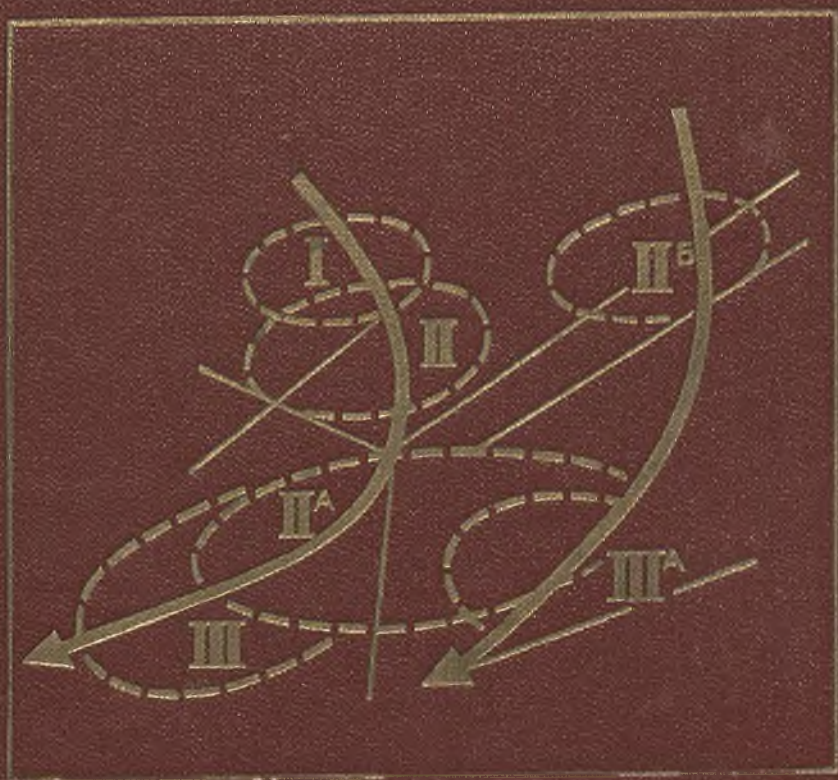


**ГЕОЛОГИЯ,
ГЕНЕЗИС
И ПРОМЫШЛЕННЫЕ
ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
КВАРЦА**



МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР
Всесоюзный научно-исследовательский институт
синтеза минерального сырья

ГЕОЛОГИЯ ГЕНЕЗИС И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КВАРЦА

Составитель доктор геолого-минералогических наук
Е. П. Мельников



МОСКВА "НЕДРА" 1988

БКБ 26.325
Г36
УДК 553.621

Выпущено по заказу Всесоюзного научно-исследовательского института синтеза минерального сырья (ВНИИСИМС)

Геология, генезис и промышленные типы месторождений кварца/Всесоюз. науч.-исслед. ин-т синтеза минерального сырья. Составитель Е. П. Мельников.— М.: Недра, 1988.— 216 с.: ил.

Изложены результаты комплексного изучения эндогенных объектов кварцевой и хрустальной минерализации во времени и в пространстве. Приведены характеристики физико-химических свойств и обзор данных по использованию промышленностью СССР и зарубежных стран различных типов кварца и высококремнеземистых материалов. Выполнен формационный анализ природных кварцевых образований. В историко-геологическом аспекте рассмотрены выделенные формации и соответствующие им генотипы месторождений магматогенного и метаморфогенного кварца. Определена роль факторов, контролировавших кварце- и хрусталеобразование в земной коре. Предложены практические рекомендации по постановке прогнозно-поисковых и разведочных работ на перспективные типы кварцевого сырья.

Для геологов различных специальностей, занимающихся изучением месторождений кварца.

Г 1904030000—107 Заказное
043(01)—88

БКБ 26.325

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

ГЕОЛОГИЯ, ГЕНЕЗИС И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КВАРЦА

Составитель Мельников Евгений Павлович

Заведующий редакцией *Р. В. Добровольская*

Редакторы издательства *М. Д. Мирзоева, Е. К. Семилеткова*

Переплет художника *А. Е. Григорьева*

Художественный редактор *Г. Н. Юрчевская*

Технические редакторы *В. Ю. Любимова, Г. В. Лехова*

Корректор *К. И. Савенкова*

ОИБ 7763

Сдано в набор 27.10.87. Подписано в печать 12.02.88. Т-02056. Формат 60×90/16.
Бумага типографская № 1. Гарнитура Литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 13,5.
Усл. кр.-отт. 13,5. Уч.-изд. л. 15,41. Тираж 500 экз. Заказ 580/12755—1. Цена 1 р. 30 к.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра»,
125047 Москва, пл. Белорусского вокзала, 3
Ленинградская картографическая фабрика ВСЕГЕИ

© ВНИИСИМС, 1988

ПРЕДИСЛОВИЕ

В книге приводится теоретическое обоснование и решение научной и народнохозяйственной проблемы — установление метаморфогенного происхождения и закономерностей размещения впервые выделяемых формаций силектитов и монокварцевых метаморфитов, представляющих основу минерально-сырьевой базы СССР по производству плавленного кремнезема и оптического стекла. Обобщены отечественные и зарубежные данные в области учения о генезисе, закономерностях размещения кварцевых месторождений и промышленном использовании кварца различного качества. Установлено, что в качестве основного минерального сырья для получения плавленного кремнезема может быть использован кварц месторождений, испытавших наложенные метаморфические или диафорические изменения (грануляцию, хрусталеобразование, рекристаллизацию и др.), выполняющие роль своеобразного природного технологического процесса обогащения кварца, сопровождающиеся коренными структурными преобразованиями индивидов и их очищением от минеральных, газово-жидких и элементных примесей.

Определены главные закономерности размещения месторождений кварца различного генезиса (гранулированного, рекристаллизованного, хрусталеносного, силекситового), на основе которых определены факторы их локализации, поисковые, оценочные критерии и рекомендации по дальнейшему рациональному направлению геологоразведочных работ на кварц для получения специального плавленного кремнезема, многокомпонентного оптического стекла, ферросплавов, синтеза монокристаллов и других целей. Разработаны геолого-промышленная и отраслевая промышленно-технологическая классификации кварцевого сырья, открывающие возможность проведения научно обоснованных прогнозно-поисковых работ на природный кварц с заданными свойствами в конкретных регионах с определенным геологическим строением и директивного распределения кварцевых концентратов по областям применения в зависимости от их качества и технических требований различных отраслей промышленности.

Материал книги основан на 25-летних исследованиях пегматитовых, силекситовых и кварцево-жильных месторождений различного генезиса, а также опробовании месторождений хрусталеносных пегматитов Украины, хрусталеносных и нехрусталеносных кварцевых жил Приполярного Урала, Якутии, силекситов и кварцевых жил Казахстана, гранулированного кварца Прибайкалья, Забайкалья и некоторых других регионов. Кроме того, использованы материалы специализированных исследований кварцевых объектов Урала объединения «Уралкварцсамоцветы» Мингео СССР и данные по месторождениям кварцевого сырья других регионов СССР и мира в целом.

В процессе обработки полевых наблюдений изучено более 3000 шлифов, 329 специальных полированных кварцевых пластин, сделано 215 полных химических анализов пород и минералов (из них 200 оригинальных), 2507 спектрохимических анализов монофракций кварца, 1366 спектральных анализов, а также значительное количество определений абсолютного возраста, минералогических, рентгеноструктурных, фотоэлектрокалориметрических, масс-спектрометрических, ИК-спектроскопических, нейтронно-активационных, электронно-микроскопических, декрепитационных и некоторых других видов исследований свойств и качества кварца. Химические, спектральные, рентгеноструктурные анализы и определения абсолютного возраста выполнялись в Центральной лаборатории объединения «Уралгеология», масс-спектрометрия кварца проводилась в лаборатории химического факультета МГУ на ответственном масс-спектрометре МИ-1311, спектрохимический анализ на приборе ИСП-30 по методике, разработанной ГИРЕДМЕТ, фотопламенный анализ на фотометре ФПМ, определение светопропускания на фотоэлектрокалориметре ФЭК-56 и минералогический анализ проводились в лаборатории Центрально-Уральской геологоразведочной экспедиции объединения «Уралкварцсамоцветы», ИК-спектроскопические, нейтронно-активационные, электронно-микроскопические исследования, определения отношения H_2O/CO_2 и другие специальные анализы кварца выполнялись в Институте геологии Башкирского филиала АН СССР и в Свердловском горном институте по методикам, описанным Г. Н. Вертушковым с сотрудниками, С. Ш. Юсуповым и др. Статистическая обработка полученных данных проведена с использованием ЭВМ ЕС-1022 в информационно-вычислительном центре объединения «Уралгеология».

В период выполнения исследований и подготовки книги большая помощь и поддержка были получены от геологов объединений «Уралкварцсамоцветы» и «Союзкварцсамоцветы» Мингео СССР, сотрудников ВНИИСИМС и Свердловского горного института. Отдельные положения исследований обсуждались с Ю. Н. Ануфриевым, Б. А. Дороговиным, Г. А. Кейльманом, А. С. Никаноровым, Ю. М. Соколовым, Н. И. Мельниковой, Г. А. Страшненко, С. Ш. Юсуповым. В оформлении работы приняли участие Т. П. Орешкова, Л. Л. Юркова и А. М. Пахнута.

СОКРАЩЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В КНИГЕ

Акт — актинолит	Кор — корунд
Ал — альбит	Корд — кордиерит
Альм — альмандин	Кпш — калиевый полево-
Анд — андрадит	шпат
Ант — антофиллит	Лав — лавсонит
Би — биотит	МС — минералы-спутники
ГЖВ — газовой-жидкие вклю-	Мус — мусковит
чения	Омф — омфациит
Гип — гиперстен	Пар — парагонит
Гл — глаукофан	Пл — плагиоклаз
ГЛВ — глобулярные включе-	Пф — пиррофиллит
ния	Рог — роговая обманка
Гр — гранат	Рп — ромбический пироксен
Ди — диопсид	Рут — рутил
Дист — дистен	Сер — серицит
Дол — доломит	Сил — силлиманит
Жад — жадеит	Ст — ставролит
Жед — жедрит	Топ — топаз
Ка — кальцит	Тур — турмалин
Кв — кварц	Хл — хлорит
Ки — кианит	Цо — цоизит
Кл — каолинит	Энст — энстатит
Клц — клиноцоизит	Эп — эпидот

ал — алаунит

Гр — гранит

к

ВВЕДЕНИЕ

Мировое производство кварцевого сырья оценивается в первые десятки миллионов тонн в год. Большую часть его составляют обогащенные кварцевые пески. Главные потребители сырья — стекольная и литейная промышленность [47]. Кварцевое сырье эндогенного происхождения (блоковый пегматитовый, силекситовый кварц, кварц гидротермальных кварцевых жил и др.) широко используется различными отраслями промышленности: для плавки прозрачного и непрозрачного кварцевого стекла, при изготовлении многокомпонентного оптического стекла, хрусталя, тонкой керамики, специальных фильтров, для синтеза монокристаллов кварца, в качестве флюсов, динаса, строительного, абразивного материала, в производстве карбида кремния, ферросилиция, силуминов, в сельском хозяйстве и в других областях промышленности, науки и техники. Для комплексного изучения, опробования и использования кварцевого сырья разведываемых и эксплуатируемых месторождений необходимо знание основных технических требований к кварцевому сырью различного назначения.

Кварцевые метаморфиты — кварцевые тела метаморфогенного происхождения, а термин «силектиты» (silix — кремень) предлагается для определения преимущественно кварцевых (с содержанием кварца от 60 до 96 % объема тела) неполнозональных или азональных пегматитов метаморфогенного происхождения. Для них применение известных терминов «силексит» или «кварцолит» искажает их генезис и отражает постмагматическое происхождение кварцпегматитовых образований.

Кварц ранних кварцевых жил, пегматитов и силекситов постмагматического и ортометаморфического классов, претерпевший более поздние наложенные гидротермальные изменения в условиях от грейзеновой до аргиллизитовой метасоматических формаций (при температуре 500—100 °С, давлении 100—120 МПа, высоком содержании летучих компонентов, в том числе F, Cl, CO₂ и др.), выразившееся в перекристаллизации исходных индивидов с образованием гигантозернистой структуры (размер индивидов обычно составляет десятки сантиметров) с освобождением их от газо-жидких включений (осветлении) с возрастанием коэффициента светопропускания до 80—99 %, выщелачивании и роста кристаллов горного хрусталя в образовавшихся пустотах (камерах, мнуролах, гнездах, занорышах) называется хрусталеносным кварцем.

Термины рекристаллизованный и гранулированный кварц используются в следующих случаях. Наиболее полно и детально рекристаллизация изучена и описана И. С. Делициным, выделяющим первичную, собирательную и вторичную рекристаллизацию. Первичная рекристаллизация заключается в смене исходной деформационной структуры новой гранобластовой структурой, равновесной

в данных термодинамических условиях. В процессе первичной рекристаллизации исходный деформированный материал, обладающий повышенным уровнем энергии упругих напряжений, замещается агрегатом новых равновеликих всегда более мелких зерен, свободных от напряжений. Кварц такой мелкозернистой (0,05—1,0 мм) структуры мы и называем «рекристаллизованным».

Собирательная рекристаллизация, по И. С. Делицину, проявляется в укрупнении отдельных зерен новообразованной структуры с возникновением более крупнозернистой гранобластовой структуры, обусловленной ростом зерен кварца в твердом состоянии. В основе ее также лежит изменение упругой энергии индивидов гранобластовой структуры агрегата в сторону устойчивого состояния. Отличительная особенность процесса: пропорциональное увеличение размеров одних зерен и уменьшение других строго координировано. Явление носит различные названия: перекристаллизация с укрупнением зерен, собирательная рекристаллизация, бластез, вторичный рост зерен и др.

Геологическое и структурно-минералогическое изучение глубоко метаморфизованных комплексов, вмещающих месторождения гранулированного кварца, свидетельствует о том, что собирательная рекристаллизация может не только следовать за первичной рекристаллизацией, но и предваряться α - β -инверсией кварца в процессе полиметаморфических превращений с образованием сотовых структур, которые в дальнейшем испытывают укрупнение зерен возникшей гранобластовой структуры. По нашему мнению, такой процесс более отвечает ранее использовавшемуся понятию «бластез», или «перекристаллизация», поскольку здесь наблюдается увеличение размера зерен, а не их уменьшение, что характерно для процесса рекристаллизации, следующей за предварительной деформацией и уменьшающей уровень энергии упругих напряжений.

Кварц гранобластовый мелкозернистой (1—2 мм) структуры, возникающей в результате собирательной рекристаллизации (бластеза — *Е.М.*), и называется нами «гранулированными», в отличие от ранее охарактеризованного «рекристаллизованного», возникающего с участием иных процессов.

Что касается вторичной рекристаллизации (по определению И. С. Делицина), то она может носить различный характер (и типа рекристаллизации, и типа перекристаллизации), в зависимости от характера изменившихся внешних условий.

Кратко технические требования к кварцевому сырью сводятся к следующему [35, 39].

1. В кварцевом сырье для флюсов, динаса, абразивов, стройматериалов, сельского хозяйства, фильтров, ферросплавов содержание кремнезема должно быть не ниже 94—98 %, а окислов Al, Fe, Ca, Ti от 0,1—0,5 до 2—3 % по отдельным элементам. Большинство даже небогатых разновидностей эндогенного кварцевого сырья отвечает данным требованиям.

2. В кварцевом сырье, используемом для производства многокомпонентных оптических стекол, непрозрачного кварцевого стекла, металлического кремния, карбида кремния, тонкой керамики, хрусталя, синтеза монокристаллов, содержание SiO_2 должно составлять 98—99,5 %. Вредными примесями являются обычно окрашивающие элементы — Fe, Mn, Cr, Ti, V, Ni, Cu. Массовое содержание (в %) каждого из указанных элементов не должно превышать $1 \cdot 10^{-2}$ — $1 \cdot 10^{-6}$ %. Другие элементы допускаются в больших количествах, чем обычное их содержание в эндогенных разновидностях кварца. Не ухудшает качества сырья и не лимитируется содержание газовой-жидких включений.

