокристаллический (размер кристаллов от долей миллиметра до 3—5 мм), при котором выделения сподумена хорошо видны только под микроскопом или под лупой. Такие кристаллы наблюдаются часто в мелкозернистом аплитоподобном агрегате минералов (кварца, альбита, микроклина), пронизывающим на некоторых месторождениях крупнокристаллический сподуменовый пегматит. Этот тип самостоятельного промышленного значения не имеет. Благодаря наличию микроскопических выделений сподумена данные опробования таких пегматитов всегда показывают повышенное содержание Li_2O , которое практически при обогащении руд почти не извлекается.

Мелко- и среднекристаллический тип (длина кристаллов от 0,5—1 см до 10—20 см). Для извлечения сподумена из этого типа руд необходимо применение обогащения — флотации, разделение в тяжелых суспензиях или обжига.

Крупнокристаллический тип (длина кристаллов от 20 до 50 см).

Гигантокристаллический тип (длина кристаллов свыше 50 см). Из руд этого типа, а также и предыдущего, сподумен может быть добыт ручной рудоразборкой.

В пределах одних и тех же месторождений наблюдаются иногда все указанные выше типы руд, но часто резко превалирует один из них. В плитообразных пегматитовых телах, сформировавшихся в сложных тектонических условиях, обычно превалирует среднекристаллический тип с переходами к крупнокристаллическому, в линзообразных и штокоподобных телах — крупнокристаллический и гигантокристаллический.

Распределение кристаллов сподумена в различных морфологических типах месторождений различное. В плитообразных телах, приуроченных к линейно вытянутым тектоническим зонам, кристаллы сподумена в целом распределены весьма равномерно и составляют в среднем около 20—25% всей массы рудных тел. Данные опробования ряда подобных месторождений показывают почти полное

отсутствие так называемых «ураганных» проб, столь характерных для месторождений других редких элементов. Наблюдающееся в отдельных участках рудных тел обеднение содержания Li_2O в пробах объясняется чаще всего не отсутствием сподумена или неравномерным его распределением, а развитием различных процессов изменения сподумена, ведущих к выносу из него лития.

Наиболее характерной особенностью этого типа месторождений является ориентированное расположение удлиненных кристаллов сподумена. Последние вытянуты в одном направлении и располагаются чаще всего, примерно, параллельно друг другу, под углом $60-90^\circ$ к линии контакта, вследствие чего сподуменный пегматит приобретает характерную флюидальную структуру (рис. 1). Чаще всего в пределах таких месторождений наблюдается закономерное увеличение размеров кристаллов сподумена по направлению от зальбандов к центру жил. Вследствие этого в строении пегматитовых тел выделяется осевая зона крупных кристаллов, из которой сподумен легко может быть добыт ручной рудоразборкой, и призальбандовые зоны мелких кристаллов сподумена, для извлечения которых необходимо применение обогащения (рис. 2).

В сподуменных месторождениях, представленных телами неправильной формы с раздувами, линзообразными жилами, трубами или штоками, сподумен распределен не столь равномерно и концентрируется обычно в местах раздувов или же в осевых частях тел. В этих участках, сложенных в основном кварцем, появляются крупные кристаллы, располагающиеся обычно без видимой закономерности. Иногда они расходятся радиально, образуя гигантские «солища», в других случаях образуют спутанные агрегаты кристаллов, своего рода сподуменные «кусты».

Содержание сподумена в пегматитах. Кристаллы сподумена в большинстве случаев располагаются непосредственно в кварце, образуя своеобразную кварц-сподуменную зону, среди которой во многих случаях появляются и отдельные блоки микроклина. Весьма интересно, что количество сподумена в пределах этой кварц-сподуменовой зоны для большинства месторождений примерно одинаково и колеблется от 15 до 28%, в среднем около 20—25%. Так, среднее содержание сподумена по месторождению Лалин, Испания — 21,6% (Parga-Pondal, 1948), среднее содержание сподумена по месторождению Ла Корн, Сев. Квебек (Канада) — 25% (Dery, 1950), а по пегматитам Сев. Каролины — 15—20% (Hess, 1940). Примерно подобные же данные (18—25%) получают и для остальных месторождений мира.

Габитус кристаллов сподумена сильно вытянутый, призматический; кристаллы лейстовидные, длина их примерно в

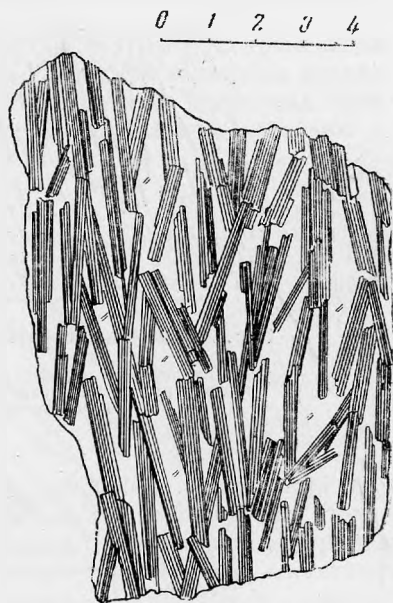


Рис. 1. Кварц-сподуменный пегматит. Кристаллы сподумена вытянуты в одном направлении, придавая пегматиту флюидальную структуру

8—12 раз больше ширины и в 15—20 раз больше толщины. Кристаллы более поздних генераций часто короткостолчатые, слабо вытянутые, реже изометричные. Сильно удлиненные лейстовидные выделения сподумена иногда слегка сужаются к одному концу, от которого начинался

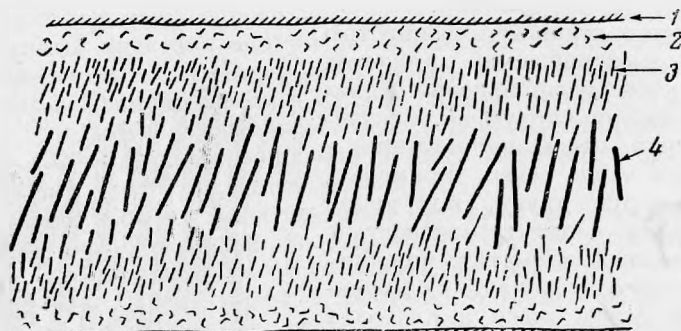


Рис. 2. Типичное строение плитообразных сподуменовых жил.

1 — вмещающие породы; 2 — призальбадовая зона мелкозернистого пегматита; 3 — зона развития мелких кристаллов сподумена; 4 — зона развития крупных кристаллов сподумена

рост кристаллов. Подобные лейсты сподумена только в исключительно редких случаях бывают хорошо образованы. Линии их соприкосновения с кварцем извилистые, кварц часто вдаётся отдельными «заливами» в кристаллы сподумена, пронизывает и интенсивно корродирует их. Хорошо образованные кристаллы сподумена являются большой редкостью.

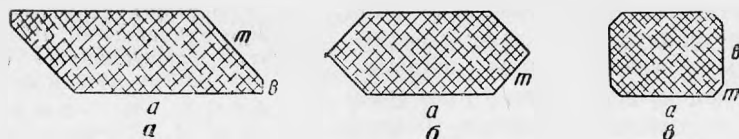


Рис. 3. Типичное поперечное сечение кристаллов сподумена.

В зависимости от характера развития граней пинакоида a (100), $в$ (010) и граней призмы $т$ (110), выделяются несколько наиболее характерных типов кристаллов (рис. 3).

а — Плоские пластинчатые кристаллы с наиболее развитой гранью пинакоида a (100) и со второстепенным развитием одной из граней призмы $т$ (110) или $в$ (120) и граней пинакоида $в$ (010);

б — призматические кристаллы, представленные комбинациями хорошо развитой призмы $т$ (110) и пинакоида a (100) или $в$ (010);

в — прямоугольные кристаллы, состоящие в основном из комбинации двух хорошо развитых пинакоидов: a (100) и $в$ (010); грани призмы в этом типе проявились незначительно и кристаллы в поперечном сечении имеют обычно прямоугольную форму.

На гранях пинакоида и призм обычно наблюдается отчетливая вертикальная штриховка.

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПОДУМЕНА

Цвет сподумена серый, зеленовато-серый, желтовато-серый, желтовато-зеленоватый в сподумено-лепидолитовых пегматитах обычно розоватый, бледно-фиолетово-розовый, очень редко в этих же телах встречаются и голубые сподумены. Были встречены совершенно бесцветные, прозрачные кристаллы.

Драгоценные разновидности сподумена в СССР до настоящего времени не обнаружены. Изумрудно-зеленые прозрачные гиддениты известны только на месторождении Александер Каунти в штате Северная Каролина. Они появляются в тех случаях, когда сподуменные пегматиты залегают в

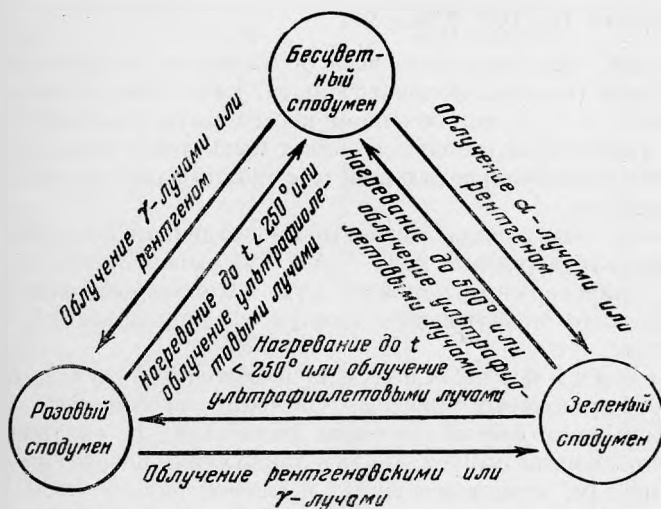


Рис. 4. Схема изменения окраски сподумена.

ультраосновных породах, богатых хромом. Розовые прозрачные драгоценные разновидности — кунциты встречаются только в миароловых пустотах сподумено-лепидолитовых пегматитов и являются большой редкостью. Несмотря на широкий размах разведочных и эксплуатационных работ, новые месторождения драгоценных кунцитов, помимо Мадагаскара и Калифорнии (Пала), за последние годы во всем мире не обнаружены.

Окраска сподумена изменяется при нагревании или облучении кристаллов рентгеновскими, катодными или ультрафиолетовыми лучами. Розовые кунциты под воздействием рентгеновских лучей или γ -излучения становятся зелеными, при нагревании или облучении их ультрафиолетовыми лучами — обесцвечиваются. Аналогичные же явления наблюдаются и на солнечном свете: ярко-розовые в забое сподумены при извлечении их на дневную поверхность очень быстро выцветают. Е. В. Клаффи (Claffy, 1953) приводит следующую схему изменения окраски сподумена при нагревании его или облучении разными лучами, воспроизведенную на рис. 4.

Причина изменения окраски сподумена заключается в том, что при нагревании и под воздействием различных лучей происходят окислительно-восстановительные реакции, меняющие степень окисления главнейших хромофоров, обуславливающих окраску сподумена — Mn и Fe.

Удельный вес сподумена меняется в пределах от 3,10 до 3,20, но у измененных в условиях гипергенеза разновидностей он резко снижается и доходит до 2,8, и даже меньше. Поэтому по удельному весу сподумена можно судить, в какой степени он изменен и превращен в глинистые минералы, а следовательно, какое количество Li_2O он содержит.

Поскольку измененные в условиях гипергенеза сподуменовые руды представляют собой по существу реликты кристаллов сподумена, находящиеся среди глинистого агрегата (галлуазита, каолинита, монтмориллонита), то, тонко растирая определенную навеску (Р) измененной разновидности, можно выделить из нее в тяжелых жидкостях реликты сохранившегося сподумена и, взвесив их (р), определить коэффициент выветрелости сподумена, равный $K=100 \frac{P}{p} \%$.