3. Наиболее жесткие технические требования предъявляются к кварцу, применяемому для получения прозрачного кварцевого стекла (плавленого кремнезема). Содержание SiO_2 в исходном кварцевом сырье не должно быть ниже 99,98 %, а отдельных элементов не более (%): железо $2 - 40 \cdot 10^{-4}$, алюминий $30 \cdot 10^{-4}$, титан $3 \cdot 10^{-4}$, магний $3 - 7 \cdot 10^{-4}$, кальций $3 - 10 \cdot 10^{-4}$, марганец $6 \cdot 10^{-5}$, натрий $10 - 50 \cdot 10^{-4}$, калий $10 - 50 \cdot 10^{-4}$. Суммарное содержание указанных примесей в кварце свыше $8 \cdot 10^{-3}$ % не допускается. Сумма твердых минеральных примесей, создающих стекловидные включения, не может быть более $1 \cdot 10^{-3}$ %, а количество твердых минеральных примесей, создающих окрашенные включения, должно составлять не более 10 знаков на 1 кг обогащенного концентрата. Светопропускание зерен кварца — не менее 45—60 %.

4. В пьезооптическом кварце, обладающем свойствами, обуславливающими его применение в пьезотехнике и производстве измерительных и оптических приборов, не допускается или лимитируется наличие твердых и газовой-жидких включений, трещин, свищей, бразильских и дофинеиских двойников, а также устанавливаются величина и выход монообластей, не содержащих указанных дефектов.

Обеспечение промышленности по производству плавленого кремнезема высококачественным сырьем представляет наиболее сложную задачу из-за больших потребностей и высоких требований к исходному сырью. Поэтому главное внимание в книге уделено источникам кварцевого сырья, пригодного для плавки прозрачного кварцевого и варки многокомпонентного оптического стекла как наиболее дефицитных по объемам и качеству используемого кварца.

С учетом приведенных технических требований к кварцевому сырью различного назначения нами предлагается вариант его отраслевой промышленно-технологической классификации (табл. 1).

В разработанной классификации высококремнеземистого сырья выделяется четыре крупных класса кварца, принципиально отличающихся по использованию в промышленности. Это пьезокварц (от греч. *πυζω* — «пьезо» — сжимать, давить) — традиционный термин, применяющийся для обозначения обширного и важного класса кварца, представленного кристаллами горного хрусталя, обладающими пьезооптическими свойствами; тикокварц

(от греч. τήνω — плавить) — термин, предлагаемый для наименования класса кварца с содержанием SiO_2 не ниже 99,98 % и пригодного для плавки прозрачного кварцевого стекла (чистого плавного кремнезема), изделия из которого используются в космонавтике, авиации, лазерной, ракетной, атомной технике, электронной, химической и светотехнической промышленности; потребление промышленностью кварцевого сырья для этих целей значительно возросло в СССР и за рубежом за последние 20 лет и все еще далеко от полного удовлетворения; хонэ кварц (от греч. χώνευω — варить, варка) — термин, вводимый для обозначения класса кварцевого сырья, пригодного для создания силикатной основы (от 20 до 74 %) при варке многокомпонентного (с добавлением окислов Al, Mg, W, Zn и др.) оптического стекла, хрусталя, синтеза монокристаллов, находящихся применение в астрономии, приборостроении, медицине и других областях; этерокварц (от греч. ετερογενής — разнородный) — термин, предлагаемый для наименования широкого класса высококремнеземистого сырья с относительно низкими качественными показателями, находящего применение при получении ферросплавов, флюсов, динаса, фильтров, абразивов, карбида кремния и других, использующихся в самых различных областях народного хозяйства.

В зависимости от технологических свойств кварцевого сырья внутри каждого класса выделяются разряды с определенными геолого-промышленными типами, располагающиеся по мере изменения основных показателей качества — коэффициента светопропускания и суммы элементов-примесей.

Таблица 1
Отраслевая промышленно-технологическая классификация кварцевого сырья

Разряд	Геолого-промышленный тип	Тип кварцевого сырья	Качественная характеристика обогащенного сырья		Вид продукции	Область применения
			Светопроницаемость, %	Содержание элементов-примесей $n \cdot 10^{-4} \%$		
Пьезокварц						
I	Горный хрусталь метаморфенных и постмагматических гидротермальных кварцевых жил и зон Бразилии, Мадагаскара, Урала, Якутии	Кристаллы горного хрусталя, штрина, раухтопаза	73—100	3—5	Пьезорезонаторы, стабилизаторы радионагтов, фильтры телеграфирования, пьезоэлектрические микрофоны и др.	Радиотехника, гидроакустика, дефектоскопия, пьезометрия
II	Горный хрусталь пегматитовых жил Бразилии, США, Украины, Казахстана, МНР	Кристаллы морюна, раухтопаза, горного хрусталя	12—100	8—12		
Тикокварц						
I	Горный хрусталь, околослюдовый перекристаллизованный и первичнопрозрачный кварц гидротермальных и пегматитовых жил Бразилии, Анголы, Мадагаскара, КНР, СССР	Дефектные (грещиноватые, свилеватые, мозаичные и т. п.) кристаллы горного хрусталя, околослюдовый перекристаллизованный и первичнопрозрачный жильный кварц	70—100	30—160	Кварцевое оптическое, прозрачное кварцевое и легированное стекло и электронная техника	Космонавтика, авиация, лазерная, атомная техника, электронная, химическая промышленность, светотехника и др.

Искусственные монокристаллы	Монокристаллы	98—100	12—120	Оптическое и особо чистое кварцевое стекло
Синтетические двуокись и тетрагидрид кремния	Аморфный кремнезем	5—30	0,1—1	Особо чистое кварцевое стекло
II Метаморфизованный кварц метаморфогенно-гидротермальных жил Урала, Енисейского кряжа, Прибайкалья	Гранулированный кварц	50—70	60—150	Прозрачное кварцевое техническое легированное стекло, электронная техника
III Метаморфизованный кварц метаморфогенных слюдоносных пегматитовых и силектитовых жил Урала, Прибайкалья	Гранулированный кварц	60—80	180—230	
IV Первично прозрачный кварц редкометаллических и керамических пегматитов Финляндии, Швеции, ФРГ, СССР	Ядерный и блоковый стекловидный кварц	34—55	220—510	Прозрачное кварцевое техническое легированное стекло
Первично прозрачный кварц силекситов Урала	Ядерный и блоковый стекловидный кварц	40—57	210—300	
Первично прозрачный кварц метаморфогенно-гидротермальных жил Урала	Фрагментарный стекловидный кварц	36—82	30—100	

Разряд	Геолого-промышленный тип	Тип кварцевого сырья	Качественная характеристика обогащенного сырья		Вид продукции	Область применения
			Светопропускание, %	Содержание элементов-примесей $n \cdot 10^{-3}$ %		
Хонэ кварц						
I	Кварц метаморфогенных и постмагматических безрудных кварцевых жил Урала, Казахстана, Алтай	Первично кристаллизованный молочно-белый кварц	10—20	80—260	Оптическое многокомпонентное стекло, шихта для синтеза монокристаллов, получения хрусталя, ферросплавов	Астрономия, приборостроение, медицина, сельское хозяйство и др.
		Рекристаллизованный кварц	15—35	60—180		
II	Силекситовый кварц Урала	Кристаллизованный молочно-белый кварц	20—35	250—350	То же	
III	Кварц прибрежно-морских россыпей СССР, ПНР, ГДР, ФРГ, Дании, Франции	Песок	3—8	10 000—20 000	Оптическое многокомпонентное стекло	

Этерокварц

I	Кварц безрудных пост-магматически гидротермальных кварцевых жил Казахстана, Ср. Азии, Урала	Первично кристаллизованный кварц	10—15	300—600	Хрусталь, тонкая керамика и др.	Стекольная, керамическая, металлургическая, огнеупорная, химическая, электротехническая промышленность
II	Кварц кварцитов Казахстана, Армении, Урала, Украины	Кварцит	5—13	600—1 000	Ферросплавы, флюс, диоксид кремния, непрозрачное кварцевое стекло	
III	Кварц песчаников ГДР, ПНР	Песчаник	3—10	5 000—15 000	Хрусталь, непрозрачное кварцевое стекло	
	Кварц прибрежно-морских россыпей СССР, Голландии, ФРГ	Песок	0—5	15 000—22 000	Хрусталь, непрозрачное кварцевое стекло	

ИСТОРИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРЕМНЕЗЕМА

Кремнезем в различных его формах используется человеком с древнейших времен. К наиболее раннему периоду можно отнести открытие еще в каменном веке на Урале в эпоху среднего палеолита месторождений яшм и горного хрусталя. В неолите кремнь, горный хрусталь, яшма, кварц использовались в виде скребков, отщепов, ножей, игл, наконечников стрел, украшений. Об этом свидетельствуют, в частности, археологические находки при раскопках Чудских могильников в Предуралье, неолитических стоянок IX—III тыс. до н. э. на озерах Чебаркуль, Еловое, Зюраткуль (Южный Урал), захоронений Средней Азии, Ближнего Востока, Китая, Индии, Египта и других очагов древних цивилизаций. Интересно в этом отношении стоянка первобытного человека Малые Учалы (IV тыс. до н. э.), где были найдены орудия из яшмы, кремня и даже из горного хрусталя и топаза. Из таких минералов орудия делались редко. По описанию Г. Н. Матюшина, особенно красивы были нуклеусы из горного хрусталя. Нуклеус — это ядрище, с которого скалывались тонкие узкие пластинки — ножички. Обнаруженные нуклеусы были настолько малы по своим размерам — не толще авторучки, что вряд ли имели только хозяйственное значение. Скорее всего, хрустальные нуклеусы имели также эстетическую, чисто художественную или ритуальную ценность.

На европейском севере СССР в Карелии исследованы памятники XII—X тыс. до н. э., где существовала культура с кварцевым, а позднее с кварцево-сланцевым инвентарем. Бельгийские археологи обнаружили в Египте в 50 км к югу от г. Асьют полуразрушенные рудники по добыче кремня. Проведя изотопный анализ, ученые установили, что возраст этих горных выработок составляет 33 тыс. лет. Руководитель экспедиции профессор Вермеер считает эти рудники самыми древними в мире. По данным М. Б. Штронга, разработки хрусталоносных жил в Египте датируются серединой IV тыс. до н. э. Бусы, ожерелья, кубки, талисманы и другие предметы быта, культа и туалета из агата, халцедона, сердолика и других разновидностей кремнезема обнаружены в гробницах Месопотамии (III тыс. до н. э.), захоронениях бикеров в Англии, фараонов в Египте (II тыс. до н. э.), ранних кочевников Нижнего Приуралья (I тыс. до н. э.) и в других регионах Европы, Азии и Северной Африки.

Следующий период в истории использования кремнезема связан с применением жильного кварца в качестве сырья для стекольной промышленности и флюса в металлургическом производстве в Германии, Швеции, России в XVI—XIX вв. Открытие же братьями Пьером и Жаком Кюри в 1880 г. явления пьезоэлектрического эффекта в кристаллах кварца знаменует собой начало третьего этапа практического использования кремнезема.

В XX столетии интенсивное использование кремнезема в виде кварца, агата, горного хрусталя еще более повысило его роль как важного, в том числе и стратегического сырья. В настоящее время кварц используется для производства резонаторов, стабилизаторов частоты и других пьезоизделий, при получении плавленого кремнезема, многокомпонентного оптического стекла, металлического кремния, карбида кремния, ферросплавов, тонкой керамики, хрусталя, дианаса, синтеза монокристаллов, в качестве флюсов, фильтров, декоративных материалов и в ювелирном деле.

Кварцевое стекло (плавленый кремнезем) представляет собой однокомпонентное силикатное стекло с содержанием SiO_2 99,99 %. Оно получается путем плавления чистых природных или искусственных кристаллических разновидностей кремнезема, синтетической аморфной двуокиси кремния, а также путем молекулярной конденсации из кремнийсодержащих соединений в газовом пламени или низкотемпературной плазме. Кварцевое стекло — незаменимый материал для оснащения искусственных спутников и космических кораблей, панорамного остекления реактивных самолетов, для изготовления носовых обтекателей ракет и управляемых снарядов, приборов ночного видения и оптических локаторов, систем перехвата и волоконно-оптической связи, интенсивных и специальных источников света, в конструкциях атомных, лазерных и радарных установок, в быстродействующих счетно-решающих устройствах и высокочастотных приборах электротехнической и электронной промышленности.

Из кварцевого стекла повышенной химической чистоты изготавливаются трубы и тигли, применяемые для выращивания монокристаллов германия, кремния и других полупроводниковых материалов. Особенно интенсивное развитие получило применение кварцевого стекла для изготовления генераторов кварцевых инфракрасных ламп накаливания и кварцевых ультрафиолетовых излучателей.

Производство оптического многокомпонентного силикатного стекла также базируется на природном кварцевом сырье, так как основу его составляет кремнезем от 20 до 74 %. Основными добавочными компонентами являются оксиды алюминия, цинка, мышьяка, магния. Многокомпонентное стекло кроме однородности должно иметь заданные оптические константы, высокие прозрачность и коррозионную устойчивость. Оно используется для изготовления оптических приборов различного назначения и для производства водородных, бактерицидных и эритемных ламп, применяющихся в медицине, сельском хозяйстве и многих других областях.

Области применения и объемы потребления кварцевого стекла постоянно расширяются. В связи с этим производство его развивается исключительно быстрыми темпами. Основные страны-производители прозрачного кварцевого стекла — это СССР, США, Япония, Великобритания, ФРГ, ЧССР, НРБ, Франция и др. По приближенным оценкам, мировое производство прозрачного кварцевого

го стекла составляет первые тысячи тонн в год, однако спрос на него полностью не удовлетворяется.

С момента зарождения производства прозрачного кварцевого стекла сырьем для его получения служили прозрачные кристаллы горного хрусталя. Все капиталистические страны используют в качестве сырья горный хрусталь уникальных бразильских месторождений. В отечественной промышленности до начала 60-х годов почти весь ассортимент изделий из кварцевого стекла производился из отходов пьезокварца.

Однако ни отечественные, ни даже мировые запасы горного хрусталя не обеспечивают в полной мере решение сырьевой проблемы производства прозрачного кварцевого стекла ни в количественном, ни в качественном отношении. Основу минерально-сырьевой базы производства плавленого кремнезема в настоящее время составляют новые источники природного и искусственного кремнезема, обладающие необходимыми свойствами и достаточными ресурсами. При поисках замены дефицитного горного хрусталя внимание геологов в первую очередь было обращено на жильный гигантозернистый кварц с прозрачными участками — так называемый стекловидный кварц. В 1957—1958 гг. на Урале начали разрабатываться месторождения такого типа, утратившие со временем свое значение. В 1973—1975 гг. установлена пригодность для плавки стекловидного кварца хрусталоносных и нехрусталоносных кварцевых жил Приполярного Урала. Получены положительные результаты по пригодности для плавки стекловидного кварца негематитового происхождения других регионов страны. Однако обстоятельствами, сдерживающими массовое использование его в промышленности, являются: рассредоточенность запасов среди большого количества мелких объектов, технологическая сложность выделения прозрачных участков из общей массы молочно-белого кварца и низкий выход кондиционных высокосортных концентратов. Исключение составляют месторождения силекситового кварца на Урале [32, 36] со значительными запасами прозрачного природного кварца, но с повышенным содержанием микропримесей, затрудняющим его использование.

Перекристаллизованный кварц хрусталоносных жил, возникающий в результате интенсивной наложенной гидротермальной переработки ранее образованного жильного кварца месторождений Казахстана и некоторых других объектов, близок по своим свойствам к низким сортам горного хрусталя. Он обладает как достоинствами горного хрусталя — достаточно высокой прозрачностью, низким содержанием минеральных примесей, так и недостатками — сложностью режима обогащения, нестабильностью плавки. Поэтому перекристаллизованный кварц используется и будет использоваться в дальнейшем промышленностью в определенных количествах наряду с горным хрусталем и стекловидным кварцем, но может рассматриваться только как вспомогательный источник сырья для плавки.

В этом отношении весьма характерным и показательным примером является открытие, а затем изучение, разведка месторождений и внедрение в сферу промышленного освоения нового вида минерального сырья — гранулированного кварца [14, 29, 21, 41].

При изучении геологии уральских метаморфических комплексов и месторождений гранулированного кварца [17, 26, 44] было установлено, что рудная специализация характеризуется преобладанием среди месторождений, связанных с их формированием, неметаллических полезных ископаемых, таких, как мусковит, клинит, антифиллит-асбест, графит, тальк, различные модификации кварца и т. д. Главным фактором, обуславливающим возникновение месторождений, в данном случае является не столько концентрация тех или иных компонентов, сколько выделение их в соответствующей минеральной или структурной форме. При этом промышленная ценность достаточно распространенных, в частности, породообразующих минералов определяется их специфическими физическими свойствами: размером кристаллов, чистотой кристаллической решетки и т. д., т. е. ведущая роль принадлежит не привнесу элементов, а термодинамическим условиям преобразования горных пород.

Удалось установить, что одна из разновидностей метаморфизованного кварца — гранулированный кварц по качеству практически не уступает горному хрусталу, а по некоторым параметрам превосходит его. С 1959 по 1971 гг. геологами объединения «Уралкварцсамоцветы» вместе с учеными Свердловского горного института, ГосНИИКСа и УралМЕХАНОБРа были проведены широкие научно-исследовательские, поисково-разведочные и эксплуатационно-технологические работы, завершившиеся открытием ряда крупных месторождений гранулированного кварца на Среднем и Южном Урале, подсчетом запасов, их опытно-промышленной эксплуатацией и поставками в значительных количествах обогащенных концентратов заводам-потребителям. Специальные исследования геологической позиции месторождений позволили установить условия образования и закономерности размещения гранулированного кварца [26, 29, 31]. Одновременно были разработаны поисковые и оценочные критерии для месторождений нового вида минерального сырья, применимые при прогнозировании и поисковых работах в других регионах страны.

Благодаря комплексу ценных физико-химических свойств кварца с течением времени увеличивался в мире объем производства и потребления кварцевого сырья различного назначения и расширялись области его использования — получение прозрачного, непрозрачного кварцевого, увиолевого, оптического монокомпонентного стекла, в целом кристаллического кварца и кварцитов (рис. 1). И только спрос на природный пьезооптический кварц в 70-х годах текущего столетия резко упал в связи с заменой его синтезированными кристаллами кварца из-за практически полной идентичности их свойств, большей технологичности в переработке и значительно меньшей стоимости.

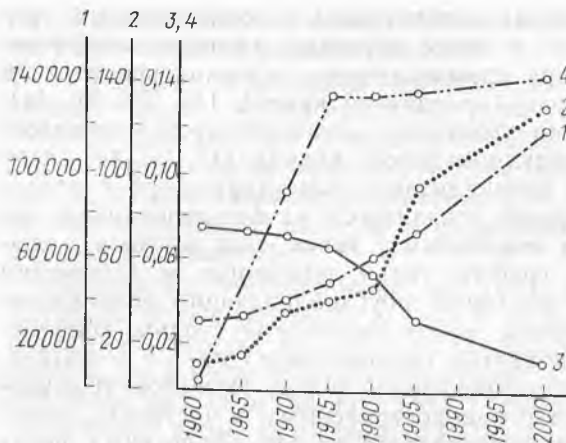


Рис. 1. Уровень производства различных видов кварцевого сырья в капиталистических странах. (Расчитано по материалам „Minerals Year-book“, „Sumario Mineral“, „Engineering and Mining Journal“, „Mineral Facts and Problems“.)

1 — кварц кристаллический и кварцит, млн. т; 2 — кварц типа «Ласка» (сырье для синтеза, получения кварцевого и оптического стекла, тыс. т); пьезокварц (в т); 3 — природный, 4 — искусственный; до 2000 г. — прогноз

Данные по применению кварцевого сырья в зарубежных странах свидетельствуют также о том, что проблема обеспечения промышленности сырьем для производства прозрачного кварцевого стекла (искусственного аналога лешатерьерита) решается главным образом за счет применения синтетических монокристаллов и в меньшей мере использованием некондиционных кристаллов горного хрусталя и высокопрозрачного жильного кварца.

ГЛАВНЕЙШИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ ПРИРОДНЫХ КВАРЦЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

ОБЩАЯ СХЕМА СИСТЕМАТИКИ

Несмотря на длительный период использования и изучения кварца, единая общепринятая генетическая классификация его природных образований отсутствует.

Предлагаемая систематика хрустале- и кварцосодержащих формаций разработана с учетом известных классификаций месторождений полезных ископаемых [1, 3, 19, 33—35, 37, 42]. В основу классификации положены следующие принципы: а) генетическая принадлежность, геологические и термодинамические условия формирования полезного ископаемого, б) вещественный состав продуктивных тел, в) формации, субформации и минеральные типы существенно кварцевых и монокварцевых образований, г) характер процессов диафореза первичных формаций кварца, д) естественная последовательность образования выделенных формаций кварцевого сырья.

В соответствии с изложенными классификационными признаками природные высококремнеземистые образования делятся на две серии — экзогенную и эндогенную. Экзогенная серия состоит из

двух групп (осадочной и выветривания), представленных двумя классами (механического накопления, химического и физического выветривания) и тремя генетическими типами (эрозионно-осадочным, эрозионно-остаточным и инфильтрационным) с соответствующими формациями. Существенно кварцевые и монокварцевые образования эндогенной серии подразделяются на две группы — магматогенную, метаморфогенную, три класса — постмагматический, ортометаморфический, параметаморфический — и пять генетических типов — пегматитовый, пневматолито-гидротермальный, метаморфогенно-пегматитовый, метаморфогенно-гидротермальный, метаморфогенно-осадочный — с составляющими их первичными рудными (кварцевыми) и производными от них вторичными (метаморфизованными или диафторированными) формациями (табл. 2).

Главными особенностями предлагаемой классификации являются: определение позиции и значительной промышленной роли метаморфогенных кварцевых тел, выделение в метаморфогенной группе в качестве самостоятельной формации важных в генетическом и практическом отношении силектитов (неполнозональных или азональных, преимущественно кварцевых, пегматитов) и кварцевых метаморфитов, (кварцевых тел метаморфогенного происхождения) и, наконец, введение понятия и, соответственно, классификационного подразделения — диафторированные первичные формации кварца этапа тектоно-метаморфической активизации.

Рассматриваемая классификация не отражает всего теоретически возможного набора формаций, субформаций и минеральных типов некоторых генетических типов кварцевых образований. Учитывая ее основную особенность — отраслевую систематику эндогенных кварцевых обособлений, в классификации не отражены формации некоторых генетических типов, в которых кварц находится в виде аксессуарного, породообразующего минерала или вообще отсутствует.

Названия формаций и субформаций в общем составлены согласно предложению Д. В. Рундквиста из наименования типоморфных минералов руд (кварца) и типа гидротермально измененных пород, принадлежащих соответствующим формациям метасоматитов (аргиллизитовой, березитовой и джаспероидной) или выраженных через определенный тип изменений (опалитизацию, серицитизацию, альбитизацию, грануляцию, рекристаллизацию). В соответствии с установившейся традицией гидротермальные изменения, сопровождающие постмагматические кварцевые образования, указаны на формационном уровне (пропилитовая, вторичнокварцевая, грейзеновая формации), а для кварцевых образований метаморфогенного генезиса — на уровне минеральных парагенезисов (глаукофан-зеленосланцевая, дистен-эклогит-сланцевая и т. п.).

В табл. 2 представлены, но не рассматриваются детально из-за их малого значения для получения прозрачного кварцевого и многокомпонентного оптического стекла преимущественно кварцевые метапсаммолиты, возникающие в результате перекристаллизации и цементации песков под действием регионального метаморфизма

Таблица 2
Главнейшие генетические и промышленные типы природных кварцевых образований

Серия	Группа	Класс	Генетический тип	Хрустале- и кварц-содержащие и хрустале-кварцевые формации	Генотипы месторождений	Классы кварцевого сырья, исходных формаций	Примеры	Классы кварцевого сырья, лафторформанных формаций	Генотипы месторождений кварца
Эндогенная	Магматогенная	I. Постмагматический	I.A Пегматитовый	I.A.1 Редкометалльно-пегматитовая	Темелла (Финляндия); Хандорф (ФРГ); Волжина (Австралия); Викита (Зимбабве)	ХОНЭКВАРЦ Тикокварц	I.A.1 (Г) I.A.1 (X)	Тикокварц ПЬЕЗО-КВАРЦ	Лас-Талиас (Аргентина); Мугоджары (СССР) Серидозинью (Бразилия)
					Украина, Казахстан (СССР) <i>Вольск Каракол</i>	ПЬЕЗО-КВАРЦ	I.A.2 (X) I.A.3 (X)	ПЬЕЗО-КВАРЦ Пьезо-кварц	Эспирито-Санта (Бразилия) Баян-Обо (МНР)
					Урал, Казахстан (СССР) <i>Свердловск Караб</i>	ЭТЭРО-КВАРЦ. ХОНЭКВАРЦ. Тикокварц	I.A.3 (Д) I.A.3 (X)	ЭТЭРО-КВАРЦ. ХОНЭКВАРЦ Пьезо-кварц	Урал (СССР); Кассонги (Ангола) Баян-Обо (МНР)
	I.B.1	Кварцевая апоскарновая	I.B Пневматолитогидротермальный	I.B.1 Кварцевая апоскарновая	Трещя (СФРЮ) Азегур (Марокко)	—	I.B.1 (X)	Тикокварц, ПЬЕЗО-КВАРЦ	Кинг-Айленд (Австралия); Янзяолин (КНР)

1.Б.2 Кварцево-апогрейзеновая	Авока, Ардлетан, Плаймер Ривер (Австралия)	—	1.Б.2 (X)	Тикокварц, ПЬЕЗО-КВАРЦ	Кингстойт, Вольфрам-Кэмл, Петфорд (Австралия)
1.Б.3 Кварцево-полевошпатная	Базарчи, Казахстан (СССР)	Эгэро-кварц	1.Б.3 (X)	Тикокварц, ПЬЕЗО-КВАРЦ	Урал, Тянь-Шань (СССР) Нобельград
1.Б.4 Вторично-кварцитовая	Коунрад, Семи-Бугу (СССР)	Эгэро-кварц	1.Б.4 (X)	Пьезо-кварц	Урал, Казахстан (СССР) Суровый
1.Б.5 Кварцево-пропитовая	Оруро (Боливия); Крип-Крик (США)	—	1.Б.5 (X)	Пьезо-кварц	Льяльгута (Боливия); Хаканджин (СССР)
1.Б.6 Кварцево-березитовая	Алтай (СССР) Джуно (США)	ЭТЭРО-КВАРЦ ХОНЭКВАРЦ	1.Б.6 (P) 1.Б.6 (X)	Тикокварц Пьезо-кварц	Урал, Якутия (СССР) Урал (СССР) Березит
1.Б.7 Кварцево-аргиллитовая	Вагха, Шайтан (СССР)	—	1.Б.7 (X)	ПЬЕЗО-КВАРЦ	Тальян (СССР); Каразинью (Бразилия)
1.Б.8 Джасперовидная	Хайларкан (СССР) Ваншань (КНР); Карлин (США)	—	—	—	—

Серия	Группа	Класс	Генетический тип	Хрустале- и кварц-содержащие и хрустале-кварцевые формации	Генотипы месторождений	Классы кварцевого сырья исходных формаций	Примеры	Классы кварцевого сырья афторированных формаций	Генотипы месторождений кварца
Экзогенная	Осадочная	IV. Механического накопления	IV. А. Эрозивно-осадочный	IV.A.2 Формационный ряд пролювиально-аллювиальных (ложков, речных) россыпей	Моржелун-Хилл (США) Эспириту-Санту (Бразилия)	ЭТЭРО-КВАРЦ	—	—	—
Выветривания	V. Физического и физиоветривания	V. А. Физического и физиоветривания	V. Б. Инфильтрационный	V. Б.1 Формационный ряд инфильтратов кварца (амегист, опал, хризопраз)—хальцедонового замещения и выполения	Сарыкулболды, Магнитогорское (СССР) Тинтанбара, Кубер-Педи, Уайт-Клифс, Марлборо-Крик (Австралия), Никель-Маунтин (США)	ЭТЭРО-КВАРЦ	—	—	—

Примечание. Классы кварцевого сырья по областям использования (графы 7 и 9): пьезокварц — кристаллы горного хрусталя, пригодные для получения пьезопластин; тикокварц — кристаллы горного хрусталя, блоковый, жильный перекристаллизованный и гранулированный кварц, использующийся для получения плавящего кремнезема; хоникварц — жильный, блоковый исходный или рекристаллизованный кварц, применяющийся для получения многокомпонентного, узкофлюидного, оптического стекла, хрусталя, синтеза монокристаллов; этрокварц — сырье для флюосов, динаса, фильтров и пр. Прописными буквами выделены промышленные типы кварцевого сырья. Метаморфизованные и афторированные формации образования (графа 8): Г — грануляция; Д — дислокация (разлиствование); Р — рекристаллизация; Х — хрусталообразование; П — перекристаллизация.

и представленные кварцитами и песчаниками. Основной их потребитель — металлургическая промышленность.

По этой же причине не характеризуются подробно в книге отраженные в систематике кварцевые образования экзогенной серии, включающие различные по происхождению и неравноценные по масштабам группы проявлений. Кварцевые пески прибрежно-морских россыпей используются главным образом литейной и стекольной промышленностью. Среди обособлений, связанных с процессами выветривания, следует отметить опал-халцедоновые (месторождения Тинтанбара, Кубер-Педи в Австралии), хризопраз-халцедоновые (месторождения Сарыкулболды — СССР, Никель-Маунтин — США) и кварц (аметист)-халцедоновые (месторождения Магнитогорское — СССР, Рюген — ГДР) конкреции и прожилки выполнения и замещения. Остаточные образования состоят из элювиально-делювиальных россыпей горного хрусталя и жильного кварца (месторождения СССР, Сьерра-де-Лагрина, Комекас-де-Мейо — Бразилия). Кремнистые обособления незначительны по масштабам и используются обычно из-за своих оригинальных декоративных свойств в качестве поделочных камней в камнерезном производстве. Концентрация кварцевого материала в элювиально-делювиальных и пролювиально-аллювиальных россыпях также не достигает больших размеров и в настоящее время они утратили свое практическое значение.

ПОСТМАГМАТИЧЕСКИЙ КЛАСС МАГМАТОГЕННОЙ ГРУППЫ

В составе постмагматического класса выделяются два генетических типа: пегматитовый и пневматолито-гидротермальный.