В связи с тем, что удельные веса большинства сопутствующих сподумену минералов (кварца, полевого шпата, мусковита, петалита, берилла и др.) меньше 3,0 (за исключением касситерита, колумбит-танталита, амблигонита, трифилина), сподумен может быть легко выделен по удельному весу в тяжелых жидкостях вместе с некоторыми другими более тяжелыми минералами.

По удельному весу весьма легко можно отделять сподумен от похожего на него петалита (уд. вес 2,40—2,45), что бывает необходимо сделать при подсчете запасов сподуменовых руд, содержащих петалит, когда химические анализы показывают суммарное содержание Li_2O в сподумене и петалите.

Люминесценция. Сподумен в катодных лучах интенсивно люминесцирует оранжевым цветом. Свечение необычайно сильное и характерное для всех без исключения разновидностей. В ультрафиолетовом свете сподумен люминесцирует значительно хуже розоватым или розовато-желтым цветом, при этом в лучах с длиной волны 3600 Å свечение средней или слабой интенсивности, а в более коротковолновой части спектра (3200 Å и 2800 Å) — еще слабее. Люминесцентный метод может с успехом применяться при минералогическом анализе руд и концентратов для количественного определения содержания сподумена в пробах, концентратах, промежуточных продуктах и хвостах обогатительных фабрик.

Поведение сподумена при нагревании. При непродолжительном нагревании сподумен сразу становится мутным, белым, непрозрачным и хрупким. Он теряет свой блеск, прозрачность и приобретает мелоподобный вид. При последующем нагревании до красного каления ($t=800-900^\circ$) сподумен приобретает кремевый цвет (окисление железа), растрескивается и в дальнейшем сильно увеличивается в объеме. Это увеличение объема связано с расщеплением его на отдельные пластинки, которые изгибаются во все стороны, образуя пушистый агрегат. При дальнейшем нагревании происходит декрипитация: отдельные пластинки отделяются от этого агрегата и рассыпаются в порошок. На этом явлении декрипитации сподумена при нагревании основан один из главных методов обогащения сподуменовых руд.

Общеизвестно, что при нагревании до $900-1000^\circ$ сподумен переходит в другую стабильную модификацию, названную β -сподуменом. На кривых нагревания сподумена фиксируется резко выраженная эндотермическая остановка, начинающаяся при $940-1000^\circ$ (в различных образцах) с максимумом при $1010-1100^\circ$. Эта реакция сопровождается настолько большим увеличением объема, что тигли, в которых происходит нагревание, разрываются.

Таблица 1

Межилоскостные расстояния сподумена

α-сподумен		β-сподумен (прокаленный при 1100°)	
I	d _α	I	d _β
—	—	Слабая	5,56
Средняя	4,08	»	4,11
—	—	Сильная	3,68
Слабая	3,36	Оч. сильная	3,31
»	3,24	—	—
»	3,07	Средняя	3,03
»	2,98	—	—
Сильная	2,82	—	—
»	2,70	Оч. оч. слабая	2,71
Слабая	2,61	—	—
Средняя	2,38	—	—
»	2,28	Слабая	2,21
Слабая	2,09	—	—
»	2,05	Слабая	2,04
Средняя	2,01	»	2,00
»	1,886	Средняя	1,876
»	1,830	Сильная	1,828
—	—	Слабая	1,760
Средняя	1,702	—	—
—	—	Слабая	1,643
Слабая	1,614	—	—
»	1,605	Сильная	1,598
Средняя	1,580	Оч. слабая	1,569
Сильная	1,538	—	—
Слабая	1,498	Средняя	1,503
Средняя	1,432	Оч. слабая	1,445
—	—	Слабая	1,421
—	—	Средняя	1,398
Слабая	1,376	»	1,371
Оч. слабая	1,342	Слабая	1,353
Слабая	1,312	»	1,324
»	1,305	Средняя	1,299
Оч. слабая	1,277	—	—
Слабая	1,239	Слабая	1,249
Средняя	1,205	Сильная	1,219
—	—	Слабая	1,174
Средняя	1,161	»	1,130
Оч. слабая	1,085	Оч. слабая	1,090
»	—	Слабая	1,076
Средняя	1,041	»	1,032
»	1,026	—	—
»	1,011	—	—

Сущность изменения устойчивого при нормальной температуре α -сподумена при нагревании и переходе его в β -сподумен состоит в изменении координационного числа Al. Если в α -сподумене $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ координационное число Al равно 6, то в β -сподумене Al находится в четверной координации и формула его — $\text{Li}[\text{AlSi}_2\text{O}_6]$, т. е. он должен быть уже отнесен к каркасным силикатам.

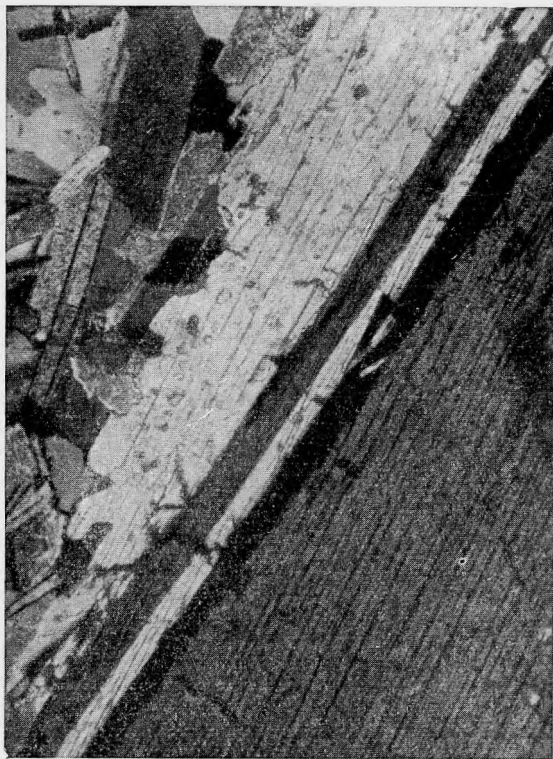


Рис. 5. Полисинтетические двойники сподумена.
× 20, ник.+

Таким образом, при нагревании сподумена резко меняется структура самого минерала, что наглядно видно на приводимых порошкограммах, снятых С. И. Берхин в лаборатории ИГН АН СССР (табл. 1).

Одновременно с изменением структуры меняются и все физические свойства минерала, в частности, оптические свойства; показатели преломления резко падают и становятся, как у всех каркасных силикатов, очень низкими ($N=1,52$).

О п т и ч е с к и е с в о й с т в а. Сподумен под микроскопом бесцветный, в толстых шлифах иногда появляется едва заметный плеохроизм от бесцветного по Ng до слегка зеленоватого по Nr и Nm. По данным А. Н. Винчелла, у типичного кунцита появляется по Nr и Nm плеохроизм в розовых и аметистово-пурпурных тонах, нами он не наблюдался. Оптические свойства сподумена из различных месторождений изменяются в незначительных пределах. Так, Nr меняется от 1,655 до 1,661, Nm ~ 1,669,

в Ng от 1,670 до 1,679. $N_g - N_p = 0,015 - 0,026$, оптически положительный, $2V = 58 - 66^\circ$, $cNg = 24^\circ - 26^\circ$.

В шлифах часто наблюдаются полисинтетические двойники (рис. 5).

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Химические анализы сподумена из месторождений СССР представлены в табл. 2, где показан также и теоретический состав, отвечающий формуле $LiAl(Si_2O_6)$.

Таблица 2

Химический состав сподумена

Компоненты	Теорет. состав	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
TiO ₂	—	—	Сл.	Сл.	Сл.	0,04	—	Сл.	—	0,02
SiO ₂	64,5	63,53	63,56*	64,20	63,77	63,50	63,84	63,62	64,99	64,56
Al ₂ O ₃	27,4	27,88	28,56	26,98	27,86	26,20	25,56	26,35	27,17	27,63
Fe ₂ O ₃	—	0,28	0,65	0,20	0,57	0,80	1,04	1,38	Сл.	—
FeO	—	0,52	0,58	0,28	0,21	—	Сл.	—	Сл.	0,05
MgO	—	0,02	0,28	0,10	0,12	0,13	1,56	0,10	0,09	0,03
CaO	—	0,21	0,47	0,06	0,11	0,12	0,70	0,09	0,14	0,12
MnO	—	0,11	0,12	0,05	0,13	0,06	0,10	0,13	0,05	0,03
Li ₂ O	8,1	5,92	5,39	6,95	6,30	7,54	5,35	7,18	7,26	6,76
Na ₂ O	—	0,95	0,44	0,23	0,24	?	0,31	0,01	0,60	0,72
K ₂ O	—	0,24	0,32	0,11	0,26	0,54	0,21			
Rb ₂ O	—	—	—	—	—	0,02	—	—	—	0,05
H ₂ O ⁻	—	0,06	0,10	0,12	0,08	—	0,23	0,24	0,10	0,09
H ₂ O ⁺	—	0,39	0,28	0,57	0,31	0,15	0,47	—	0,08	0,37
F	—	—	—	—	—	0,54	—	0,55	—	0,02
Cl	—	—	—	Сл.	—	0,26	—		—	—
Сумма	100,00	100,11	100,68	99,84	99,96	99,90	99,37	99,65	100,48	100,53

I. Вост. Сибирь. Аналитик Е. А. Свержинская, 1929.

II. Вост. Сибирь. Светло-зеленая прозрачная разность. Аналитик Бояршина, ЦНИГРИ, 1945.

III. Аналитик И. М. Шумило, 1939.

IV. Аналитик Е. А. Свержинская, 1934.

V. Аналитик Е. Н. Егорова, 1948.

VI. Северо-запад СССР.

VII. Северо-запад СССР, 1951.

VIII. Северо-запад СССР, 1951.

IX. Аналитик И. Ф. Фиолетова, 1938.

Для выяснения элементов-примесей, присутствующих в сподуменах, Н. В. Лизуновым проводились многочисленные спектроскопические исследования образцов сподумена различных месторождений Советского Союза. Аналогичная же работа по спектроскопическому исследованию сподуменов производилась за рубежом Г. Вильдом и Р. Клеммом (Wield

а. Klemm, 1925), А. Габриэлем, М. Славиным и И. Карлом (Gabriel, Slawin, Carl, 1942), а в последнее время Е. Клаффи (Claffy, 1953), И. Едвабом (Iodwab, 1953).

Из результатов произведенных химических и спектральных анализов различных сподуменов и опубликованных в литературе данных могут быть сделаны следующие выводы.

1. Ни один сподумен никогда не содержит 8,1% Li_2O ; содержание окисления лития в сподумене всегда ниже теоретического и колеблется от 6,5 до 7,5%. Объясняется это, по-видимому, рядом обстоятельств.

а) Все сподумены в той или иной степени изменены, причем все процессы изменения их приводят к выносу из сподумена Li_2O (Гинзбург, 1950). Особенно легко сподумен изменяется в условиях гипергенеза, когда вдоль трещин спайности и отдельности он переходит в глинистые минералы типа каолинита или галлуазита.

б) Литий в сподумене может в небольшом количестве изоморфно замещаться другими элементами, в частности, Mg, Fe^{+2} , Mn, а также, вероятно, и Na, аналогично тому, как это имеет место в слюдах, где Na в небольшом количестве входит в состав октаэдрической группы (Сердюченко, 1954; Гинзбург и Берхин, 1953).

в) В сподумене часто встречается большое количество мельчайших включений других минералов, в частности, кварца, мусковита, альбита, которые в целом влияют на уменьшение содержания Li_2O .

г) Сподумен часто бывает переполнен жидкими включениями, обычно вытягивающимися вдоль удлинения кристаллов. Эти включения несомненно также оказывают свое влияние на состав сподумена.

2. Все сподумены всегда содержат небольшое количество воды (0,1—0,5%), выделяющейся при температуре свыше 105° . Возможно, что некоторую часть этой воды следует отнести за счет присутствия мельчайших частиц глинистого вещества, но поскольку вода фиксируется во всех образцах, даже в прозрачных кунцитах и бесцветных драгоценных разновидностях, то можно предположить, что она входит либо в состав жидких включений, либо же в состав самого сподумена в виде гидроксильной группы. В связи с этим следует указать на наличие в некоторых сподуменах небольшого количества F (до 0,5%) и Cl. Причем, если еще можно считать, что Cl входит в состав галита, постоянно присутствующего в жидких включениях, то F, очевидно, может замещать только кислород.