Пегматитовый генетический тип. К этому генетическому типу в соответствии с общепринятыми представлениями отнесены редкометальные и хрусталеносные пегматиты, а также силекситы [22, 36], однако не рассматриваются редкоземельные и керамические пегматиты как не содержащие промышленных скоплений кварца. Пегматиты в настоящее время служат источником горного хрусталя (хрусталеносные пегматиты), кварца для флюсов, ферросплавов, фильтров, оптического стекловарения (силекситы и редкометальные пегматиты). Значение последних формаций будет возрастать в связи с крупными размерами месторождений и перспективностью слагающего их стекловидного ядерного кварца в качестве сырья для плавки прозрачного и непрозрачного кварцевого стекла. Наибольшей перспективностью, судя по объему монокварцевых обособлений, среди редкометальных пегматитов обладают сподумен (берилл)-кварц-альбитовая (Сенсекуру в Мали, Лаюри в Канаде, Моно в США), сподумен (лепидолит)-микроклин-кварц-альбитовая субформации (месторождения Бикита в Зимбабве, Кобо-Кобо в Заире, Сан-Жуан-Дел-Рей в Бразилии) и биотит-микроклин-кварцевая субформация силекситов (Среднеуральские и другие месторождения в СССР, месторождение Сент Поль ля Рош во Франции), а как источник горного хрусталя — топаз (берилл)-мо-

рион-альбит-кварц-микрклиновая субформация хрусталеносных пегматитов (месторождения Махазома на Мадагаскаре, Сети-Лагоас в Бразилии и др.).

Метаморфизм пегматитов и силекситов представлен разлитованием кварца (месторождения Урала в СССР, Кассонги в Анголе), грануляцией кварца (месторождения в Мугоджарах в СССР, Сахатани на Мадагаскаре, Лас-Тапиас в Аргентине) кварца и наложенным хрусталеобразованием (месторождения Эспирито-Санта в Бразилии). В связи с этим редкометалльные пегматиты могут учитываться и как возможные объекты добычи гранулированного кварца.

Пневматолито-гидротермальный генетический тип включает кварцевые образования, объединенные участием в их формировании пневматолито-гидротермальных постмагматических растворов и состоит из восьми формаций (кварцево-апоскарниовой, кварцево-апогрейзеновой, полевошпато-кварцевой, вторично кварцевой, пропиолито-кварцевой, аргиллизито-кварцевой, джаспероидной и березито-кварцевой). Другие метасоматиты не образуют промышленных скоплений кварца во внутренних частях метасоматических колонок и не сопровождают значительные по размерам кварцевые тела. Из всего многообразия кварцевых обособлений пневматолито-гидротермального типа практический интерес могут представлять апокарнио-кварцевые и апогрейзено-кварцевые тела как объекты попутной добычи пьезокварца и друз горного хрусталя (месторождения Янзюолин и Пинканлин в КНР, Плаймер Ривер, Вольфрам Кэмп и Петфорд в Австралии), аргиллизито-кварцевые тела как источники аметиста и агата (месторождения Урала в СССР, Мвакамбико в Зимбабве, Каразинью в Бразилии) и березито-кварцевые жилы как крупные и даже уникальные месторождения кварца, пригодного для производства хрусталя, непрозрачного кварцевого стекла, ферросплавов, тонкой керамики, фиолетовых стекол и других целей (Керр-Эдиссон в Канаде, Материнская жила, Мазер-Лод, Гресс Вэлли, Джуно в США).

ОРТОМЕТАМОРФИЧЕСКИЙ КЛАСС МЕТАМОРФОГЕННОЙ ГРУППЫ

Класс состоит из двух генетических типов: метаморфогенно-пегматитового и метаморфогенно-гидротермального.

Метаморфогенно-пегматитовый генетический тип подразделяется на две формации: слюдоносно-пегматитовую и впервые выделяемую силектитовую. Исходная точка зрения П. Эскола о связи пегматитообразования с процессами ультраметаморфизма поддерживается рядом исследователей. В отношении слюдоносных пегматитов данная концепция развивается в последнее время в СССР в работах Д. А. Великославинского, Ю. М. Соколова и др. [42]. За рубежом представителем этого направления является Г. Рамберг [7]. Наблюдения на мусковитовых месторождениях Урала и в других регионах и геологическое картирование слюдоносной полосы

Уфалейского комплекса убеждают в обоснованности такого подхода к генезису слюдоносных пегматитов. Силектиты, генетически и пространственно ассоциирующие с пегматитами слюдоносной формации, понимаются как преимущественно кварцевые (содержание кварца составляет от 60 до 96 % объема тела) пегматиты метаморфогенного происхождения по аналогии с силекситами, представляющими существование кварцевые слабозональные пегматиты постмагматического генезиса. Эти образования близки между собой по свойствам слагающего кварца. Принципиальные отличия между ними заключаются не только в генезисе, но и в условиях и времени формирования. Метаморфогенные силектиты встречаются почти во всех слюдоносных провинциях мира (в Индии, Аппалачах, Северо-Байкальском нагорье, Северо-Западном Прибайкалье, Карелии, Мугоджарах, на Среднем Урале), относятся к глубинным образованиям и развиваются ранее пегматитов на средних этапах развития складчатых поясов. Магматогенные силекситы тесно связаны с редкометальными и хрусталеносными пегматитами, описаны на Урале, в Казахстане, Франции, Анголе, Нигерии, относятся к среднеглубинным и гипабиссальным образованиям, формирующимся позднее пегматитов на заключительных стадиях развития складчатых поясов.

Установленные особенности формирования высококремнеземных фаций пегматитов различного генезиса отражают различия взглядов на их происхождение А. Е. Ферсмана, У. Ж. Миллера [50] и других, считавших «высокотемпературные кварцевые жилы» допегматитовыми, и Н. П. Ермакова и других исследователей, справедливо относивших силекситы к послепегматитовым жилам. Разделение существенно кварцевых пегматитовых тел на магматогенные силекситы и метаморфогенные силектиты исключает эти противоречия.

Пегматиты слюдоносной формации содержат довольно крупные кварцевые ядра, распространены в известных провинциях мира — Мамско-Чуйской, Карельской в СССР, Неллuru, Бихар в Индии, Минас-Жерайс в Бразилии и служат источником, как правило,путной добычи кварца в промышленных масштабах. Научный и практический интерес представляют месторождения рассматриваемой группы и как скопления высококачественного гранулированного кварца (месторождения Урала). Наложенная хрусталеносность, проявленная на месторождениях Забайкалья (СССР), Конкуиста, Говернадор-Валадарис (Бразилия), незначительна.

Силектиты имеют важное генетическое значение, объединяют своеобразные переходные тела между пегматитами и кварцевыми жилами и занимают в настоящее время ведущее место в обеспечении отечественной промышленности высококачественным кварцевым сырьем. Кварц представлен как первично кристаллизованными (месторождения Карелии в СССР, Сомехалли, Раламани в Индии), так и гранулированными разностями (месторождения Урала, Прибайкалья — СССР, Лайон Маунтин — США). Причем если первичный силектитовый кварц используется промышленностью в пе-

значительной степени, то жилы гранулированных силектитов интенсивно обрабатываются.

Метаморфогенно-гидротермальный генетический тип состоит из пяти формаций: существенно кварцевых метасоматитов (диафторитов) и метаморфогенных кварцевых жил. Первые связаны с регрессивным этапом регионального метаморфизма и образуются в стадию кислотного выщелачивания. Они представлены дистен-кварцевыми, дистен-мусковит-кварцевыми, ассоциирующими с мусковит-эпидот-кварцевыми очковыми, прожилковыми, гнездовыми

ными аналогами и служат основным источником горного хрусталя (месторождения СССР, Бразилии, Мадагаскара), кварца для синтеза (месторождения на Урале — СССР), оптического стекловарения и важными объектами кварца для плавки прозрачного кварцевого стекла (месторождения Урала и Казахстана).

ТИПОВЫЕ ФОРМАЦИИ И МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОСТМАГМАТИЧЕСКОГО КВАРЦА

Характеристика формаций и генотипов месторождений кварца содержит следующие основные положения.

1. Определение диапазона геологических и термодинамических условий формирования месторождений постмагматического кварца на основе выбора характерных формаций и генотипов объектов, содержащих монокварцевые или преимущественно кварцевые обособления (ядра, линзы, блоки, зоны, участки).

2. Выявление и характеристика объектов, претерпевших диафорез в период тектонической и метаморфической активизации с развитием по первичным формациям вторичных кварцевых образований гранулированного, рекристаллизованного, хрусталеносного и некоторых других типов.

Редкометалльно-пегматитовая формация

Характеристика редкометалльных пегматитов — одного из наиболее известных типов месторождений полезных ископаемых — дается с использованием материалов А. И. Гинзбурга, Н. А. Солодова, Б. М. Шмакина, В. Д. Никитина [7, 22] и других исследователей. В последние годы пегматиты привлекают внимание как комплексные источники редкометалльного, полевошпатового и кварцевого сырья. Нами выбраны три контрастные субформации, отражающие кварценоность редкометалльных пегматитов: берилл (колумбит)-кварц-микроклиновая, касситерит (берилл)-кварц-альбит-ортотклазовая и сподумен (лепидолит)-микроклин-кварц-альбитовая.

Берилл (колумбит)-кварц-микроклиновая субформация. Встречается во всех известных пегматитовых полях мира, но не образует крупных месторождений. Жилы этого типа многочисленны, но не достигают значительных размеров. Длина пегматитовых тел небольшая (20—100 м), иногда встречаются жилы протяженностью в первые сотни метров при мощности 5—15 м. Вмещающие породы весьма разнообразны. По отношению к материнским гранитам они располагаются в непосредственном экзоконтакте. Практически ценным редкометалльным минералом является крупнопризматической зеленовато-голубой берилл и иногда колумбит, всегда строго приуроченные к границе блоков кварца и микроклина. Из-за легкости ручной рудоразборки и ясности закономерностей концентрации

редкометалльных минералов большинство пегматитовых жил данного типа являлись и являются объектами старательской добычи. Важно отметить, что значительная часть пегматитов этой субформации издавна отрабатывается в Финляндии, Норвегии, Швеции, ФРГ и других странах на кварцевое сырье. Объем монокварцевых обособлений колеблется от нескольких тысяч до 100 тыс. т. Анализ размеров пегматитовых жил характеризуемой субформации по данным мирового опыта изучения и размерам заключенных в них монокварцевых обособлений показывает, что запасы кварца в типичных объектах превышают обычно 1 млн. т. Генотипом месторождений рассматриваемой субформации является месторождение Тамелла (Финляндия, провинция Турку-Пори)

Касситерит(берилл)-кварц-альбит-ортоклазовая субформация. Широко распространена в Австралии (месторождения Воджина, Иэниитхара, Табба-Табба, Стрелли), в пегматитовой провинции Северо-Американских Кордильер (месторождения Кутеней в Канаде, Эвон, Эсмеральдо, Олсон, Чепидж в США), в Африке. Вмещающие породы — породы архейского, протерозойского и раннепалеозойского возрастов. По отношению к поясу главных мезозойских гранитных интрузий Кордильер пегматиты приурочены к их восточному экзоконтакту, залегая в толщах сланцев и кварцитов, а в Австралии — в древних блоках фундамента в экзоконтакте гранитных массивов, прорывающих амфиболиты и хлорит-рогообманковые сланцы.

Месторождения и жилные поля образуют линейные зоны вблизи гранитных массивов, простирающиеся на расстояния от 30 до 120 км при ширине от 6 до 40 км. Число пегматитовых жил, образующих серии, на месторождениях исчисляется сотнями. Длина жил обычно 200—300 м, иногда достигает 2,7 км (Танталитовая жила месторождения Воджина), мощность от 3 до 30 м (в раздувах порядка 100 м). Кварцевые обособления внутри пегматитовых жил или на их непосредственном продолжении в породах субстрата (до $250 \times 15 \times 80$ м) составляют максимально 300 тыс. т, запасы на крупных месторождениях близки, как правило, к 1,5—2 млн. т. Кварц молочно-белый с прозрачными участками.

Большинство пегматитов в изученных жилных полях безрудные, и только 3—5 % пегматитов содержат промышленные концентрации касситерита, берилла, колумбит-танталита и отрабатываются комплексно с извлечением редких металлов, кварца и полевых шпатов. В качестве генотипа может служить детально изученное и отработанное в верхней части промышленное месторождение Воджина, расположенное в штате Западная Австралия.

Сподумен(лепидолит)-микроклин-кварц-альбитовая субформация. Представляет собой наиболее важный тип промышленных редкометалльных месторождений. Генотипами субформации являются месторождения Берник-Лейк в Канаде, Карибио-Омаруру в Намибии, Блэк-Маунтин, Кварц-Крик в США, Бикита в Зимбабве, Кобо-Кобо, Бусанга в Заире, Варутреск, Клунтарна в Швеции, месторождения Монголии, СССР. Для сподумен(лепидолит)-ми-

кроклин-кварц-альбитовых пегматитов характерно нахождение совместно с пегматитами других типов. При этом они обычно располагаются на большом удалении от магматического очага и представлены единичными телами крупных и уникальных размеров (месторождения Берник-Лейк, Бикита). Большинство крупных месторождений данной субформации отличаются пологими углами падения. На типичных месторождениях пегматиты имеют форму линзо- и плитообразных тел. Длина их измеряется многими сотнями метров, а в отдельных случаях составляет 1—2 км, мощность 5—50 м, иногда до 150—200 м. Прослеженная горными выработками и скважинами длина по падению превышает 500 м. Минеральный состав сподумен(лепидолит)-микроклин-кварц-альбитовых пегматитов характеризуется наибольшей сложностью из всех известных типов, причем это относится и к породообразующим минералам, и к редкометалльным. Кварцевые ядра и зоны имеют постоянное развитие и значительные размеры (от 100 тыс. т до 5 млн. т). Запасы кварца на типичных месторождениях субформации, таких, как Бикита в Зимбабве, Берник-Лейк в канадском штате Манитоба, оцениваются в 20—25 млн. т на каждом из них. В ядерном кварце из редкометалльных минералов постоянно присутствуют амблигонит и лепидолит, что обеспечивает необходимость технологического передела материала кварцевых зон и в то же время позволяет попутно получать обогащенные кварцевые концентраты.

Диафторез редкометалльных пегматитов. Приведем примеры типичных месторождений редкометалльных пегматитов, на которых проявлен метаморфизм (хрусталеобразование, грануляция кварца) этапа тектоно-метаморфической активизации, развивающейся по первичным субформациям.

Грануляция, наложенная на кварц-микроклиновую субформацию, исследована В. Б. Лекухом и Е. П. Мельниковым в Мугоджарах (СССР). Пегматиты кварц-микроклинового состава имеют на месторождении преимущественно зональное строение. Центральная зона представлена кварцевым ядром. В кварце выделяются две генерации: первая — крупно- и гигантокристаллический блоковый кварц, вторая — зернистый кварц. На долю блокового кварца приходится около 90 % объема кварцевого ядра. Зерна кварца второй генерации фиксируются в ячейках сети полигональных трещин блокового кварца. Форма зерен округлая, линзовидная и серповидная, размеры 0,1—10 мм. Иногда они окружены тонким ореолом катаклазированного материала. Наблюдается сопряжение и взаимопрорастание зерен. Петрографические исследования показали, что вновь образованные зерна имеют близкую ориентировку оптических осей и сохраняют знак энантиморфизма материнского индивида. Угасание зерен изменяется от спокойного до мозаичного. Приведенные данные отражают начальные стадии зарождения грануляции, когда дезинтеграция исходного кварца осуществляется при его переходе через точку инверсии.

Хрусталеобразование, наложенное на берилл(колумбит)-кварц-микроклиновую субформацию, отчетливо фиксируется на одном из

уральских месторождений. Полученные материалы в совокупности с данными исследований В. Д. Никитина, В. Ю. Эшкина, Т. А. Карякина позволяют констатировать следующее.

Метаморфические породы, вмещающие пегматиты месторождения, образовались в условиях эпидот-амфиболитовой фации дистенсиллиманитовой серии.

Формирование пегматитов и кварцевых жил происходило в изменившихся термодинамических условиях, отвечающих андалузитсиллиманитовой серии той же фации регионального метаморфизма.

Наложный характер пегматито- и хрусталеобразования на рассматриваемом месторождении.

Хрусталеобразование не только отделено от времени становления как вмещающих пород, так и самих пегматитов, но и фиксирует собой самостоятельный этап активизации метасоматических процессов, отвечающих в общих чертах вначале грейзеновой, а на заключительных стадиях — аргиллизитовой метасоматическим формациям.

Скульптура кристаллов кварца существенно отличается от скульптуры кристаллов, выросших в свободном пространстве полых хрусталеносных гнезд, где наблюдаются обычные вицинальные формы роста. Широкое развитие реберных и вершинных форм роста (скелетные формы), наличие включений гнездовой массы в пирамидах роста некоторых быстро растущих граней, отпечатков минералов гнездового выполнения на кристаллах кварца свидетельствует о том, что рост кристаллов происходит не в свободном пространстве, а в достаточно вязкой слюдисто-глинистой массе, образовавшейся при гидротермально-метасоматическом изменении аплит-пегматитов.

Образование кристаллов кварца связано с экранированием кварцевыми ядрами пегматитов восходящих хрусталеобразующих растворов, продвигавшихся по системе новых (или подновленных) трещин в пегматите. Локализация хрустальных гнезд под кварцевыми ядрами, развитие зон изменения аплитопегматитовых пород ниже хрустальных гнезд и переход этих зон в боковые метаморфические породы с образованием иногда так называемых минерализованных (горным хрусталем и другими минералами-спутниками) трещин, сходство термодинамических условий и минеральных парагенезисов хрусталепроявлений в кварцевых и пегматитовых жилах и даже в окружающих горных породах — все это свидетельствует об образовании кристаллов кварца при участии новых порций гидротермальных растворов, неравновесных с породами, по которым они продвигались.

Хрусталеобразование, наложенное на берилл (колумбит)-кварцмикроклиновую субформацию, проявлено на месторождении Биннет-Квори в штате Мэн (США) в пределах протяженной сложно построенной складчатой системы Аппалачей. Здесь горный хрусталь содержится большей частью в жильных редкометальных (с самоцветами) пегматитах, залегающих среди кристаллических сланцев и гнейсов в структурах Пидмонта и Голубых гор, характеризую-

шихся полифациальным метаморфизмом и гранитным магматизмом. Редкометалльные пегматиты с наложенной хрусталеносностью характерны для месторождений Серидозинью на плато Борборема в штате Параиба Бразилии и Сен-Реми в провинции Квебек (Канада).

Грануляция, наложенная на сподумен (лепидолит)-микроклин-кварц-альбитовую субформацию, отмечается на месторождении Лас-Тапиас в провинции Кордова Аргентины. Можно указать на возможное наличие гранулированного кварца в редкометалльных пегматитах Монгольского Алтая, в некоторых пегматитах месторождений района Берник-Лейк в Канаде.

Наличие месторождений гранулированного кварца возможно и в других областях Южно-Американского континента. Например, на юге Аргентины на Патагонском щите и на щите Десеадо между крупнейшими Аргентинским и Центрально-Аргентинским линейными, а также на Гвианском нагорье и на востоке Бразилии вблизи линейных Сан-Франсиску и Восточно-Бразильского, в зоне их активизирующего воздействия на Бразильскую платформу. На Северо-Американском континенте возможны месторождения гранулированного кварца в обрамлении плато Колорадо, на поднятии Блек-Хиллс, в верховьях Юкона на границе миогеосинклинальной и эвгеосинклинальной областей Северо-Американских Кордильер.

Таким образом, на месторождениях редкометалльных пегматитов различных субформаций, отражающих практически весь интервал геологических и термодинамических условий их образования, как показывают приведенные примеры, устанавливается развитие метаморфизма с преобладанием термальных и дислокационных преобразований. Первое направление приводит к возникновению наложенного хрусталеобразования, второе — к образованию мелкозернистых агрегатов кварца и альбита за счет минералов ранних парагенезисов всех пегматитовых зон. Термодинамический уровень грануляции редкометалльных пегматитов отвечает условиям известной альбититовой формации метасоматитов. Хрусталеобразование и грануляция накладываются не только на субформации, выбранные в качестве типовых, их наличие отмечают и в других субформациях редкометалльных пегматитов.

Хрусталеносно-пегматитовая формация

В изучение гранитных пегматитов вообще и хрусталеносных в частности большой вклад внесли А. Б. Ферсман, А. И. Гинзбург, Г. Г. Родионов, Н. П. Ермаков, К. А. Власов, А. И. Захарченко, Ю. А. Долгов, Е. Я. Киевленко, Е. К. Лазаренко, В. А. Каложный, А. Н. Лукашев и другие, разработавшие основные теоретические положения их образования и закономерности локализации.

Хрусталеносные пегматиты относились А. Е. Ферсманом к фтор-бериллиевому типу и литий-рубеллитовому подтипу натрий-литие-

вого типа. А. И. Гинзбургом и Г. Г. Родионовым они рассматриваются в качестве самостоятельной малоглубинной формации, а также среди редкометальных пегматитов умеренных глубин, где выделена особая субформация с драгоценными камнями. Е. Я. Киевленко не устанавливает принципиального различия между этими подразделениями, он выделяет единую формацию миароловых пегматитов с пьезокварцем и драгоценными камнями, несущую четкие признаки становления на сравнительно небольших глубинах. Полости, как считает Е. Я. Киевленко, могут иметь различное происхождение: 1) быть остаточными в результате усадки застывающего магматического расплава и обособления летучих компонентов (пегматиты Мурзинки, Мокруши, Алабашки на Среднем Урале); 2) быть комбинированными за счет расширения первичных остаточных полостей под действием газовой-жидких растворов с гигантскими полостями, расположенными под кварцевыми ядрами; 3) возникать наложенным путем в результате растворения поздними гидротермами участков первичного пегматита в собственно хрусталеносных — Забайкалье, Сев. Монголия, в редкометальных — хребет Бур-Мадо в Сомали и даже в мусковитовых пегматитах — месторождения Центральной и Южной Бразилии. Наибольшее практическое значение имеют комбинированные полости, поскольку при их формировании интенсивные процессы перекристаллизации пегматитов сочетаются с наличием открытых полостей, весьма благоприятных для свободного роста крупных и совершенных кристаллов.

Миароловые (хрусталеносные) пегматиты имеют следующие генетические особенности: 1) тесную пространственную и причинную связи с гранитоидами гипабиссальными и приповерхностными сложными плутонами часто кольцевого строения; 2) материнские граниты образуют аллохтоны, по составу отвечающие рапакиви или калиевым гранитам и аляскитам, обогащенным, кроме калия (K_2O от 1,2 до 1,6, по Б. М. Шмакину и А. В. Татаринovu), кремнеземом (SiO_2 более 70 %), а также легколетучими компонентами, особенно сильно флюсующим фтором (флюорит, топаз), бором (турмалин), фосфором (апатит); 3) гранитоидные комплексы подобного типа формируются в зонах тектоно-магматической активизации древних и молодых платформ, а также в поздней и посторогенную стадию развития складчатых поясов в тектонически относительно спокойных условиях [37].

Н. П. Ермаков, А. И. Гинзбург, Г. Г. Родионов, Е. Я. Киевленко и другие исследователи различают среди миароловых (хрусталеносных) пегматитов так называемые «камерные» внутригранитные, образовавшиеся из перемещенного расплава, и инъекционные в окружающие породы «занорышевые» пегматиты. Камерные пегматиты сосредоточиваются в верхних частях гранитных интрузивов в основном в пологокупольных структурах под экраном перекрывающих пород. Форма тел округлая, изометричная, иногда трубчатая и линзовидная. Продуктивные тела содержат графическую, пегматоидную, полевошпатовую, кварцевую зоны и крупную

полость — камеру под кварцевым ядром с кристаллами кварца, берилла и топаза (Украина, Монголия) или кварца и флюорита (Казахстан, Монголия).

Хрусталеносные полости имеют комбинированное происхождение. Заключенные в них кристаллы кварца, по данным исследований включений, начинали расти из расплава, а затем развивались за счет гидротермальной перекристаллизации ядерного кварца [10]. Занорышевые пегматиты имеют жильную, линзовидную и плитообразную форму, располагаясь преимущественно в зоне ближайшего экзоконтакта материнских гранитных массивов и в останцах пород кровли, реже в самих гранитах. В отличие от камерных пегматитов, они содержат многочисленные, но более мелкие полости — «занорыши», как их называли уральские горщики и А. Е. Ферсман. Кроме того, они значительно разнообразнее по внутреннему строению и минерализации. Классические занорышевые пегматиты с аквамарном или топазом, известные на Урале среди нижнепалеозойских биотит-плагиоклазовых гнейсов, представлены плитообразными неполнозональными телами, сложенными в основном графическими пегматитами и мелкими блоками микроклина. Кварцевые ядра, как правило, отсутствуют, преобладают остаточные полости и комбинированные.

Для характеристики хрусталеносных пегматитов выбраны две субформации, имеющие наибольшее промышленное значение: топаз-морион-альбит-кварц-микроклиновая и флюорит-раухтопаз-кварц-альбит-микроклиновая, распространенные как в камерных, так и в занорышевых пегматитах, но в то же время отличающиеся геологической и геохимической обстановкой формирования.

Топаз-морион-альбит-кварц-микроклиновая субформация распространена достаточно широко в различных типах гранитных пегматитов (например, в мусковит-редкометалльных пегматитах Индии, Бразилии, Мадагаскара, в редкометалльных пегматитах Канады, США, Африки, где топаз, берилл и горный хрусталь извлекаются попутно при добыче мусковита, редких металлов, керамического сырья), но самостоятельное значение имеет обычно лишь в хрусталеносных, и особенно в камерных пегматитах. В качестве генотипа может служить месторождение, на котором наиболее полно проявлены основные черты хрусталеносных пегматитов данной формации (Украинский щит).

Флюорит-раухтопаз-кварц-альбит-микроклиновая субформация известна в Прибалхашской провинции, выделяемой в качестве одной из типовых для хрусталеносных внутригранитных пегматитов в пределах СССР, охватывающей Джуунгаро-Балхашскую герцинскую складчатую систему и сопредельные структурно-формационные зоны каледонских структур Северо-Тянь-Шань-Казахстанской складчатой системы [37]. Поля хрусталеносных пегматитов приурочены главным образом к широко распространенным гипабиссальным интрузивам гранит-лейкогранитовой и аляскитовой формаций, сформировавшимся в консолидационные и постконсолида-

ционные стадии каледонского и герцинского тектоно-магматических циклов. Максимальная пегматитоносность характерна для сложно построенных многофазных интрузивов, обладающих элементами кольцевого строения. Как правило, эти массивы образованы магматическими комплексами обеих указанных гранитоидных формаций и имеют незначительную глубину эрозионного среза. Исследование пегматитоносности более 300 гранитных массивов Казахстана и сопредельных регионов показало, что минимальные размеры массивов, содержащих камерные пегматиты, составили в плане 200 км² [24]. Кроме Казахстана, камерные пегматиты флюорит-раухтопаз-кварц-альбит-микроклиновой субформации известны на Алтае, в Монголии и других регионах. Во многих отношениях типично для рассматриваемой формации пегматитовое поле в Казахстане.

Мегаморфизм хрусталеносных пегматитов имеет свои отличительные особенности. Главные из них заключаются в том, что поскольку хрусталеносные пегматиты образуются в поздне- и постскладчатые периоды развития складчатых поясов или в периоды тектоно-магматической активизации древних и молодых платформ, локализуясь внутри материнских гранитных массивов в относительно спокойных тектонических условиях, то естественно не создается благоприятных предпосылок для проявления дислокации, рекристаллизации и грануляции кварца. И действительно, в хрусталеносных пегматитах деформированный кварц развит незначительно только в некоторых телах и в основном на границе внутренней зоны пегматита с хрусталеносной полостью (плитчатый, трещиноватый кварц, кварцевая «сыпучка»), а гранулированный кварц встречается лишь в зачаточной форме в виде так называемого «сотового» кварца, отмечающегося иногда в ядерном кварце или в основаниях кристаллов горного хрусталя. Что касается гидротермальных изменений, сопровождающих хрусталеобразование, то для их проявления в рассматриваемых пегматитах, наоборот, создаются весьма благоприятные условия (умеренное развитие тектонических трещин, локализованных вблизи пегматитового тела, подводящих поздне гидротермальные растворы, соответствующая термодинамическая и геохимическая обстановка — температура 500—100 °С, давление 100—120 МПа, высокое содержание летучих компонентов, в том числе фтора) и они распространены достаточно широко. Практическую ценность как раз и представляют не пегматитовые тела с мелкими остаточными полостями кристаллизации, а пегматиты с интенсивно выраженными процессами гидротермальных изменений (перекристаллизация и метасоматические преобразования первичных пегматитов с одновременным выщелачиванием их нижней подъядерной части) этапа диафтореза. Наложенный характер значительной части хрустальной и камнесамочетной минерализации проявлен на указанных генотипах месторождений рассматриваемой формации, а также в пегматитах массивов в Забайкалье, месторождений Эспирито-Санта в Бразилии и на Алтае.

Силекситовая формация

Силекситы — необычные геологические образования с присутствием им чертами и пегматитов и кварцевых жил долгое время не привлекали должного внимания геологов, хотя известны были давно. А. Е. Ферсман отмечал, что кремний определяет характер пегматитового остатка и в общем на одну молекулу глинозема и примерно одну молекулу щелочи в составе остаточных пегматитовых расплавов приходится 8 или 9 молекул кремнезема. Согласно схемам порядка выделения минералов при кристаллизации остаточного расплава, гранитные пегматиты оказываются лейкократовыми и переходят в кварцевые жилы (силекситы по Миллеру, Спарру). Обычно они не содержат ни рудных минералов, ни меланократовых компонентов. Гранитная магма дифференцируется на раскристаллизованную часть и остаточный расплав, дающий пегматиты и высокотемпературные кварцевые жилы, т. е. силекситы. Но даже в монографии А. Е. Ферсмана по пегматитам по сути только дается определение силекситов как высокотемпературных кварцевых жил, формирующихся примерно одновременно с аплитами, более подробно силекситы не рассматриваются, что можно объяснить отсутствием в них промышленных концентраций редкометальной, слюдяной и пьезооптической минерализации. Кроме работ А. Е. Ферсмана, упоминания о своеобразных кварцевых телах, известных под названием силекситов, довольно широко распространенных в природе, но слабо освещенных в геологической литературе, имеются в трудах Ф. Ю. Левинсон-Лессинга, Е. М. Лазыко и других исследователей, считающих силекситы особыми ультракислыми «вытяжками» остаточного магматического расплава. Более подробно вопросы генезиса, состава, строения, закономерностей локализации и перспективной оценки силекситов изложены в трудах Н. П. Ермакова, С. М. Бескина, Б. Д. Эфроса, С. Д. Дмитриева, Я. Н. Соколова, А. В. Осипского, А. Г. Малышева, В. Н. Труфанова, В. П. Петрова, Ю. А. Долгова, В. Б. Лекуха, В. М. Смертенко, появившихся в результате обобщения материалов широких поисково-разведочных работ в Казахстане, Средней Азии, на Алтае и в других регионах. Одни из них отстаивали магматогенное происхождение силекситов и приводили в пользу этого убедительные экспериментальные данные и полевые наблюдения. Другие считали подобные образования метасоматическими или метаморфическими и приводили не менее убедительные доказательства и примеры. Рост потребности промышленности в высококачественных кварцевых концентратах различного назначения стимулировал научный и практический интерес к изучению силекситов. Отсутствие в силекситах рудных компонентов, преимущественно кварцевый, а зачастую монокварцевый состав и вообще незначительное содержание в кварце минеральных примесей (обычно первые процессы) сыграли решающую роль в активизации их исследований и использовании кварца силекситов в качестве сырья для различных отраслей промышленности [22, 32, 36].

Силекситы являются полигенными образованиями, среди которых могут быть выделены постмагматический пегматитовый (собственно силекситы) и метаморфогенный пегматитовый (метасилекситы или силектиты по предлагаемой нами терминологии) генетические типы.