Таким образом, мы приходим к выводу, что высокотемпературная вода в сподумене может быть трех типов: а) вода, появляющаяся за счет наличия мельчайших включений глинистых минералов; б) вода жидких включений, насыщенная NaCl; в) вода гидроксильная, совместно с F, входящая в состав самого сподумена $\text{LiAl}[\text{Si}_2(\text{O}, \text{OH}, \text{F})_6]$. Если последняя и присутствует в сподумене, то только в небольших количествах.

3. Все сподумены содержат некоторое количество щелочей: Na_2O , K_2O и в меньшем количестве Rb_2O . Появление этих примесей не совсем понятно; присутствие их может быть объяснено следующим.

а) Наличием мельчайших вростков альбита и чешуек слюды. При высоком содержании Na_2O в сподумене (более 1%) появление вростков альбита несомненно, что всегда видно под микроскопом. Но Na_2O в количестве 0,2—0,5% и K_2O порядка 0,1—0,3% обнаруживается во всех сподуменах и даже в таких, в которых никаких вростков посторонних минералов нет.

б) Na_2O , K_2O могут входить также в состав жидких включений, что уже отмечалось выше.

в) Na может в некоторых случаях замещать Li.

г) Не исключена возможность вхождения щелочей с большим ионным радиусом в структуру сподумена аналогично тому, как они входят в состав некоторых других моноклинных пироксенов, для которых часто предлагается следующая общая формула $(Ca, Na, K)_m(Fe, Mg, Li, Al, Fe^{+3})_{2m}[(Si, Al)_2(O, OH, F)_6]$.

Указание П. Квенсела (Quensel, 1938) на появление в сподумене Cs_2O в количестве до 3,73% (цезийсподумен) является, как это было нами указано (Гинзбург и Кононов, 1953), ошибочным и обусловлено наличием в сподумене механических включений поллукита.

4. В сподуменах всегда присутствует некоторое количество Fe, Mn и Mg. Появление их связано, по-видимому, с проявлением гетэровалентного изоморфизма: 2(Mg, Fe) замещаются группой LiAl. Однако, в отличие от других минералов (в первую очередь слюд, турмалинов, роговых обманок), этот изоморфизм проявляется только в весьма узких пределах. Непрерывного изоморфного ряда между сподуменом $LiAl[Si_2O_6]$ и энстатитом $Mg_2[Si_2O_6]$ не существует, максимальное содержание $MgO + FeO + MnO$ доходит только до 4,5%. Примеси Fe и Mn являются важнейшими хромофорами, обуславливающими зеленую, желтую, голубую и розовую окраску сподумена. Следует подчеркнуть, что наряду с Fe^{+2} в минерале всегда присутствует и Fe^{+3} .

5. Постоянными примесями в сподуменах являются также Ga и Sn. Содержание Ga_2O_3 , судя по опубликованным данным, меняется от 0,03 до 0,08% (Gabriel, Slavín, Carl, 1942) и доходит даже до 0,1%. Количество SnO_2 меняется от следов до 0,15%, чаще всего порядка 0,06—0,08%. Положение Ga в структуре сподумена понятно: он замещает Al. Олово же находится так же, как и в слюдах, в октаэдрической группе, замещая совместно с литием Mg и Fe^{+3} ($MgFe^{+3}$ или $MgAl$ замещаются LiSn), как это предполагает для слюд В. Л. Барсуков (1953).

Повышенное содержание Ga в сподуменах позволяет ставить вопрос об его извлечении при технологической переработке сподуменных концентратов.

6. К примесям, появляющимся спорадически, следует отнести Ge, Be, Ti, Pb, Ag и Cu. В редких случаях, когда пегматиты залегают в основных породах, в сподуменах появляется Cr, окрашивающий его в ярко-зеленый цвет (гидденит).

Пересчеты приведенных химических анализов на атомные количества, исходя из наличия в структуре сподумена $LiAl[Si_2O_6]$ шести ионов кислорода, показывают, что атомные количества Si остаются без изменения и равняются в среднем 2, т. е. никаких замещений кремния алюминием в тетраэдрических группах не наблюдается. Атомные количества Al в среднем также постоянны и колеблются вокруг 1. Таким образом, формула сподумена с учетом входящих в его состав примесей, на основании имеющихся анализов, может быть изображена в виде: $(Na, K, Ca)_m(Fe, Mg, Mn)_n Li_{1-(m+2n)}(Al, Fe)[Si_2O_{6-p}(OH, F)_p]$.

МЕСТО СПОДУМЕНА В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕГМАТИТОВ

По вопросу о времени выделения сподумена в процессе формирования пегматитов в литературе высказано несколько различных точек зрения. Большинство исследователей, детально изучавших сподуменные пегматиты (Стрелкин, 1941; Беус, 1951; Jahns, 1953 и др.), считают, что образование главной массы промышленного сподумена связано с кристаллизацией пегматитового расплава, при этом основная масса сподумена выде-

ляется непосредственно вслед за микроклином до появления альбита и кварц-мусковитового замещающего комплекса. Некоторые исследователи (Hess, 1940) относят его к типично метасоматическим минералам и ставят образование его в тесной связи с развитием процессов замещения (в частности, альбитизации), обусловленных привнесом гидротермальных растворов в ранее образовавшиеся безрудные пегматиты.

Наконец, В. И. Кузнецов (1953) в недавно вышедшей работе, не отрицая наличия ранних кристаллов сподумена, связанных с первичной кристаллизацией, в то же время относит главную массу промышленного сподумена к поздним минералам, образующимся после развития процесса альбитизации. Он считает, что кристаллы сподумена выделяются вдоль поперечных трещин в пегматите, благодаря чему они приобретают единую ориентировку и вытягиваются примерно перпендикулярно зальбандам жил.

Рассмотрим вкратце существующий по этому вопросу фактический материал. На многих сподуменовых месторождениях четко выделяются, по крайней мере, две различные генерации сподумена, резко различающиеся по времени своего выделения, размерами кристаллов, парагенетическими ассоциациями.

СПОДУМЕН ПЕРВОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Составляет основную массу всего сподумена на месторождениях. Представлен сильно вытянутыми кристаллами размером от 2—3 см до нескольких метров и более, находящимися в кварце, вследствие чего на многих месторождениях выделяется своеобразная кварц-сподуменовая или кварц-микроклин-сподуменовая зона. В других случаях (см. выше) сподумен распределен более или менее равномерно по пегматитовому телу. На многих месторождениях в распределении кристаллов сподумена наблюдаются определенные закономерности, которые несомненно свидетельствуют об образовании сподумена этой генерации, вследствие кристаллизации остаточных расплавов.

а) Размер кристаллов сподумена зависит от мощности пегматитовых тел. Так, на отдельных месторождениях, где жилы разветвляются на мало-мощные прожилки, сподумен не исчезает, сохраняется и ориентировка его кристаллов, но размер их уменьшается пропорционально уменьшению мощности тела.

В участках тел, где мощность не превышает 20—30 см, кристаллы сподумена достигают длины не более 1—3 см.

б) Размер кристаллов сподумена обычно увеличивается по направлению к центральной части тела. В призальбандовых зонах размер кристаллов сподумена обычно не более 5—10 см, а по мере приближения к осевой части жил размер кристаллов постепенно увеличивается, доходит до 40—50 см, в центральной же части пегматитовых тел средний размер их достигает 1 м и более.

в) В тех месторождениях, где кристаллы сподумена ориентированы примерно перпендикулярно зальбандам, эта ориентировка строго выдерживается близ зальбандов, но по мере приближения к осевым частям пегматитовых тел часто постепенно теряется.

г) Отдельные удлиненные кристаллы сподумена, располагающиеся в кварце, часто обтекают крупные блоки микроклина, также находящегося в кварце. Кристаллы сподумена, благодаря своему ориентированному расположению (в месторождениях, сформировавшихся в сложных тектонических условиях), создают определенные структуры течения.

д) На многих месторождениях, характеризующихся ориентированным расположением кристаллов сподумена, близ контактов тел наблюдается зона аплита или среднезернистого пегматита мощностью от 2—3 см до 50—70 см, полностью лишенная кристаллов сподумена (рис. 2). Если последние выделяются вдоль поперечных трещин в пегматите, как это себе представляет В. И. Кузнецов (1953), то остается непонятным, почему эти поперечные трещины нигде не доходили до линии контакта, а обрывались у зоны мелко- или среднезернистого пегматита, который вообще легко раскалывается (как об этом можно судить по наличию в нем многочисленных поздних прожилков, выполненных последующими минеральными агрегатами — альбитом, слюдкой и т. д.).

е) Ориентированное расположение кристаллов сподумена свидетельствует об образовании их в условиях наличия определенного бокового давления, а не о выделении их вдоль поперечной системы трещин, как предполагает В. И. Кузнецов (1953). Следует подчеркнуть, что подобное расположение кристаллов наблюдается только в месторождениях, сформировавшихся в сложных тектонических условиях, приуроченных к четко выраженным тектоническим зонам.

Агрегат кристаллов сподумена не располагается строго в одном направлении, отдельные удлиненные лейсты не вытягиваются друг за другом по одной линии, как это следовало бы ожидать, если предполагать, что они приурочены к системе трещин одного направления. Удлиненные кристаллы сподумена только примерно ориентированы в одном направлении, часто переплетаются между собой, образуя спутанный агрегат удлиненных кристаллов, только в целом сохраняющий единую ориентировку аналогично тому, как располагаются лейсты плагиоклаза в породах пилотакситовой и трахитоидной структуры.

Кристаллы сподумена первой генерации несомненно образовались раньше альбита и сопутствующих ему минералов. Доказывается это следующими фактами.

а) Кристаллы сподумена I обычно сильно катаклазированы, изогнуты и раздроблены, в то время как альбит слабо катаклазирован. Особенно часто кристаллы сподумена разбиты поперечными трещинами отдельности, причем отдельные части кристаллов бывают иногда смещены один относительно другого. Поперечные трещины отдельности в сподумене выполняются обычно кварцем, альбитом, мусковитом. Многие кристаллы сподумена бывают развальцованы и раздроблены на отдельные части.

б) Под воздействием некоторых разностей альбита (главным образом клевеландита) сподумен I изменяется и переходит в агрегат альбита и эвкриптита (см. процессы изменения сподумена). Оторочки волокнистого агрегата эвкриптита и альбита находятся повсеместно на границе сподумена и альбита — клевеландита.

в) Кристаллы сподумена I разъедаются и замещаются кварцем, альбитом, мусковитом, лепидолитом, спессартином, апатитом, щелочным бериллом, рубеллитом, касситеритом и другими минералами. Все эти минералы часто выделяются вдоль трещин спайности и отдельности сподумена, образуют в нем прожилки, корродируют его и т. д.

г) На многих месторождениях минералы замещающих комплексов (альбит-клевеландит, лепидолит, турмалин, касситерит и др.) образуют оторочки вокруг кристаллов сподумена. Так, нередко можно наблюдать вокруг кристаллов сподумена каемки крупночешуйчатого лепидолита, а вокруг последних — каемки клевеландита (рис. 6). Характерно, что пластинки клевеландита во многих случаях расходятся радиально от кристаллов сподумена. М. Ф. Стрелкиным (1941) описаны из пегматитов

Туркестанского хребта своеобразные выделения касситерита, расположенные вокруг удлиненных кристаллов сподумена, а Ю. М. Дымков (1949) описаны каемки тонковолокнистого полихромного турмалина, разъедающего сподумен вплоть до образования по нему псевдоморфа.

Все приведенные факты убедительно свидетельствуют об образова-

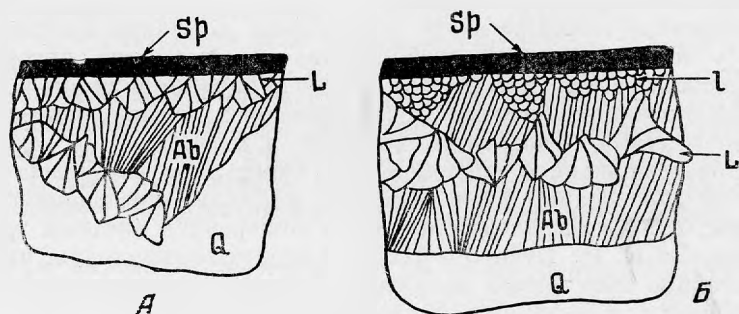


Рис. 6. Оторочки лепидолита и клевеландита вокруг кристаллов сподумена.

Sp — сподумен; L — крупночешуйчатый лепидолит; 1 — мелкочешуйчатый лепидолит; Ab — альбит; Q — кварц

ний основной массы кристаллов сподумена в пегматитах до развития процесса натриевого метасоматоза.

Наиболее интересен вопрос о взаимоотношении сподумена с микроклином, встречающимся в виде крупных блоков в центральных или промежуточных зонах пегматитовых тел. На многих месторождениях крупные идиоморфные кристаллы сподумена встречаются в кварце вместе с такими же большими кристаллами — блоками микроклина, причем чаще всего они располагаются несколько ближе к основной части пегматитовых тел, чем блоки микроклина. В то же время в некоторых жилах четко видно, что мелкие кристаллы сподумена явно обтекают как большие блоки микроклина, так и более крупные кристаллы сподумена. Наконец, известны случаи, когда кристаллы сподумена явно разрезают блоки микроклина, пронизывают (рис. 7) и корродируют его. Последние факты и дали, по-видимому, основание Ф. Хессу (Hess, 1940) говорить о метасоматическом развитии сподумена, о процессе «сподуменизации» микроклина.

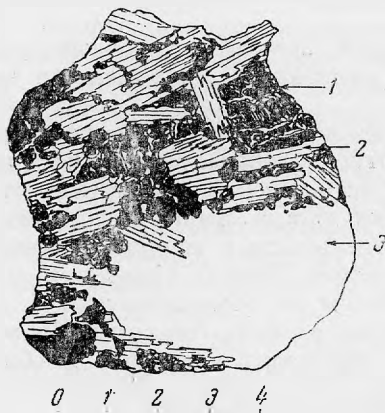


Рис. 7. Кварц-сподуменовый агрегат, разъедающий блоки микроклина

1 — кварц; 2 — сподумен; 3 — микроклин

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в большинстве случаев сподумен начинает выделяться позже микроклина, при этом в одних случаях границы между блоками микроклина и сподумена ровные, в то время как в других они явно реакционные. Однако во всех случаях связывать образование сподумена с процессами альбитизации или грейзенизации нет никаких оснований, так как кристаллы сподумена находятся целиком в кварце блоковых зон и в свою очередь сами изменяются под воздействием этих процессов.

ДО-
БЫМ
НА,
ОЗ.
ВА-

БЯ

ДО-
ЛИ
ЭЛ
П-
НА
МШ
МН
НИ
Э-
СШ
О-
ЛО
ОТ
И
А.
П-
ЭТ
7)
Ы
С-
Л-
И
зе
М
а
Х
и
а

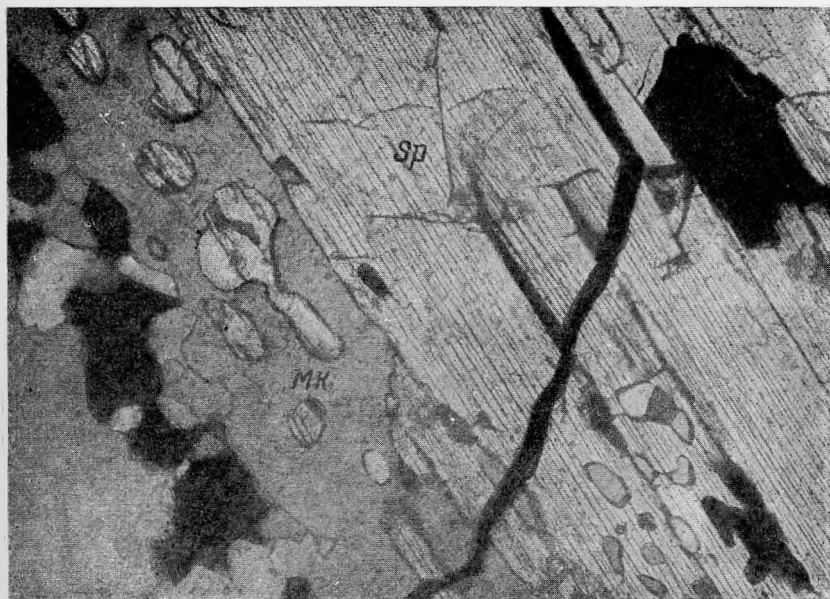


Рис. 8. Разъедание сподумена (Sp) микроклином (Mk). $\times 46$, ник. +

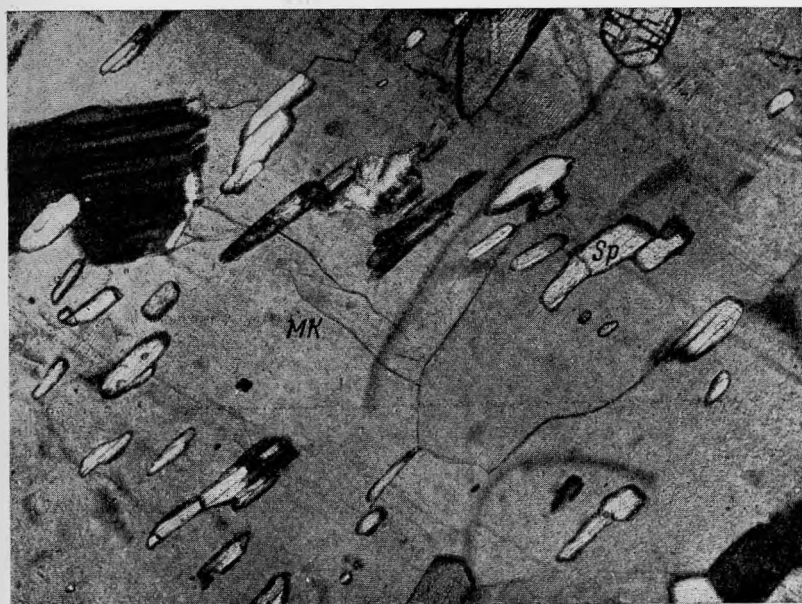


Рис. 9. Мелкие реликты сподумена (Sp) в микроклине (Mk), сохраняющие единую оптическую ориентировку. $\times 78$, ник. +

Необходимо также указать, что на отдельных месторождениях наблюдались кристаллы сподумена, полностью заключенные в микроклин, причем в шлифах вокруг таких разрезанных кристаллов сподумена можно было наблюдать мелкие реликты, сохраняющие с ними единую оптическую ориентировку (рис. 8). В некоторых шлифах в микроклин наблюдались многочисленные реликты сподумена округлой формы, образующие структуру «архипелага» и сохраняющие все единую оптическую ориентировку (рис. 9). В данном случае, несомненно, сподумен образовался раньше микроклина и замещался им.

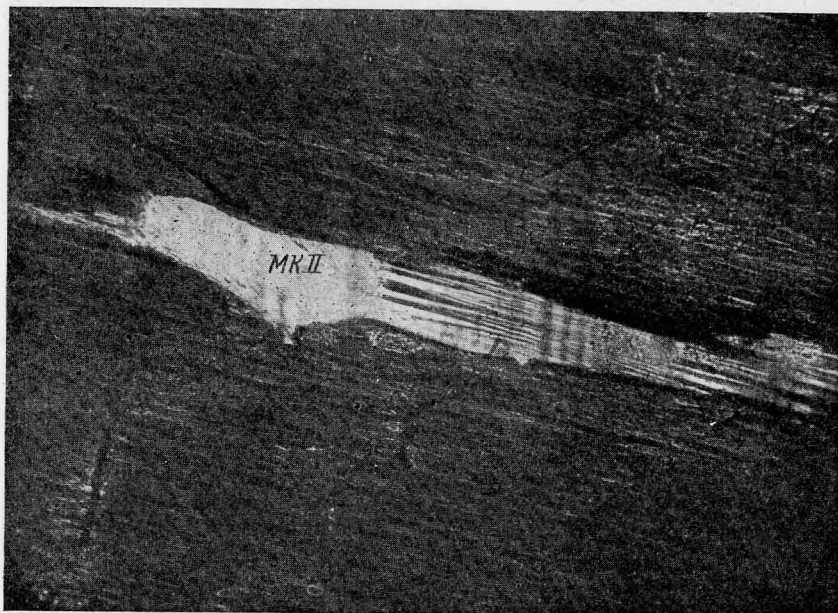


Рис. 10. Микроклин II в виде прожилка в сподумене. $\times 135$, ник. +

Все указанные факты позволяют сделать следующие выводы.

а) Образование сподумена на многих месторождениях происходило в течение значительного промежутка времени.

б) В большинстве случаев основная масса сподумена I выделялась после кристаллизации блокового микроклина.

в) Взаимоотношения микроклина и сподумена сложные и часто реакционные, кристаллы сподумена корродируют и иногда пронизывают блоки микроклина. По-видимому, смена калиевого этапа в ходе развития перматитового процесса литиевым (Гинзбург, 1955) сопровождается явлениями растворения ранее выделившихся калиевых минералов (микроклина) и образованием на их месте литиевых (сподумена).

г) В некоторых редких случаях, при очень высокой концентрации лития в остаточном расплаве, сподумен может выделяться и раньше, до окончания кристаллизации микроклина. В этом случае он в дальнейшем может замещаться микроклином.

д) Поздний микроклин второй генерации образуется явно позже сподумена I, выделяется в нем по трещинам в виде прожилков (рис. 10), иногда замещает его вплоть до образования псевдоморфоз. Подобные

псевдоморфозы позднего калиевого полевого шпата по сподумену описаны были нами (Гинзбург, 1949) и Ю. Я. Дымковым (1949) из пегматитов Калбинского хребта.

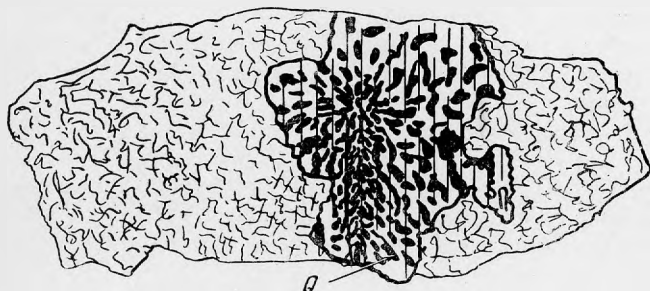


Рис. 11. Червеобразные вростки кварца (Q) в сподумене (Sp).

Взаимоотношения сподумена I с другими минералами следующие: кристаллы сподумена часто встречаются вместе с крупными желваками трифилина I и амблигонита I, отдельные кристаллы сподумена обнаружены в желваках трифилина и амблигонита, выделения последних иногда

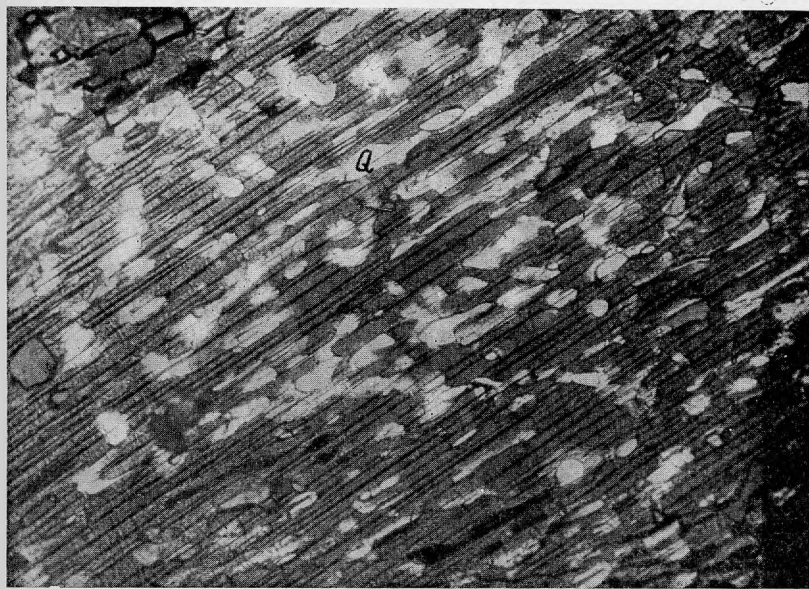


Рис. 12. Мелкие мирмекиитоподобные вростки кварца (Q) в сподумене (симплектитовая структура). $\times 135$, ник. +

располагаются между крупными кристаллами сподумена и явно ксеноморфны по отношению к ним. Все это свидетельствует о несколько более позднем образовании трифилина и амблигонита по сравнению со сподуменом.