Затруднения в классификации и определении формационной принадлежности силекситов связаны не только с их полигенностью, частично устраняемой предлагаемым нами разделением силекситов на собственно магмотогенные силекситы и метаморфогенные силектиты (термин наш.— *Е. М.*), но и с разницей во времени и способах их образования. Б. К. Эмерсон в Западном Массачусетсе, С. Р. Ван Хайс в горах Блэк Хиллз, Ж. Е. Спарр в районе Силвер Пик штата Невада, Л. В. Пирсон, А. Харкер в других штатах США и Н. П. Ермаков в Казахстане установили, что пегматиты и силекситы являются конечными продуктами кристаллизации исходной магмы, формирование которых включает магматический, пневматолитовый и гидротермальный этапы. Они залегают в виде даек в уже затвердевшей гранитной массе или во вмещающих породах экзоконтакта. Полевые геологические материалы свидетельствуют, по словам У. Ж. Миллера, о том, что, в конечном счете, во многих районах имеются обычные пегматитовые дайки в граните или рядом с ним и при прослеживании во вмещающие породы пегматиты становятся все более и более кремнистыми, причем с удалением от контакта вначале фиксируются силекситовые дайки, а кварцевые жилы располагаются на наибольшем удалении. Продвигаясь вперед, жидкая фаза становится более резко выраженной и содержащей только кремнезем, давая вначале силекситовые тела, а затем кварцевые жилы [50]. Температуры образования таких силекситов лежат в пределах 700—400 °С. В то же время У. Ж. Миллер описал силекситы и ранние пегматиты из Адирондакских гор штата Нью-Йорк в США, формирующиеся задолго до затвердевания материнской гранитной массы как продукты магматической сегрегации с температурами образования порядка 900—500 °С. Термином силексит У. Ж. Миллер предлагает называть любое тело из чистого или почти чистого кремнезема магматического или пневматолитового происхождения, которое встречается в виде даек, сегрегаций или включений в пределах материнской гранитоидной породы или во вмещающих породах экзоконтакта.

Хотя приведенные факты и дают основание для подразделения силекситов на несколько субформаций, но во избежание усложнения терминологии под силекситом нами понимается горная порода, состоящая в основном из кварца (более 60 %) изверженного или пневматолито-гидротермального происхождения, отвечающая понятию крупно- и среднекристаллически-зернистого мономинерального самостоятельного кварцевого тела или внутренней зоны пегматита существенно кварцевого состава [22]. Таким образом, силекситы представляют собой пегматиты с резким преобладанием в их объеме кварцевого ядра (обычно более 85 % объема тела) и

подчиненной ролью или почти полным отсутствием ранних кварц-полевошпатовых зон.

Существенно кварцевые постмагматические пегматиты (силекситы), тесно связанные с ранее рассмотренными пегматитами, в частности с хрусталеносными, относятся к наиболее распространенной биотит-микроклин-кварцевой субформации.

Биотит-микроклин-кварцевая субформация. Среди постмагматических силекситов этой субформации выделяются остаточный и инъекционный типы. Силекситы преимущественно остаточного типа развиты на Ащисайском месторождении в Мугоджарах, а инъекционного типа — на месторождениях Урала (рис. 2—5). Силекситовые месторождения Среднего Урала пространственно и генетически связаны с гранитоидами верхнепалеозойской гранитной формации и занимают сходную геологическую позицию, размещаясь в тектонических нарушениях, осложняющих зону эндоконтакта гранитных плутонов. Разведка и изучение силекситовых тел Урала позволили дать новую трактовку их происхождения и расширить практическое использование слагающего их кварца. Получены данные по зональному строению силекситов. Установлено, что повышенное содержание алюминия в силекситовом кварце уральских месторождений обусловлено его изоморфным вхождением в структурную решетку кварца, а также увеличенным содержанием минеральных микропримесей, выявляющихся при электронно-микроскопических исследованиях. Силекситовый кварц может использоваться для получения ферросплавов, в оптическом стекловарении, а при совершенствовании обогащения — и для других целей.

Метаморфизм силекситов проявился в различной форме. В результате проведения научных и поисково-разведочных работ на Урале, в Казахстане и других регионах получен фактический материал, позволивший выделить среди метаморфических преобразований силекситов грануляцию, разлистование, рекристаллизацию и хрусталеобразование.

Грануляция силекситов впервые была выделена и описана Н. П. Ермаковым при исследовании кварцевых жил и пегматитов Казахстана. Затем признаки ее проявления были зафиксированы в силекситах Мугоджар, Среднего Урала и в других регионах. Обычно постмагматические силекситы пегматитового ряда сложены крупно- и гигантозернистым кварцем, но иногда среди этой массы, составляющей основной фон кварцевого тела, отмечаются неравномернозернистые средне-, мелкозернистые агрегаты, развитые спорадически в призальбандовых или выклинивающихся частях силекситовых образований (месторождения Среднего Урала и Центрального Казахстана). В таких участках при визуальных наблюдениях, а чаще при микроскопических исследованиях специально подготовленных и отполированных пластин площадью порядка 50 см² устанавливается слабо развитая характерная сеть «сотовых» трещин. Кроме того, иногда в крупно-, гигантокристаллическом кварце, составляющем основную массу силекситовых тел,

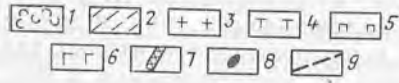
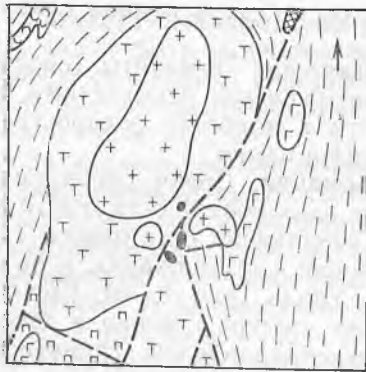


Рис. 2. Геологическое строение месторождений силекситов. Урал.
 1 — порфиры андезит-базальтовые (S_2-D_1); 2 — зеленые сланцы, углисто-глинисто-кремнистые сланцы, амфиболиты; 3 — граниты биотитовые; 4 — диориты, кварцевые диориты; 5 — плагιοграниты амфиболовые (D_2); 6 — габбро-амфиболиты (D_2); 7 — серпентиниты; 8 — месторождения силекситов; 9 — тектонические нарушения

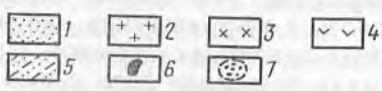
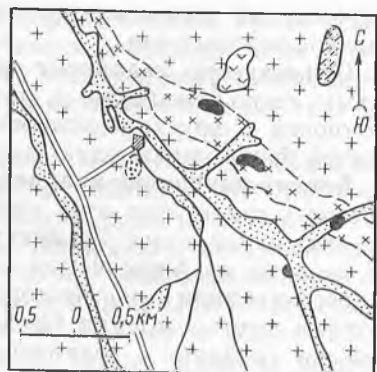


Рис. 3. Геологическое строение силекситов района Кассонги. Ангола.
 По Ж. Махаирас.

1 — аллювий; 2 — граниты биотитовые; 3 — мигматиты амфибол-биотитовые; 4 — зеленосланцевые породы; 5 — песчаники расланцованные; 6 — кварц разлитованный; 7 — элювий разлитованного кварца

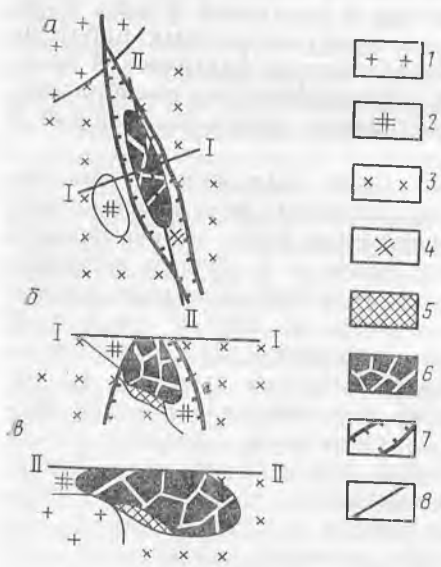


Рис. 4. Структурное положение и морфология силекситового тела Урала.

a — геологический план; *b* — разрез по линии I—I; *v* — разрез по линии II—II. 1 — граниты биотитовые; 2 — граниты мусковитовые; 3 — диориты; 4 — пегматитизированные диориты; 5 — пегматитовая оторочка; 6 — кварцевое ядро; 7 — тектоническая зона; 8 — геологические границы

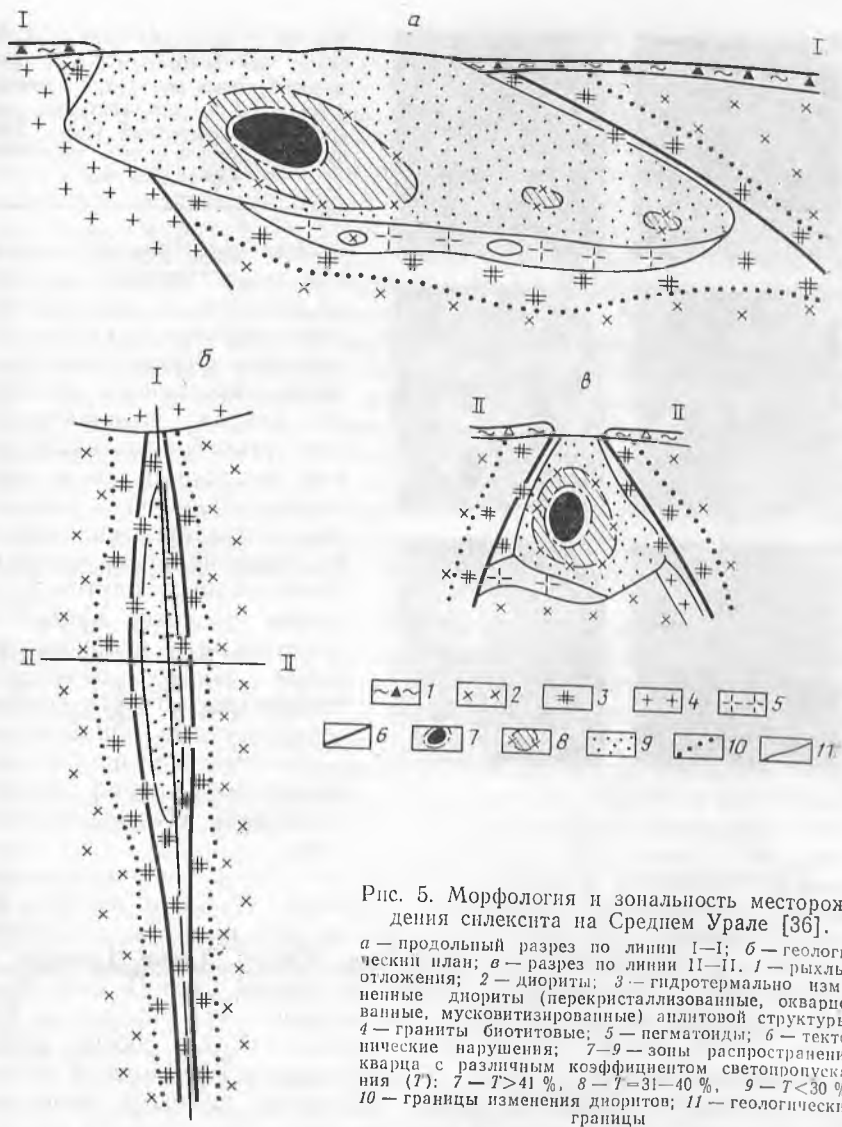


Рис. 5. Морфология и зональность месторождения силексита на Среднем Урале [36].

a — продольный разрез по линии I—I; *b* — геологический план; *в* — разрез по линии II—II. 1 — рыхлые отложения; 2 — диориты; 3 — гидротермально измененные диориты (перекристаллизованные, окварцованные, мусковитизированные) аплитовой структуры; 4 — граниты биотитовые; 5 — пегматонды; 6 — тектонические нарушения; 7—9 — зоны распространения кварца с различным коэффициентом светопропускания (*T*): 7 — $T > 41\%$, 8 — $T = 31-40\%$, 9 — $T < 30\%$; 10 — границы изменения диоритов; 11 — геологические границы

отмечается более поздний кварц в виде тонкозернистого агрегата в кварце первой генерации. Он образует прожилки мощностью до 1 см и шлиры объемом 1—2 см³, приуроченные к системам тектонических трещин; характеризуется нормальным погасанием, микроскопическими размерами (5—20 микроп) зерен, их изометричной формой и наличием признаков структур рекристаллизации (рис. 6). Однако «сотовый» кварц имеет эпизодическое распространение, занимает малую часть объема тела и имеет только генети-

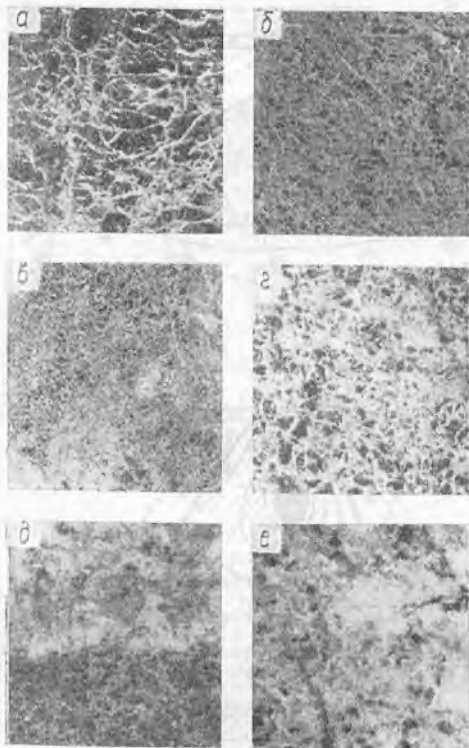


Рис. 6. Грануляция кварца сплекситов (а) формации I.A.3, грейзен-кварцевых жил (б, в) формации I.B.2 и пегматитовых жил (г, д, е) формации II.A.1. Нат. вел. Полированные пластины. Средний Урал

ческое значение, не оказывая существенного влияния на свойства и технологические особенности кварца сплекситов. Ограниченное развитие пирогенного «сотового» кварца, возникающего при мгновенном охлаждении кварцевого тела, очевидно, объясняется медленным остыванием сплекситов в эндоконтактах крупных гранитоидных плутонов, а слабое развитие процессов грануляции и рекристаллизации можно объяснить структурно-генетическими особенностями образования и геологической истории сплекситового кварца, способствующего его разлистыванию.

Разлистывание, накладывающееся на биотит-микроклин-кварцевую субформацию сплекситов, наиболее детально изучено на месторождении Среднего Урала [14, 32, 36] и имеет достаточно широкое распространение в СССР на Урале, Алтае, Памире, в Забайкалье, в Калифорнии (США), в районе Сент-Поль-ля-Рош (Центральный массив Франции), в северной части Нигерии, в Анголе [14, 49]. На восточном склоне Среднего Урала добыча жильного кварца началась с 1926 г. и продолжается в настоящее время. Месторождение содержит кварц достаточно высокого качества. Геолого-структурная позиция месторождения определяется его положением в юго-восточной части гранитоидного массива, входящего в состав Восточно-Уральского поднятия (см. рис. 2). Локальная структура месторождения определяется наличием крупного субмеридионального тектонического нарушения в эндоконтактовой зоне интрузива. Месторождение представляет собой кварцевое тело, каплевидное в плане и неправильное в разрезе (см. рис. 4).