Характерной особенностью сподумена первой генерации является почти постоянное наличие в нем многочисленных включений и вростков

других минералов, резко различающихся по своему происхождению. Можно выделить несколько подобного рода включений.

а) Включения ранее образовавшихся минералов, к которым следует отнести, например, идиоморфные мелкие кристаллы кварца, находящиеся внутри кристаллов сподумена.

б) Мельчайшие мирмекитоподобные включения кварца (рис. 11) иногда погасающие группами и образующие структуры, напоминающие микрографические (рис. 12).

Аналогичные явления наблюдались П. Квенселом (Quensel, 1946) в пегматитах Варутреска в Швеции. Он называет подобного рода структуры симплектитовыми и указывает, что для них характерно постоянное соотношение между сподуменом и кварцем (примерно 74% сподумена и 26% кварца). Такие структуры образовались явно метасоматическим путем.

в) Неправильные по форме вроски, приуроченные чаще всего к трещинам спайности и отдельности в сподумене, явно замещающие его. Подобного рода включения представлены преимущественно кварцем, альбитом, мусковитом, снессартином, апатитом, натро-литиевым бериллом, турмалином, кукеитом, лепидолитом и другими минералами замещающих комплексов. На некоторых месторождениях кристаллы сподумена проникнуты вдоль мельчайших трещин графитом, вивианитом, прожилками кварца с сульфидами и другими минералами.

г) Включения минералов, образующихся при изменении сподумена в различных условиях (эвкрипитита и альбита, мусковита, каолинита, галлуазита, монтмориллонита и др.).

СПОДУМЕН ВТОРОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Сподумен II хорошо различим обычно только под микроскопом и представлен мельчайшими кристалликами размером от 0,33 до 1—3 мм (средний размер зерен 0,2—0,5 мм).

Сподумен второй генерации отличается от более раннего следующими особенностями.

а) Размерами выделений.

б) Прозрачностью и цветом. Сподумен II всегда почти бесцветен и прозрачен. По внешнему виду он несколько приближается к кунциту, отличаясь от него отсутствием розовой окраски.

в) Формой выделения. В отличие от сподумена I кристаллы поздней генерации обычно не бывают сильно вытянутыми. Чаще всего они примерно изометричные или только слегка вытянуты. Точно так же они редко бывают плоскими и обычно в поперечном сечении имеют квадратное очертание.

г) Отсутствием на гранях призмы вертикальной штриховки.

д) Отсутствием или незначительным развитием катаклаза. Зерна сподумена II редко бывают трещиноватыми и еще реже разорванными и раздробленными.

е) Отсутствием включений других минералов. Изредка в них появляются листочки позднего мусковита или зерна кварца, которые проникают в сподумен II по трещинам.

ж) Сподумен II, как правило, не изменен, по нему почти никогда не развивается эвкрипитит с альбитом.

Кристаллы сподумена II встречаются в ассоциации с зернами микроклина II, альбита, кварца, апатита, амблигонита. Они разделяют все минералы первой генерации (олигоклаз, микроклин I, сподумен I).

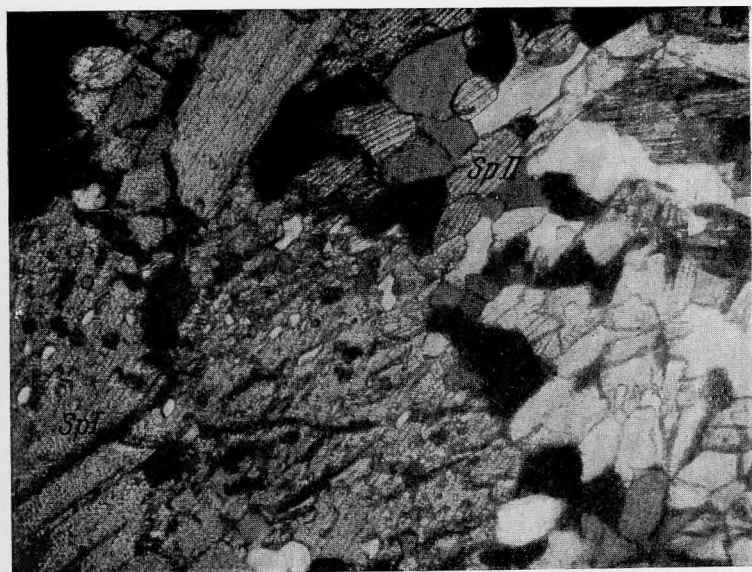


Рис. 13. Мелкие зерна сподумена II, расположенные на продолжении крупного кристалла сподумена I. $\times 46$, ник. +

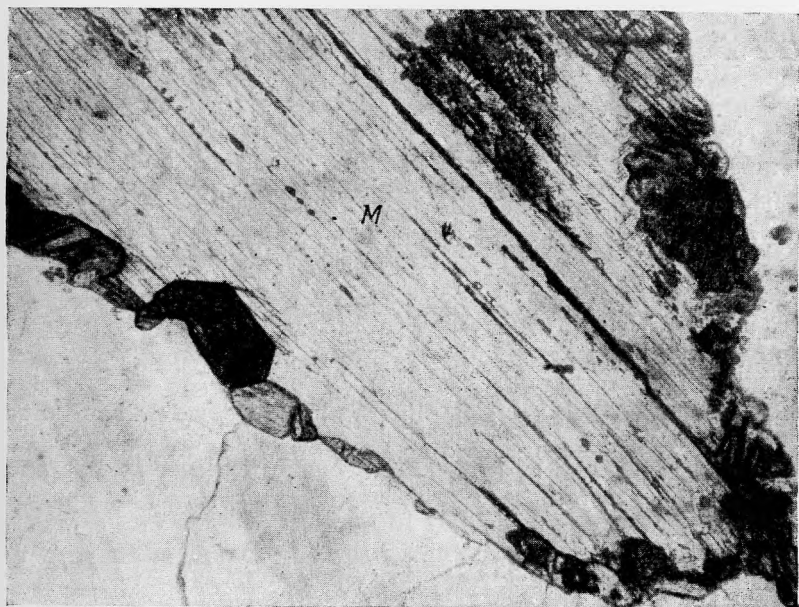


Рис. 14. Мелкие кристаллы сподумена II, вокруг пластинки мусковита. $\times 78$

думен и др.), идиоморфны по отношению к позднему микроклину I и кварцу).

Мелкие кристаллы сподумена II располагаются обычно в мелкозернистом аплитоподобном агрегате, развитом на некоторых месторождениях, состоящем из микроклина, альбита, кварца и мусковита, иногда составляя до 5—7% этого агрегата. Последний не только слагает хорошо выраженные прожилки, пересекающие сподуменовый пегматит, но проникает вдоль линий соприкосновения отдельных минералов первой генерации и усиленно разедает их. Среди такого аплитовидного агрегата иногда располагаются раздробленные кристаллы сподумена I. Крупные кристаллы сподумена I на отдельных месторождениях находились в мелкозернистом агрегате, состоящем из микроклина, амблигонита, монтебразита, кварца, сподумена II. Иногда мелкозернистый агрегат минералов второй генерации, содержащий сподумен, проникает вдоль трещин во все ранее образовавшиеся минералы.

Следует указать, что катаклазированные и разведенные кристаллы сподумена I на некоторых месторождениях окружены и проникнуты беспорядочно расположенным агрегатом идиоморфных мелких кристаллов сподумена II (рис. 13). Создается такое впечатление, что первоначально образовавшийся сподумен был раздроблен, частично растворен, и затем здесь же около разведенных реликтов его происходило образование сподумена в виде мелких зерен второй генерации. В отдельных случаях наблюдаются весьма своеобразные явления, когда мелкие кристаллы сподумена II образуют вокруг больших листочков мусковита характерные каемки, хорошо видимые на микрофотографии (рис. 14).

СПОДУМЕН, ОБРАЗУЮЩИЙСЯ ПРИ РАСПАДЕ ПЕТАЛИТА

К поздним генерациям сподумена следует также отнести своеобразные кварц-сподуменные образования, состоящие из мельчайших игольчатых, большей частью одинаково ориентированных кристаллов сподумена, находящихся в агрегате зерен кварца. Подобные образования, обнаруженные нами в Калбинском хребте (Гинзбург, 1949), имели форму плохо образованных кристаллов петалита и занимали в пегматитовых телах место этих кристаллов, т. е. представляли собой, по существу, сложные псевдоморфозы агрегата сподумена и кварца по петалиту. Образование их, вследствие распада петалита на сподумен и кварц, сомнения не вызывает. Необходимо указать, что образующийся по петалиту агрегат мелких зерен кварца и иголок сподумена различается как по размерам самих кристаллов, так и по текстуре и структуре.

Размер зерен кварца и сподумена в образующемся по петалиту агрегате обычно колеблется в широких пределах. Пластинки сподумена изменяют свою величину от десятых долей миллиметра до нескольких сантиметров. По размерам выделений сподумена можно различать три типа псевдоморфоз по петалиту.

а) Плотные белые, однородные по внешнему виду кварцитоподобные псевдоморфозы, в которых невооруженным глазом нельзя различить отдельных кристаллических индивидуумов.

б) Игольчатые псевдоморфозы, состоящие из агрегата одинаково расположенных иголок сподумена размером от 2—3 до 5—6 мм, между которыми находятся мелкие зерна кварца. Подобные псевдоморфозы имеют часто волокнистое строение и шелковистый блеск.

в) Крупнозернистые псевдоморфозы, состоящие из более крупных пластинок сподумена (длиной до 1—2 см) и зерен кварца. Как правило, в таких крупнозернистых агрегатах единая ориентировка лейст сподумена теряется. Точно так же в этом случае часто нарушается первоначальная форма кристаллов петалита и происхождение подобных кристаллов сподумена из петалита не всегда легко устанавливается. По-видимому, это



Рис. 15. Кварц-сподуменный агрегат — псевдоморфоза по петалиту (без анализатора). Q — кварц; Sp — сподумен. $\times 78$.

укрупнение кристаллов сподумена является результатом перекристаллизации более мелкозернистого агрегата.

Между выделенными тремя типами псевдоморфоз наблюдаются все постепенные переходы.

Структура образующегося по петалиту кварц-сподуменного агрегата весьма характерна. Иногда кварц и сподумен образуют типичную «торцовую» структуру (рис. 15), свидетельствующую об одновременном их образовании. В осевых частях зерен сподумена, образующих совместно с кварцем псевдоморфозы по петалиту, частично появляется большое количество мелких неправильных востков кварца весьма своеобразной червеобразной формы с сильно зазубренными краями. В целом эти мельчайшие востки кварца в сподумене несколько напоминают описанные выше симплектитовые включения кварца.

СПОДУМЕН, ОБРАЗУЮЩИЙ ПРОЖИЛКИ В ПОЛЛУЦИТЕ

(«Диасподумен», по П. Квенселу)

К поздним разновидностям сподумена следует также отнести своеобразные выделения мелкокристаллического столбчатого сподумена, постоянно встречающегося в поллуците и названного П. Квенселом (Quensel, 1938) диасподуменом.

Как известно (Quesnel, 1938; Гинзбург, 1944), отличительной особенностью поллукита является наличие в нем мельчайших прожилков, пересекающих его в различных направлениях. Под микроскопом отчетливо видно, что эти прожилки состоят из вытянутых столбчатых зерен сподумена, располагающихся перпендикулярно к стенкам прожилка (рис. 16).

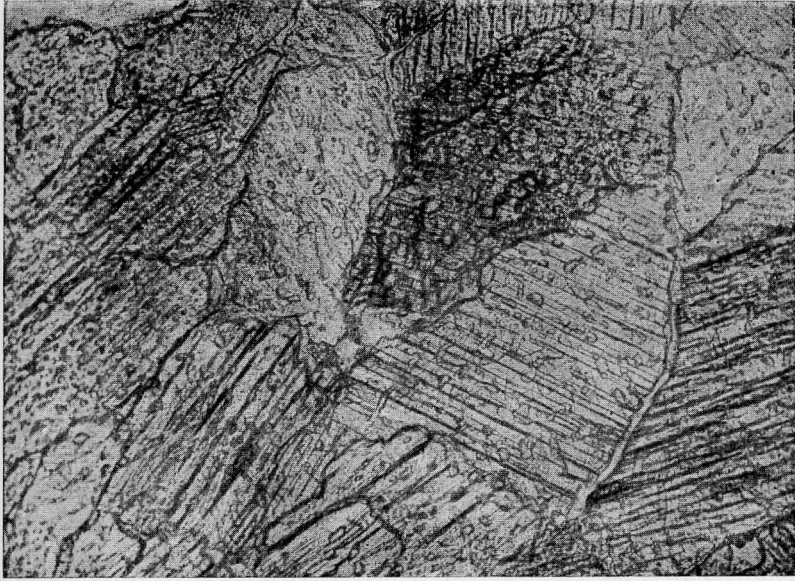


Рис. 16. Прожилок столбчатого сподумена (Sp) на границе турмалина (Т) и поллукита (черное). Сподумен проникнут мельчайшими вростками кварца. $\times 78$, ник. +

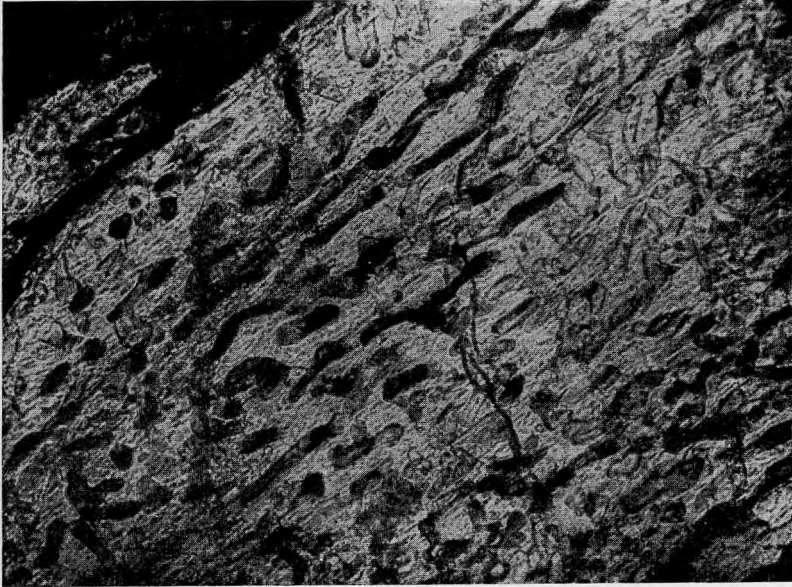
Зерна сподумена имеют неправильную, вытянутую форму, контур их обычно округлый. Самая характерная особенность столбчатых зерен сподумена — постоянное наличие в них мелких червеобразных вростков неизвестного минерала с более пизким рельефом и двойным лучепреломлением, при этом количество этих вростков в сподумене составляет обычно $1/3$ всей площади зерен сподумена (рис. 17, а, б).

П. Квенселу (1938) удалось выделить прожилки сподумена из поллукита и проанализировать их. Они показали содержание Cs_2O равное 3,73%. Оптические и рентгеновские исследования сподумена из прожилков показали, что зерна его по своим свойствам относятся к типичному сподумену. Вростки неизвестного минерала не могли быть исследованы П. Квенселом из-за малой величины. Для выяснения их состава П. Квенсел пересчитал результаты анализа сподумена с вростками неизвестного минерала по содержанию Li_2O на сподумен; остаток был пересчитан по содержанию $Cs_2O + Rb_2O + K_2O$ на минерал состава $(Cs, Rb, K)_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$. После произведенных пересчетов оказался избыток 13,5% SiO_2 , который П. Квенсел отнес к примеси кварца.

На основании этих исследований Квенсел предполагал, что неизвестный минерал, образующий мирмекитоподобные вростки в зернах сподумена, представляет собой цезиевый аналог сподумена состава $CsAl[SiO_3]_2$. Этот минерал был им назван цезий, сподуменом, а сподумен с вростками цезийсподумена — диасподуменом.



a



б

Рис. 17. В поллците прожилок сподумена с вростками кварца.

a — $\times 90$, без анализатора; *б* — $\times 135$, ник. +

Совершенно аналогичные явления неоднократно наблюдались нами и Ю. М. Дымковым (1953) в пегматитах Калбинского хребта. В любом образце поллуцита можно было наблюдать под микроскопом прожилки, состоящие из зерен сподумена с описанными выше мирмекитоподобными вростками (рис. 18), которые обычно бывают настолько малы, что исследовать их не представляется возможным. Только в самое последнее время нам совместно с О. В. Кононовым (1953) удалось выделить сподумен с неизвестными вростками в чистом виде и исследовать их. Вростки оказались типичным кварцем, а не новым минералом — цезийсподуменом.

Естественно, возникает вопрос, почему анализ сподуменных прожилков, произведенный П. Квенселом, показал высокое содержание Cs_2O ? Внимательный просмотр шлифов дал возможность установить, что несмотря на то, что зерна сподумена образуют явные прожилки в поллуците и пересекают его, поллуцит (по-видимому, другой генерации) в то же время замещает эти прожилки сподумена, проникает между отдельными столбчатыми зернами сподумена и интенсивно корродирует их. Самая любопытная деталь этого замещения состоит в том, что сподумен весьма легко замещается поллуцитом, в то время как мирмекитовые вростки кварца не подвергаются замещению и сохраняются в поллуците (рис. 18, 19).

Таким образом, поллуцит, развивающийся по сподумену, отличается наличием мирмекитовых вросток кварца. По-видимому, П. Квенсел имел дело не совсем с однородным материалом; среди зерен сподумена с мирмекитовыми включениями кварца находились, по всей вероятности прожилки поллуцита, загрязнявшие анализируемый минерал Cs_2O , что привело Квенсела к ошибочному установлению нового минерала — цезийсподумена.

Вопрос о причине образования в поллуците прожилков сподумена с мирмекитовыми вростками кварца до настоящего времени не совсем ясен. Естественное объяснение, которое напрашивается из сравнения всего приведенного фактического материала с описанным выше сподуменом (образующимся при распаде петалита), в том, что прожилки в поллуците первоначально были выполнены петалитом, который впоследствии распался на сподумен и кварц. Только этим можно объяснить постоянное содержание в столбчатом сподумене кварца и характер выделения последнего.

ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СПОДУМЕНА

Характерной особенностью сподумена является то, что он весьма легко подвергается различным процессам изменения, которые в конечном итоге приводят к выносу из него лития и к превращению его в агрегат других минералов. Эти процессы изменения зачастую так широко развиты, что некоторые сподуменные месторождения оказываются совершенно непригодными для добычи из них сподумена.

Известны многочисленные рудные тела, в которых вместо сподумена можно обнаружить только удлиненные псевдоморфозы по нему различных минералов, по которым можно догадываться о том, что пегматиты раньше были сподуменными.

Процессы изменения сподумена резко ухудшают качество руд и существенно сказываются как на процессе обогащения (измененные руды плохо подвергаются флотации), так и на технологических свойствах руд. Поэтому изучение процессов изменения сподумена имеет большое практическое значение. По существу, невозможно правильно проводить раз-

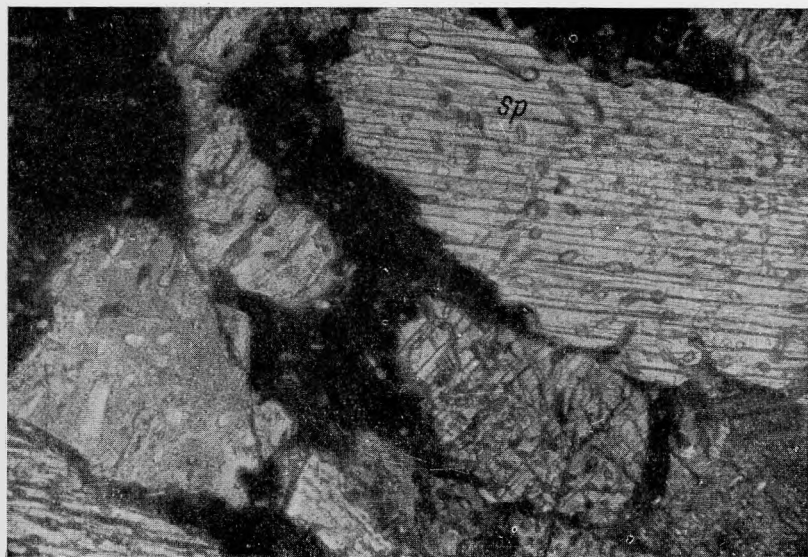


Рис. 18. Замещение зерен сподумена, проникнутых востками кварца, поллуцитом (черное). В поллуците сохраняются востки кварца. $\times 135$, ник. +

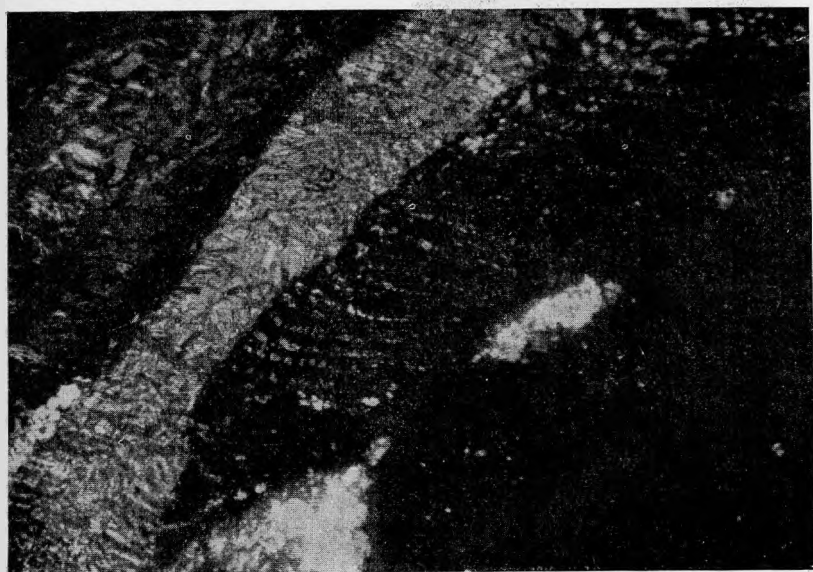


Рис. 19. Замещение сподумена, проникнутого востками кварца, поллуцитом; в поллуците сохраняются востки кварца. $\times 135$, ник. +

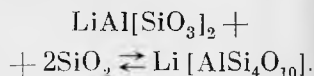
ведку и эксплуатацию сподуменовых месторождений, а также давать их промышленную оценку без учета степени изменения сподуменовых руд. Недоучет этих явлений зачастую приводит к большим непроизводительным затратам.

Прошло двенадцать лет с момента выхода в свет нашей работы по процессам изменения сподумена. В течение указанного времени этими вопросами занимались многие геологи и минералоги как у нас в Союзе (А. С. Голиков, Ю. М. Дымков, П. П. Змановский, А. Ф. Соседко, Г. Н. Гарновский, В. И. Михайкин), так и за рубежом (Станек, 1954 и др.). Проведенные в эти годы исследования в целом подтвердили основные выводы, изложенные в предыдущих работах (1944, 1950) и позволили уточнить отдельные их положения.