Обобщая развитие метасоматических изменений вмещающих пород и самого кварца, можно констатировать, что внешние зоны метасоматических колонок выражены обычно в развитии хлорит-

карбонатных парагенезисов, промежуточные — флогопит-анкеритовых, а внутренние — мусковит-пирит-талковых, в целом отвечающих метасоматическим преобразованиям грейзеновой формации. Данные, полученные при проведении на месторождении разведочных работ, показывают, что оно имеет зональное строение. Внешняя зона представлена породой пегматондной и кварц-аплитовой структур, внутренняя зона сложена массивным кварцем (кварцевое ядро, см. рис. 4, 5). Доля зон в объеме тела составляет (в %): пегматондная зона 3—8, кварцевое ядро 97—92. На месторождении выделяются две генерации кварца, отличающиеся структурными особенностями и степенью метаморфизма. Кварц первой генерации имеет гиганто- и крупнозернистую структуру, массивную или сланцеватую текстуру. Последняя обусловлена разлистованием кварца по плоскостям срастания полисинтетических бразильских двойников. Кварц второй генерации встречается в виде тонкозернистого агрегата в кварце первой генерации. Он образует прожилки мощностью до 1 см и шпильки объемом 1—2 см³. Характеризуется нормальным погасанием, микроскопическими размерами (5—20 мк) зерен, их изометричной формой и более высокой химической чистотой относительно кварца первой генерации.

Кварц содержит значительное количество газовой-жидких включений. Изучение первичных включений С. М. Аккерманцевым (метод гомогенизации) позволяет определить температуру образования кварца в 490—560 °С. Эти данные подтверждены А. С. Таланцевым по двухполюсоватому геотермометру Барта—Рябчикова (480—505 °С). Термобарогеохимические исследования кварца показали, что газовой-жидкие включения (ГЖВ) в нем гомогенизируются по первому типу в температурном интервале 164—340 °С, а температурные пики массовой декрепитации ГЖВ соответствуют 160, 260, 380, 450, 500 °С. Давление в момент гомогенизации составляло $1,4 \cdot 10^8$ Па, рН растворов 6,8 [46]. По данным лабораторных (928 проб) и технологических (41 проба) исследований, кварц месторождения пригоден для производства ферросплавов, многокомпонентных оптических стекол, хрустальной и химической посуды, тонкой керамики, изделий из непрозрачного кварцевого стекла.

В процессе детальной разведки и исследования силекситов получены новые данные [32, 36]. Кварцевое тело месторождения имеет форму и размеры, не типичные для гидротермальных кварцевых жил. Оно залегает в эндоконтактной части гранитоидного массива, содержит значительное количество ксенолитов, более или менее равномерно размещенных по всем измерениям тела, имеет достаточно мощную пегматоидную оторочку. Температуры образования тела, определенные методами гомогенизации первичных включений в кварце и по двухполюсоватому термометру Барта—Рябчикова, сопоставимы с температурными образованиями пегматитов. Повышенное содержание алюминия в виде изоморфной примеси также подтверждает высокую температуру образова-

ния кварца, нехарактерную для гидротермальных тел. Таким образом, приведенные факты позволяют нам определить кварцевое тело месторождения как силексит биотит-микроклин-кварцевой субформации, который в дальнейшем претерпел значительную гидротермальную переработку в условиях понижающих температур и давлений, в общем отвечающих грейзеновой, и в меньшей степени — березитовой формации метасоматитов. В целом месторождение генетически связано с формированием гранитоидов варисской гранитной формации, приуроченных к крупным антиклинальным структурам.

Силекситы отличаются слабым проявлением гидротермально-метасоматических эпигенетических процессов, сопровождающих образование пьезооптических, оптических и драгоценных минералов, обычно не содержат хрусталеносных полостей, но, как исключение, отдельные из них оказываются непромышленно флюорито- и хрусталеносными (месторождения Баян-Обо, Чжанчублинг в МНР) и в таком случае содержат сырье низших сортов, пригодное только для плавки.

В заключение следует оговориться, что рассмотренные в настоящем разделе способы образования практически монокварцевых высокотемпературных силекситов кристаллизацией из пневматолито-гидротермальных остаточно-пегматитовых растворов с формированием средне-, крупно- и гигантозернистых агрегатов не являются, как будет показано, исчерпывающими в проблеме генезиса существенно кварцевых обособлений. Конкретные примеры будут разобраны в соответствующих разделах работы.

Кварц-апоскарновая формация

Скарны представляют собой достаточно хорошо изученные геологические образования, с которыми связан разнообразный комплекс полезных ископаемых (свинец, цинк, вольфрам, молибден, олово и др.). Поэтому здесь будут приведены лишь краткие сведения о месторождениях наиболее распространенных субформаций, главным образом с целью освещения масштабов сопутствующего скарнированию кварцеобразования, геологических и термодинамических условий проявления наложенных на скарны процессов кварце- и хрусталеобразования.

В качестве типовых скарново-рудных субформаций, одновременно являющихся эдуктом для сопряженных с ними эпигенетических процессов образования кварцевых жил и хрусталеносных полостей, могут быть отмечены: 1) галенит-сфалерит-известково-скарновая; 2) шеелит-известково-скарновая; 3) молибденит (шеелит)-известково-скарновая. Так, например, к молибденит (шеелит)-известково-скарновой субформации относится известное месторождение Тырныауз в Кабардино-Балкарии. К этой же субформации с проявлениями кварца и горного хрусталя принадлежат также месторождения на Алтае, в Хабаровском крае, Азегур в Ма-

рокко, Янцзы-Чжанзы (КНР), Шарифабад (Иран), Тахталыдаг (Турция).

Месторождения и проявления пьезокварца, связанные со скарнами, известны в Австралии, КНР и других странах [1]. В Юго-Восточном Китае апоскарновые месторождения пьезокварца тяготеют к гипабиссальным многофазовым массивам мезозойских гранитов. Так, крупное месторождение Янзюолин (на о-ве Хайнань) представлено сложной штокверкообразной системой крупных сближенных кварцевых жил, залегающих среди скарнированных гнейсов протерозоя и мезозойских гранитов. Месторождение Пинкаилин, расположенное в районе Гуанчжоу, менее крупное. Промышленные месторождения горного хрусталя, пространственно связанные со скарнами, выявлены также в Тибете.

Кварц-апогрейзенная формация

Кварцевые обособления, связанные с грейзенами, известны уже несколько столетий. За это время установлены генетическая связь многих типов рудных, нерудных месторождений и сопровождающих их кварцевых образований с процессами грейзенизации и распространение их в пределах различных регионов и континентов. С целью характеристики особенностей локализации, масштабов, состава и строения кварцевых тел апогрейзенной формации показаны месторождения касситерит(вольфрамат, редкометалльно)-кварц-грейзенной субформации. К данной формации принадлежат многие месторождения в СССР и за рубежом — Панаскейра (Португалия), Сихуашань (КНР), Авока, Блю Тир, Маунт-Бишоф, Ардлетан, Торрингтон, Хиллгров, Кингсгейт, Динвотер, Роки-Ривер, Гринбушес, Ваучоп, Хэтчес Крик (Австралия) и др. Большинство исследователей считают, что хрусталеносные гнезда обязаны своим происхождением растворению материала грейзенов и гранитов гидротермальными растворами, поступавшими при позднейших тектонических подвижках с одновременным отложением кварца. Распределение хрусталеносных гнезд в грейзеновых телах и трубах закономерно, но отмечается более благоприятная их локализация в участках с пониженным содержанием металлов, а также в раздувах труб.

Известно, например, что на месторождении Кингсгейт добыты тонны кондиционных кристаллов пьезокварца. Так же как на месторождении Кингсгейт, на редкометалльных месторождениях района Бамфорд-Петфорд (рудники Плаймер Ривер, Вольфрам Кэми, Петфорд и др.) развита наложенная хрусталеносная минерализация [1]. На этих месторождениях производится попутная или самостоятельная добыча пьезокварца.

Кварц-полевошпатовая формация

Ранее были рассмотрены существенно кварцевые (точнее — полевошпат-кварцевые) образования постмагматогенного пегматитового происхождения — силекситы, обладающие целым рядом только им присущих особенностей строения, свойств и локализации, достаточно отчетливо выявляющие их магматогенный генезис. Однако в природе широко распространены и изучены кварц-полевошпатовые жилы, причисляемые иногда тоже к разряду силекситов, но не обладающие главным признаком, позволяющим отнести их к данному генетическому типу, — кристаллизацией из расплава совместно с магматогенными пегматитами согласно определению термина «силексит» [50]. Среди пегматитов Коростеньского плутона Б. А. Гаврусевичем были встречены кварц-полевошпатовые полостные заполнения пегматоидного облика, которые образовались без участия расплавов. Он описал мелкие пегматоидные тела с пегматоидной полевошпатовой зоной и кристаллами кварца в полости. Исследованные полевошпатовые и кварц-полевошпатовые жилы явно не магматогенного происхождения. Весьма возможно, что подобные образования в природе встречаются значительно чаще и без должной проверки принимаются за пегматитовые образования, связанные с пегматитовым расплавом. Полевошпат-кварцевые жилы распространены также в Казахстане, на Алтае, в Средней Азии и других регионах.

Более обоснованно отнесение кварц-полевошпатовых тел, не обладающих признаками высокотемпературных магматогенных пегматитов, к генетическому типу метасоматитов. Среди большого разнообразия полевошпат-кварцевых образований, близких по составу и генезису к грейзеновым и скарновым (пироксен-гранатовым) породам, наиболее широко распространенными и характерными являются кварц-полевошпатовые и полевошпат-кварцевые метасоматиты биотит-(рутил)-микроклин-кварцевого минерального типа, развитые в массивах Казахстана, Тянь-Шаня, на Южном Урале. В качестве типовых могут служить полевошпат-кварцевые метасоматиты в Центральном Казахстане и Северо-Западном Тянь-Шане, детально изученные Н. П. Ермаковым, Я. Н. Соколовым, А. В. Осинским.

Иногда в кварц-полевошпатовых и полевошпат-кварцевых телах отмечаются признаки их последующего динамометаморфизма, выражающиеся в формировании поздней тектонической трещиноватости, тонкомелкозернистых кварцевых агрегатов вдоль систем трещин и, сопряженных с ней процессов калишпатизации, карбонатизации, мусковитизации (серицитизации), турмалинизации, альбитизации. Они развиты в полевошпат-кварцевых телах гранитных массивов Казахстана. Однако эти изменения не имеют широкого распространения, проявляясь обычно эпизодически и захватывая небольшие участки жил. Более типичны они для ранее рассмотренных силекситовых тел. Гораздо большее значение для формирования окончательного облика и продуктивности полевошпат-

кварцевых тел имеют эпигенетические процессы флюорит-хрусталеобразования. Они отчетливо фиксируются в метасоматитах описываемой группы Казахстана, Тянь-Шаня, Урала и заключаются в образовании наложенных полостей растворения с кристаллами раух-топаза, морнона, горного хрусталя, цитрина, флюорита и апатита.

В кварце полевошпат-кварцевых тел преобладают жидко-газовые и многофазовые включения минералообразующей среды, гомогенизирующиеся в жидкую фазу при температуре 350—375 °С. На декрептограммах кварца наиболее отчетливые максимумы разрывов включений наблюдаются в пределах 100—120, 200—220, 275—320, 375—425 °С. Минералы-спутники представлены каолинитом, пиритом, монтмориллонитом, рутилом, различными слюдами. Агрегаты же пелитоморфных частиц, обычно называемых «соссюритами», «пелитами» и т. п., оказываются состоящими из огромного количества разнообразных минералов, из которых морфологически определяются каолинит, гидрослюды, монтмориллонит и галлазит.

Вторичнокварцитовая формация

Метасоматиты типа вторичных кварцитов содержат значительные запасы свободного кремнезема. Они известны в СССР на Камчатке, Курилах, в Приморье, Забайкалье, Алтае, Саянах, Казахстане, Средней Азии, на Урале, Кавказе, в Закарпатье, а также в Японии, Швеции, США. Казахстан является областью наиболее широкого развития вторичных кварцитов и наибольшего практического значения связанных с ними полезных ископаемых.

К метасоматитам вторичнокварцитовой формации относятся, по обоснованию Н. И. Наковника, не вообще любые окварцованные породы, что характерно также и для продуктов определенных стадий проявления регионального метаморфизма, а только гидротермально-измененные окварцованные породы, представляющие комплекс следующих закономерно сочетающихся минеральных типов—фаций: сернокварцевой, кварцевой («монокварцитов»), корундо-кварцевой, андалузито-кварцевой, диаспоро-кварцевой, алунито-кварцевой, диккито-кварцевой, пирофиллито-кварцевой и серицито (мусковито)-кварцевой. Из этого комплекса фаций кварцевая, андалузито-кварцевая и серицито-кварцевая являются «общими», проявляющимися и в других типах метасоматических и метаморфических образований, а остальные — типоморфными.

Субформациями, определившими выделение вторичных кварцитов в качестве самостоятельной группы метасоматитов и их практическую значимость, являются: медно-молибден-андалузит-корунд-вторичнокварцитовая и колчеданно-вторичнокварцевая. Первая субформация детально изучена в Казахстане, а вторая — на Урале, Кавказе, в Швеции (месторождение Болиден). Во вторичных кварцитах установлено более 25 минералов, главными из которых являются кварц (55—90 %) и серицит (50—55 %), сла-

гающие основную массу породы, рутил (1%), пирит (2%), молибденит (1%), корунд и андалузит (3—4%), встречающиеся в виде примесей. Однако качество кварца, содержащегося в них, не отвечает современным техническим требованиям на высококремнеземистое сырье по нескольким причинам. Основные из них: низкое содержание кварца в породе (обычно 64—76%), недопустимо высокое содержание твердых минеральных примесей и газовой жидких включений и, наконец, тонкозернистость кварцевого материала (0,01—0,4 мм), к тому же насыщенного внутризерновыми технологическими неудаляемыми включениями серицита, рутила, пирита и других вредных минералов-примесей.

По структурным и минералого-химическим особенностям вторичные кварциты в настоящее время не могут рассматриваться в качестве перспективного сырья для производства плавленного кремнезема, оптического стекловарения, синтеза монокристаллов и т. д.

Кварц-пропилитовая формация

В отличие от ранних (сивулканических) пропилитов, связанных с региональным метаморфизмом и имеющих региональное площадное распространение, пропилитизация позднего («рудного») этапа развивается по породам различного исходного состава и происхождения. Наиболее пропилитизированные породы сопровождают определенные типы оловорудных, золото-серебряных и некоторых других месторождений.

Касситерит-сульфидно-кварц-пропилитовая субформация распространена в основном в Боливийском олово-рудном поясе, где насчитывается несколько сотен месторождений и рудопроявлений этой формации, крупнейшими из которых являются Потоси, Льяльягуа, Маракочалла, Оруро, Уауни. В СССР такие месторождения расположены в Приморье, на Северо-Востоке, в Средней Азии. Месторождения рассматриваемой субформации ассоциируют с эффузивами и их туфами, экструзиями и дайками андезитов, риолитов, порфиритов, дацитов и других пород, обнаруживая субвулканический уровень формирования. Рудные тела представлены минерализованными прожилковыми и жильно-прожилковыми зонами дробления, сопровождающимися околорудными зонами пропилитизированных пород.

Месторождения золото-серебряно-кварц-пропилитовой субформации образуются в близповерхностных условиях, связаны с субаэральным вулканизмом и встречаются в различной геотектонической обстановке. Они известны в СССР, Мексике (Пачука, Топопа), США (Крипл-Крик, Теллурид-Силвертс, Голфилд, Комсток), Японии (Кономаи, Титоси, Мотикоси), Филиппинах (Акупан), ЧССР (Кремница), ССР (Сасар) и установлены в вулканогенных поясах альпийской, герцинской складчатости и в областях тектоно-магматической активизации. Их отличительными особенностями являются: 1) генетическая связь с андезито-дацитовым и

основным наземным вулканизмом; 2) широкое развитие предрудной пропилитизации пород и характерные околорудные изменения — окварцевание, адуляризация, серицитизация с развитием гидрослюд и глинистых минералов; 3) сочетание рудоотложения в открытых полостях с метасоматическим замещением. Морфологически месторождения представлены жилами (длина 100—500 м, мощность 1—2 до 15 м), жильными системами (длина 1000—20 000 м, мощность 10—200 м), радиальными и более сложными системами жил, штокверковыми и прожилково-вкрапленными зонами (длина 100—10 000 м, мощность 10—1000 м), метасоматическими залежами неправильной формы.