Все разнообразные процессы изменения сподумена могут быть сведены к нескольким основным процессам, проявившимся с различной интенсивностью на многих месторождениях.

1. Замещение сподумена петалитом

На многих месторождениях наблюдается замещение сподумена петалитом, который часто выделяется по трещинам спайности в сподумене, окаймляет и разъедает кристаллы сподумена (рис. 20) и в некоторых случаях образует по нему псевдоморфозы, сохраняющие реликты сподумена (Гинзбург, 1954). Следует отметить характерную особенность этого процесса: всюду, где сподумен разъедается петалитом, присутствует кварц. Подобная ассоциация вполне закономерна, так как петалит образуется в этом случае по схеме:



Процесс этот, несомненно, ранний и протекает до развития альбитизации. Он обусловлен повышением концентрации SiO_2 в растворе до такой величины, при которой сподумен становится неустойчивым и начинает замещаться петалитом.

Возможность широкого развития данного процесса в пегматитах необходимо учитывать при опробовании месторождений, так как бороздочные пробы, взятые из участков рудных тел, богатых «петалитизированным» сподуменом, покажут высокое содержание Li_2O даже при незначительном количестве оставшегося сподумена, который только и будет добыт при обогащении руд методом флотации или декрипитации. Поэтому при опробовании сподуменовых пегматитов, содержащих петалит,

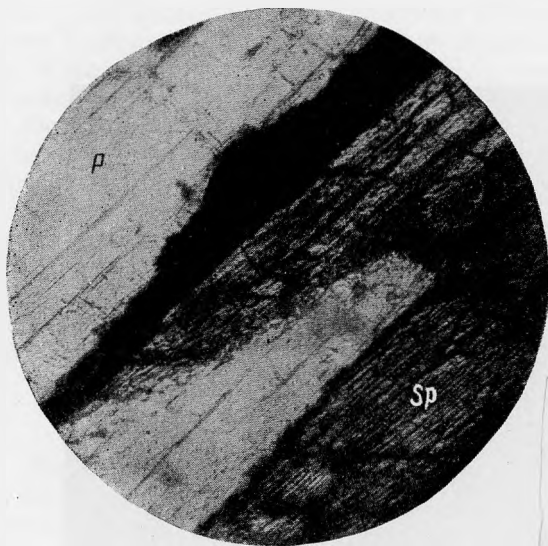


Рис. 20. Сподумен (Sp), корродированный петалитом (P). На границе между сподуменом и петалитом оторочка альбита и эвкрипитита.
× 46, н.к.+

вые пробы, взятые из участков рудных тел, богатых «петалитизированным» сподуменом, покажут высокое содержание Li_2O даже при незначительном количестве оставшегося сподумена, который только и будет добыт при обогащении руд методом флотации или декрипитации. Поэтому при опробовании сподуменовых пегматитов, содержащих петалит,

нельзя ограничиваться определением содержания Li_2O в пробах, а необходимо проводить количественный минералогический анализ и определять содержание в пробах сподумена.

2. Замещение сподумена кварцем

Кристаллы сподумена I, находящиеся в кварце, часто имеют сильно разведенную форму и нередко содержат многочисленные червеобразные включения кварца, обуславливающие развитие своеобразной кварц-сподуменной псевдографической структуры. В некоторых случаях кристаллы сподумена бывают почти нацело проникнуты подобными вростками кварца, причем последние иногда расходятся радиально (рис. 21) или концентрируются по краям кристаллов (рис. 11). Несомненно, что эти вростки представляют собой результат своеобразного процесса кварцевого метасоматоза, широко развивающегося в пегматитовых телах на определенных этапах развития процесса. Замещение сподумена кварцем происходит явно после образования петалита по сподумену, так как петалит столь же интенсивно замещается кварцем (Гинзбург, Гущина, 1954), как и сподумен, по которому он развивается. Но в то же время этот процесс явно протекает до альбитизации микроклина, так как вростки альбита часто располагаются вокруг включений кварца в сподумене и иногда даже пересекают их. По-видимому, этот процесс идентичен процессу кварцевого метасоматоза, приводящему к образованию в мусковитовых пегматитах апографических структур (Родионов, 1954). Не исключена возможность, что эти вростки образовались при замещении микроклина сподуменом (А. С. Назарова).

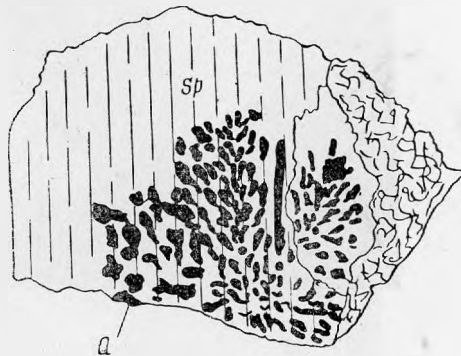


Рис. 21. Червеобразные вростки кварца (Q) в сподумене (Sp)

3. Замещение сподумена альбитом

Все сподуменные пегматиты всегда в той или иной степени альбитизированы. Под воздействием процесса альбитизации изменяется и сподумен, переходящий обычно с периферии кристаллов и вдоль трещин спайности в агрегат альбита и эвкриптита, описанный Бруш и Дэна (Brush and Dana, 1880) под названием β -сподумена.

Процесс перехода сподумена в агрегат альбита и эвкриптита был подробно описан нами ранее. Он является частью общего процесса натриевого метасоматоза, исключительно сильно развитого во всех пегматитах данного типа. Доказательством этого могут служить следующие факты.

а) В тех случаях, когда сподумен I находится непосредственно в альбите, он, как правило, окаймляется оторочкой агрегата из альбита и эвкриптита (рис. 22).

б) Переход сподумена в агрегат альбита и эвкриптита происходит при непосредственном соприкосновении с альбитом (рис. 23)

в) В тех случаях, когда альбит в виде прожилка пересекает сподумен, вокруг него находятся оторочки, состоящие из волокон эвкрипти-



Рис. 22. Мелкокристаллический агрегат альбита и эвкриптита, образовавшийся по сподумену на контакте его с альбитом. $\times 46$, ник. +

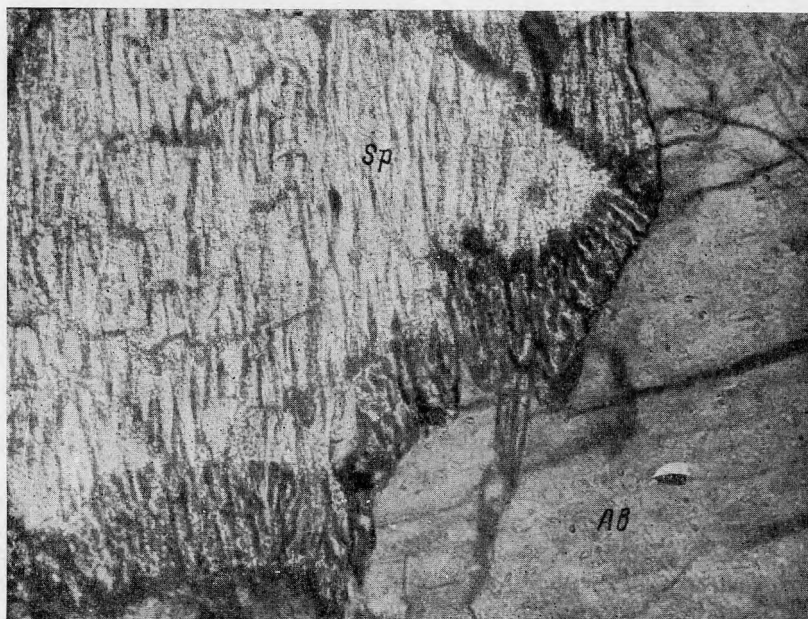


Рис. 23. Тонковолокнистый агрегат эвкриптита и альбита на контакте сподумена (Sp) и альбита (Ab). $\times 135$, ник. +

та, при этом последние ориентированы перпендикулярно к прожилку (рис. 24).

Образовавшиеся по сподумену под воздействием натриевых растворов волокна эвкриптита при дальнейшем развитии пегматитового процесса становятся неустойчивыми и легко изменяются, переходя в слюдку типа мусковита-жилбертита. В результате по сподумену образуется агрегат альбита и волокон слюды, представляющих собой псевдоморфозы по волокнам эвкриптита, называемый циматолитом.

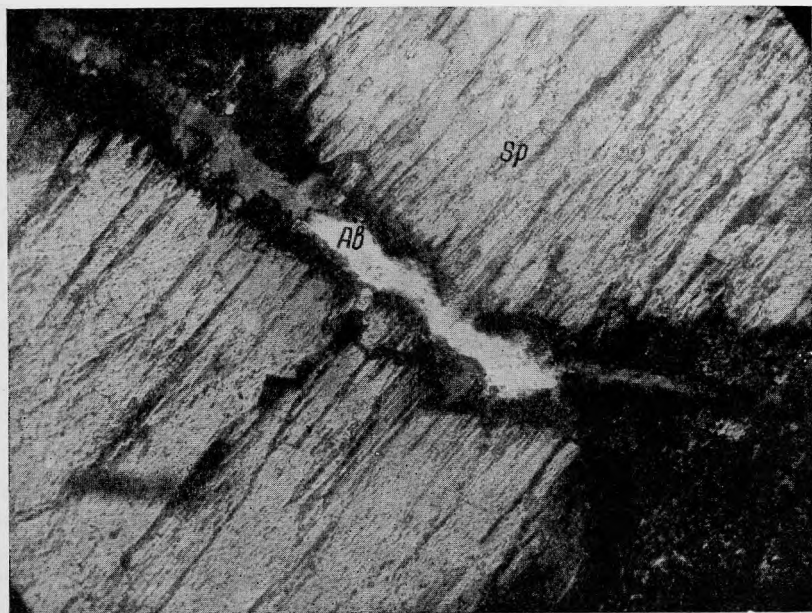


Рис. 24. Прожилок альбита (Ab) в сподумене (Sp). Вокруг прожилка кайма агрегата альбита и эвкриптита. $\times 90$, ник. +

Однако сподумен изменяется под воздействием не всякого альбита. Наблюдения, произведенные на различных месторождениях, показывают, что сподумен изменяется всегда под воздействием крупнопластинчатого альбита-клевеландита, образующегося при спокойных тектонических условиях.

Всюду, где клевеландит граничит со сподуменом и замещает его, появляется каемка волокнистого эвкриптита. В отличие от крупнопластинчатого клевеландита, мелкие зерна сахаровидного альбита корродируют сподумен, но не приводят к превращению его в эвкриптит. На многих месторождениях, где широко развит агрегат мелкозернистого альбита, кристаллы раннего сподумена сильно растворены, но не изменены.

Мало изменены и мелкие зерна сподумена второй генерации, выделяющиеся после крупнопластинчатого альбита. Очевидно, переход сподумена в эвкриптит происходит только при вполне определенных физико-химических условиях; при резком падении давления, когда образуется мелкозернистый агрегат сахаровидного альбита, этот процесс не наблюдается.

Таким образом, процесс перехода сподумена в агрегат альбита и эвкриптита наиболее интенсивно протекает под воздействием альбитизации в

форме клевеландита. В тех сподуменовых месторождениях, где интенсивно развивается клевеландит, сподумен может быть нацело изменен и превращен в белый шелковистый агрегат циматолита. Там же, где альбитизация развивается преимущественно в форме среднезернистого и особенно сахаровидного альбита, т. е. в месторождениях, сформировавшихся в неспокойных тектонических условиях, сподумен изменен в значительно меньшей степени, но он сильно замещается альбитом, что в целом приводит к ухудшению качества руд.

В некоторых сильно альбитизированных пегматитах с широким развитием клевеландита сподумен вообще не встречается, но о том, что он когда-то присутствовал в пегматитах можно только догадываться по наличию среди альбитизированных участков удлиненных выделений циматолита. Поэтому появление в пегматитах циматолита может служить своего рода поисковым признаком, указывающим на наличие в телах литиевой минерализации.

Поскольку с процессами альбитизации пегматитов генетически связаны касситерит, танталит, колумбит и некоторые другие руды редких элементов, то часто в пегматитах наблюдается следующее явление: в слабо альбитизированных участках жил, где встречается сподумен, пригодный для добычи, отсутствуют другие минералы редких элементов, а в соседних участках, где сподумен нацело изменен и превращен в агрегат циматолита, в промышленном количестве присутствует касситерит.

4. Замещение сподумена мелкочешуйчатым мусковитом

Процесс альбитизации в пегматитах всегда сопровождается вторым, несколько более поздним процессом образования мелкочешуйчатой зеленоватой слюды — мусковита с содержанием небольшого количества

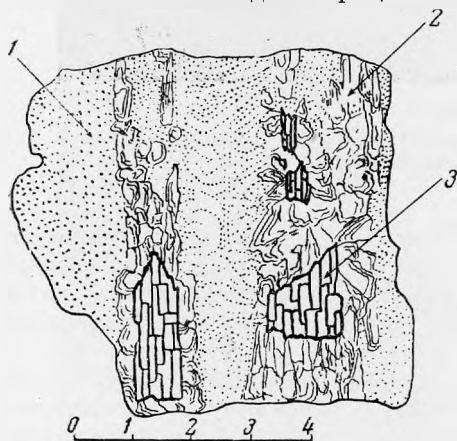


Рис. 25. Реликты сподумена среди агрегата зеленой слюдки, замещающей сподумен

1 — мелкозернистый агрегат; 2 — слюда;
3 — сподумен

литиевой слюды — мусковита с содержанием небольшого количества Li_2O (порядка 0,1—0,3%). Этот процесс часто условно называют «грейзенизацией», хотя, строго говоря, с типичным процессом грейзенизации он имеет мало общего. Образующийся агрегат зеленых слюдок интенсивно замещает сподумен вплоть до образования типичных псевдоморфоз. При этом литий, как правило, из сподумена выносится и образуются типичные мусковиты.

Этот процесс «грейзенизации», следующий непосредственно за альбитизацией, губительно отражается на литиевых месторождениях, так как приводит к почти полному замещению сподумена мелкочешуйчатым мусковитом.

О первоначальном присутствии сподумена можно только догадываться по сильно вытянутым полоскам, состоящим из скоплений мелких чешуек мусковита, среди которых кое-где обнаруживаются небольшие реликты сподумена (рис. 25). В тех случаях, когда такие пегматитовые жилы подверглись последующему воздействию тектонических подвижек, форма кристаллов

также изменяется и догадаться о том, что пегматиты были сподуменовыми, не всегда удается.

Поскольку с процессом грейзенизации обычно связано образование касситерита и др., то на этих месторождениях нередко наблюдается определенная зональность; одна часть их оловорудная, другая (в которой процесс грейзенизации и альбитизации сказался меньше и где сподумен не изменен) — литиевая.

5. Замещение сподумена калиевым полевым шпатом

На некоторых месторождениях наблюдается весьма своеобразное замещение сподумена поздним калиевым полевым шпатом, иногда решетчатым микроклином, чаще ортоклазом или адуляром. Этот процесс протекает до полного исчезновения сподумена и образования по нему псевдоморфоз калиевого полевого шпата. Подобные явления были описаны нами (Гинзбург, 1949) и Ю. М. Дымковым (1949) из пегматитов Калбинского хребта, а в последние годы наблюдались Г. Н. Тарновским¹ из пегматитов Восточной Сибири. Процесс этот явно протекает после развития циматолита, так как на некоторых слюдисто-альбитовых псевдоморфозах по сподумену нарастали поздние кристаллы калиевого полевого шпата. В других случаях вместе с калиевым полевым шпатом, развивающимся по сподумену, тесно ассоциируют чешуйки жильбертита или листочки кукента. В целом этот процесс распространен незначительно и существенно не сказывается на качестве сподуменных руд.

6. Замещение сподумена слюдками типа онкозина

Сподуменные жилы многих месторождений часто пронизаны многочисленными кварцевыми прожилками, проходящими вдоль залывандов жил или же секущими их в различных направлениях. Вокруг этих поздних прожилков сподумен в пегматитах всегда бывает изменен и нацело превращен в плотный кристокристаллический агрегат слюдок, описанных в литературе под различными названиями (киллинит, онкозин, дамурит, жильбертит, нинит, серицит и др.). Такие слюдистые псевдоморфозы по сподумену окрашены чаще всего в яблочнозеленый цвет, иногда они темно-зеленые или розовые. По составу своему они близки к гидрослюдам. В некоторых случаях наблюдаются переходы от слюдистых псевдоморфоз по сподумену к глинистым.

7. Изменение сподумена в условиях гипергенеза и переход его в глинистые минералы

Специфической особенностью сподуменных месторождений является необычайная легкость разрушения сподуменов в условиях гипергенеза, в связи с чем на сподуменных месторождениях образуется своеобразная зона выщелачивания, в пределах которой сподумен бывает иногда нацело изменен и превращен в различные глинистые минералы: каолинит, галлуазит или монтмориллонит, в зависимости от физико-химических условий, в которых происходит выветривание.

¹ Устное сообщение.

Изменение сподумена происходит главным образом при длительном воздействии на него проточных вод и сказывается в образовании вдоль трещин спайности и трещин отдельности кристаллов сподумена глинистых минералов (рис. 26), вследствие чего такие измененные кристаллы легко рассыпаются в руках на отдельные мелкие иголки.



Рис. 26. Выветрелый сподумен. Реликты сподумена (Sp) в галлаузите. $\times 135$, без анализатора.

В нормальных условиях, при отсутствии в пегматитах сульфидов, по сподумену развивается галлаузит. Под микроскопом отчетливо видно, что глинистые псевдоморфозы по сподумену состоят в основном из изотропной глинистой массы, иногда с характерной лучистой структурой, среди которой появляются в большом количестве мелкие реликты сподумена.

При наличии в пегматитах значительного количества сульфидов обуславливающих в отдельных участках зоны окисления слабोकислую реакцию циркулирующих вод, среди массы галлаузита, развивающегося по сподумену, появляется каолинит, образующий листочки характерной червеобразной формы, либо прожилки в галлаузите. Наконец, в условиях наличия хорошего стока атмосферных вод и малого количества остаточной влаги, т. е. на высоких склонах ущельев, с поверхности отвалов в стенках канав и т. п. по сподумену развивается монтмориллонит, окрашенный обычно в розовый цвет. Подобные розовые глинистые образования широко распространены на отвалах канав, в стенках канав, в заброшенных забоях горных выработок и вдоль тектонических зон.

Таким образом, в результате процессов выветривания с поверхности пегматитовых жил развивается зона выщелачивания, в пределах которой содержание Li_2O значительно ниже, чем на глубине. Характер и интен-

сивность выветривания сподумена и соответственно с этим мощность зоны выщелачивания бывают различными в разных месторождениях. В пегматитах, расположенных в высокогорных районах, в зоне вечных снегов или в полярных районах, где выветривание вообще протекает замедленно, сподумен с поверхности почти не изменен. В месторождениях, находящихся в тропическом поясе или расположенных в районах развития древней коры выветривания, весь сподумен на глубину до 20—25 м и более нацело выщелочен и превращен в глины типа галлуазита или каолинита.

Мощность указанной зоны выщелачивания и характер развития ее зависят от целого ряда факторов, главными из которых являются: наличие древней и современной коры выветривания, трещиноватость пород и наличие тектонических зон, современный и древний уровни грунтовых вод, климат и др.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- Барсуков В. О формах переноса олова в гидротермальных растворах. Докл. АН СССР, т. ХСIII, № 6, стр. 1065, 1953.
- Беус А. А. О зональности гранитных пегматитов. Изв. АН СССР, сер. геол., № 6, 1951.
- Гинзбург А. И. Процессы изменения сподумена. Зап. Всесоюз. минер. об-ва, ч. LXXIII, № 4, 1944.
- Гинзбург А. И. Поллунит в пегматитах Калбинского хребта (Восточный Казахстан). Докл. АН СССР, т. LII, № 4, 1946.
- Гинзбург А. И. Петалит в пегматитах Калбинского хребта и процессы его изменения. Тр. Минер. музея, вып. 1, 1949.
- Гинзбург А. И. О некоторых особенностях сподуменовых месторождений. Резведка недр, № 1, 1950.
- Гинзбург А. И., Берхин С. И. О составе и химической конституции литиевых слюд. Тр. Минер. музея, вып. 5, 1953.
- Гинзбург А. И., Кононов О. В. О цезийсподумене. Докл. АН СССР, т. ХСI, № 5, 1953.
- Гинзбург А. И., Гушина Н. С. Петалит в пегматитах Восточного Забайкалья. Тр. Минер. музея, вып. 6, 1954.
- Гинзбург А. И. Минералого-геохимическая характеристика литиевых пегматитов. Тр. Минер. музея, вып. 7, 1955.
- Гинзбург А. И. О некоторых особенностях геохимии лития. Тр. Минер. музея, вып. 8, 1956.
- Дымков Ю. М. О некоторых псевдоморфозах по сподумену. Сб. научных работ студ. горно-металл. ин-тов Москвы, 1949.
- Дымков Ю. М. Морфология выделений поллудита и их генезис. Тр. Минер. музея, вып. 5, 1953.
- Крыгина Н. Е. Сподумен из месторождения Алтын-Тау. Зап. Всеросс. минер. об-ва, ч. LXXVII, № 4, 1948.
- Кузнецов В. И. К вопросу о месте сподумена в процессе формирования гранитных пегматитов. Минер. сб. Львовск. геол. об-ва, № 7, 1953.
- Родионов Г. Г. О так называемых апографических пегматитах. Тр. Гипронис-слюды, вып. I (3), 1954.
- Сердюченко Д. П. О кристаллической роли натрия в магнезиально-железистых слюдах. Докл. АН СССР, т. ХСVII, № 2, 1954.
- Стрелкин М. Ф. К минералогии Чердожского и Верхне-Бай-Мурзинского месторождения. Тр. ИГН АН СССР, вып. 51, 1941.
- Brush G. B., Dana E. S. On the mineral locality in Fairfield County, Connecticut. Amer. Journ. Sci., 20, 257, 1880.
- Claffy E. W. Composition, tenebrescence and luminescence of spodumene minerals. Amer. Mineral., 38, Nos 11—12, 1953.
- Derry D. R. Lithium-bearing pegmatites in Northern Quebec. Econ. Geology, 45, № 2, 1950.
- Gabriel A., Slavin M., Carl J. Minor constituents in spodumene. Econ. Geology, 37, № 2, 1942.
- Hess F. The spodumene pegmatites of North Carolina. Econ. Geology, 35, № 8, 1940.

- J a h n s R. H. The genesis of pegmatites. I. Occurrence and origin of giant crystals. Amer. Mineral., 38, № 7—8, 1953.
- J e d w a b J. Etude des oligo-elements dans les mineraux des pegmatites. Докт. дисс. Брюссель, 1953.
- P a r g a-P o n d a l J., C a r d o s o G. M. Die Lithiumpegmatite von Lalin in Galizien. Schweiz. Mineral. Petr. Mitteil., 28, 1, S. 324, 1948.
- Q u e n s e l P. Spodumene and its alteration products. Geol. Foren. Stockholm Förhandl., 60, 2, 1938.
- Q u e n s e l P. A. spodumene-quartz symplektite. Geol. Fören. Stockholm Förhandl., 68, 1, 1946.
- S c h a l l e r W. T. Gigantic crystals of spodumene. Geol. Survey, Bull., 610, p. 138, 1916.
- S t a n e k J. Spodumen a bavenit z Jeclova. Časopis Moravs. musea, Ročn. 39, 1954.
- W i l d G. O., K l e m m R. Mitteilungen über spektroskopische Untersuchungen an Mineralien. V. Spodumen. Centralbl. f. Mineral., Abt. A, 2, S. 324, 1925.
-