В жильных телах и системах кварцево-пропилитовой формации, выполняющих зоны дробления, сосредоточены иногда большие запасы кварцевого материала. Из-за значительного количества посторонних минеральных примесей, составляющих зачастую более половины жильной массы внутри тонкозернистого (менее 1 мм) кварцевого агрегата, пропилит-кварцевые тела не могут являться источником высококачественных кварцевых концентратов. Сами кварцевые зерна кроме твердых минеральных примесей содержат массу мельчайших газово-жидких включений, резко снижающих коэффициент его светопропускания и ухудшающих другие свойства.

Кварц-березитовая формация

Березит-лиственитовые метасоматические изменения сопутствуют продуктивным зонам различных типов рудных и нерудных месторождений (молибдена, меди, вольфрама, свинца, цинка, флюорита, барита, золота). На одних месторождениях березиты проявлены неотчетливо (на Човдарском месторождении барита в Азербайджане, Абагайтуйском месторождении флюорита в Забайкалье, на месторождении барита Милчем в штате Невада, США), на других — содержат малое количество кварца в рудных телах (от 3—5 % в жилах молибденит-халькопирит-кварц-березитовой субформации — месторождения Россенское в НРБ, до 30—40 % в жилах золото-антимонит-кварц-березитовой субформации — месторождения СССР) и, наконец, развиты на месторождениях, не играющих практической роли (месторождения Хукамарани в Боливии, Тихишан в КНР гюбнерит-сульфидно-кварцево-березитовой субформации; Фрейберг в ГДР полиметаллически-кварц-березитовой субформации). Более детального рассмотрения заслуживают месторождения золото-кварц-березитовой и золото-сульфидно-кварц-березитовой субформаций в связи с масштабами кварценоности и из-за явных признаков наложенного характера процессов хрусталеобразования и рекристаллизации жильного кварца.

Месторождения золото-кварц-березитовой субформации относятся к глубинным образованиям (более 5 км), распространены достаточно широко, известны в Канаде (Поркьюпайн, Керкенд-

Лейк, Керр-Эдиссон), Австралии (Бендиго, Норсмен, месторождение Голден Майл и другие района Калгурли), Индии (Колар), Зимбабве (Кем-Мотор), Бразилии (Мору-Валью) и США (Мазер-Лод, Материнская жила, Грэсс-Велли, Джуно).

По геотектонической обстановке месторождения данной формации четко подразделяются на две группы: 1) месторождения так называемой «древней золото-кварцевой формации», приуроченные к архейским щитам, и 2) месторождения фанерозойских складчатых областей. Для первых характерны отдельные крупные жилы или жильные системы, седловидные, лестничные и другие типы жил в зонах смятия и рассланцевания, для вторых — жильно-прожилковые и прожилково-вкрапленные зоны. Размеры морфологических систем древней формации колеблются от 100 до 10 тыс. м по протяженности при мощности от 0,1—10 до 20—30 м, а фанерозойской формации — протяженность 10—30 тыс. м, мощность жил 0,1—10 м, жильных систем и зон 100—5000 м. Например, так называемая Материнская кварцевая золотоносная жила в Западной Калифорнии (США) прослеживается по простиранию с небольшими перерывами на 200 км, на десятки километров протягиваются жильные системы в зеленокаменных трогах Канады (месторождение Керкленд-Лейк), Зимбабве (месторождение Кем-Мотор); установленная глубина распространения жил этой формации также значительна — более 1 км на месторождениях Бендиго и Калгурли в Австралии, 1,5 км Материнская жила в Калифорнии, 2,7 км на месторождении Грэсс-Велли (США), более 3 км на месторождениях Морру-Велью (Бразилия) и Колар (Индия).

Месторождения золото-сульфидно-кварц-березитовой субформации по условиям образования относятся к среднеглубинным (1,5—5 км) и известны в СССР (на Енисейском кряже, на Урале, в Восточном Саяне, в Восточном Забайкалье), США (Айдахо-Спрингс, Централ-Сити, Ледвилл, Батл-Маунтин) и других странах. Характерными ее представителями являются золоторудные месторождения на Урале. Абсолютный возраст слюд хрусталеносного гнезда золото-мышьякового месторождения, определенный калий-аргоновым методом, составляет 270 млн. лет, что отвечает, по данным Г. И. Крыловой, Д. М. Белика, Ю. Н. Ануфриева и других исследователей, возрасту образования гнезд на уральских месторождениях горного хрусталя (270—280 млн. лет). Хрусталеносная минерализация на месторождении наложенная. Горный хрусталь обнаружен здесь в рудных и послерудных жилах. Близость минеральных и термодинамических условий преобразования околожильных вмещающих пород, околоснездового кварца и формирования минерального выполнения полостей отражает их единое происхождение и близкое по времени образование.

Жильный кварц рассмотренных субформаций не отличается высоким качеством. Он имеет низкий коэффициент светопропускания (8—18 %), повышенное количество минеральных (до 5—7 тыс. г/т) и элементных примесей (массовое содержание до 0,15—0,20 %).

Однако в совокупности с крупными размерами отдельных тел и месторождений он может представлять определенный промышленный интерес в качестве объектов хонэ- и этэркварца.

Кварц-аргиллизитовая формация

Метасоматиты типа аргиллизитов («гидротермальных глин») сопровождают низкотемпературные близповерхностные месторождения вольфрама, сурьмы, ртути, олова, барита, флюорита, агата, амethystа, относимые к телетермальным. На некоторых месторождениях только отмечаются признаки аргиллизации и она не является ведущим метасоматическим процессом, развиваясь фрагментарно совместно с березитами, листовиитами, пропилиитами и т. п. (Лендер-Каунтин, Блек-Рендж — США, месторождения касситерит-халцедон-аргиллизитовой субформации, Сицилийское — Италия, месторождения кварц-баритовой субформации). К тому же кварц на этих месторождениях обычно не является главным жильным минералом. Поэтому представляется целесообразным сослаться здесь лишь на те субформации, в которых аргиллизация является определяющим метасоматическим процессом, а кварц — доминирующим компонентом жильной массы продуктивных тел. К таким субформациям относятся: 1) ферберит (антимонит)-халцедон (кварц)-аргиллизитовая; 2) киноварь (антимонит, реальгар)-халцедон (кварц)-аргиллизитовая и 3) агат (кварц, амethyst)-аргиллизитовая. Наибольший интерес в смысле кварце- и хрусталеобразования представляют метасоматические изменения агат (кварц, амethyst)-аргиллизитовой субформации, изученной на месторождениях нерудных полезных ископаемых, таких, как амethyst, флюорит, агат, и так называемый агат-переливт. По-видимому, наиболее отчетливо аргиллизация вмещающих пород проявлена на месторождениях Среднего и Южного Урала, представляющих собой минерализованные трещинные зоны в биотитовых гранитах, гнейсах, плагногранитах.

Детально изученными месторождениями этого типа (рис. 7), пользующимися широкой известностью, являются месторождения амethystа Ватиха и агата-переливта Шайтанское. По расчетам Ю. П. Сорокина, для формирования кварцевых жил месторождения Ватиха, венчающих зональность колонки аргиллизации, достаточно того количества кремнезема, которое высвобождается при метасоматозе. Амethystоносные гнезда на Ватихе концентрируются в щелевидных пустотах трещинных зон среди аргиллизитов, существенная часть которых располагается над березитизированными гранитами, что дает основание В. Н. Сазонову и М. Б. Арнштейну рассматривать эти метасоматиты в качестве поскского признака на амethyst.

Агатоносные залежи Шайтанского месторождения имеют сложное строение (см. рис. 7). Существенная часть их представлена зернистым (иногда шестоватым) кварцем, несколько меньшая —

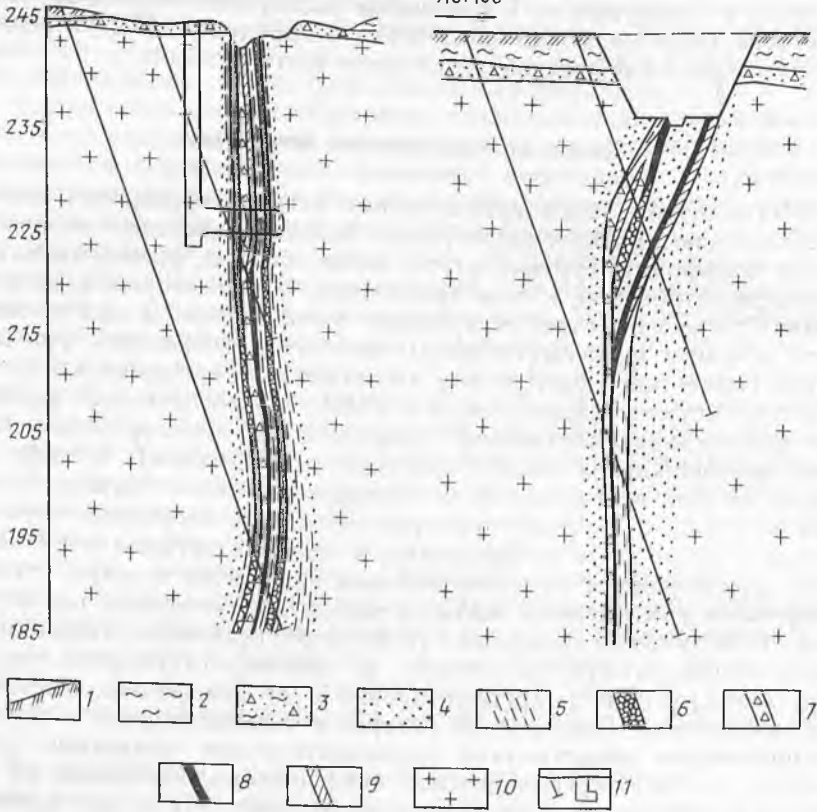


Рис. 7. Геологические разрезы агатоносных жил 3 и 7 Шайтанского месторождения. Средний Урал. По А. Б. Сыркину и др.

1 — почвенно-растительный слой; 2 — суглинки; 3 — элювиально-делювиальные образования; 4 — аргиллизированные биотитовые граниты; 5 — березитизированные биотитовые граниты; 6 — кварц жильный мелко- и среднезернистый; 7 — брекчированный и агат-переливт; 8 — агат-переливт; 9 — фарфоровидный кварц; 10 — биотитовый гранит; 11 — буровые и горные выработки

агат-переливтом и брекчированным агат-переливтом, а также тонкозернистым (фарфоровидным) кварцем, встречающимся на верхних горизонтах «рудоносных» зон. В тонкозернистом фарфоровидном кварце («слоновая кость») устанавливается примесь гидрослюды и глинистых частиц. Масштабы месторождений и кварце-халцедонообразования на них невелики. Однако главный недостаток месторождений данной формации в рассматриваемом аспекте заключается в особенностях структуры слагающих их кварцевых агрегатов и их физико-химических параметрах. Значительная часть рудных или продуктивных тел сложена аморфной или криптокристаллической разновидностью кремнезема (агат, халцедон) и, в меньшей мере, внутри миндалины или жил тонко-, мелкозернис-

тым кварцем, горным хрусталем и аметистом. Кварцевые агрегаты содержат многочисленные минеральные и газово-жидкие включения, препятствующие получению из подобного материала качественных кварцевых концентратов для плавки, варки или синтеза. Содержание SiO_2 изменяется от 96 до 99,3 %, в повышенных количествах содержатся Mg, Al, Fe, потери при прокаливании, обусловленные наличием тонкозернистых включений серицита, хлорита, карбонатов, цеолитов, гидрослюдистых и глинистых минералов, возрастают иногда до нескольких процентов, а один из основных показателей качества кварца — коэффициент светопропускания — имеет очень низкие (1—8 %) значения. Все сказанное позволяет не относить месторождения такого типа к реальным источникам высококачественных материалов, но в то же время считать их важнейшими объектами получения камнесамоцветного сырья.

Джаспероидная формация

Кварцевые метасоматиты типа джаспероидов мало распространены. Достоверно с ними установлена связь ртутно-сурьмяных и золоторудных месторождений соответственно кинноварь-флюорит-антимонит-джаспероидного и золото-реальгар (аурипигмент)-джаспероидного минеральных типов. По данным В. И. Смирнова и других исследователей, ртутно-сурьмяные месторождения кинноварь-флюорит-антимонит-джаспероидного типа широко распространены в СССР в Южном Тянь-Шане. За рубежом они представлены месторождениями Сикуншаньской и Ваншаньской зон на юге КНР и месторождениями в Динаридах Югославии. Типичными объектами на территории Советского Союза являются месторождения в Средней Азии (рис. 8).

В золотодобывающей промышленности США большое значение в последнее время приобрели своеобразные месторождения золото-реальгар (аурипигмент)-джаспероидной минеральной ассоциации, именуемые месторождениями вкрапленного типа. Они представлены пласто- и плитообразными телами и залежами окварцованных пород с тонковкрапленным золотом в существенно карбонатных углеродсодержащих толщах — месторождения Карлин, Кортеп, Гетцелл, Голд-Акрес и др. Эти месторождения, по И. В. Кунаеву, имеют ряд специфических черт, в том числе — парагенезис золота с кварцем, глинисто-гидрослюдистыми минералами и «битумами», отсутствие типичных кварцевожильных выполнений; даже в жильобразных телах, локализованных в трещинных структурах, «жильная» масса представляет собой агрегат субмикроскопического кварца, глинисто-гидрослюдистых минералов и аморфного углерода, являясь результатом метасоматического замещения обломков пород и продуктов их тектонической переработки; для кварцевых выполнений в рудных телах характерна мелкопрожилковая форма.

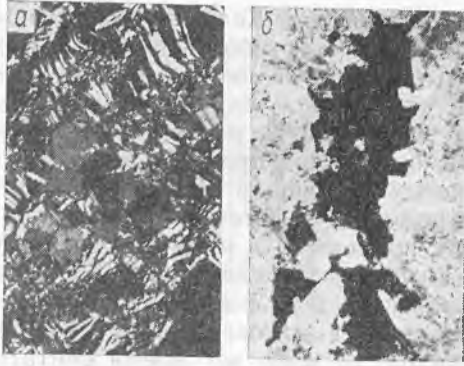


Рис. 8. Структура (а) и характер распределения рудного компонента (б) в джаспероидах формации I.Б.8. Шлифы, увел. 700, николи +. Месторождения Хайдаркан (а) и Кадамджай (б). Средняя Азия

Главными минералами являются: рудные — золото, пирит, реальгар, аурипигмент, антимонит, арсенопирит, галенит, сфалерит, киноварь, магнетит; нерудные — кварц, доломит, кальцит, иллит, монтмориллонит, каолинит, барит, флюорит, углеродистое вещество. Типы гидротермальных изменений — окварцевание (джасперондизация), аргиллизация, кальцитизация. Морфологически месторождения представлены согласными пластообразными залежами, ленто- и жилообразными телами в зонах брекчирования, смятия, надвигов. Протяженность их по простиранию 1—5 тыс. м.

Масштабы процессов кварцеобразования на объектах рассмотренной формации значительны. Однако тонкозернистая и криптокристаллическая структура кварца, постоянный парагенезис и тесные сростания его с серицитом, гидрослюдами, монтмориллонитом, каолинитом, диккитом, флюоритом и другими минералами исключают возможность использования кварца для получения высококачественных и даже рядовых концентратов не только в настоящее время, но и в будущем.

Изложенный материал позволяет сделать следующее заключение.

Постмагматические кварцевые образования таких типичных широко распространенных формаций, как редкометалльно- и хрусталоносно-пегматитовая, силекситовая, кварц-апоскарновая, вторичнокварцитовая, кварцево-пропилитовая, джасперондная и другие, имеют постмагматически-гидротермальное происхождение и возникают в результате кристаллизации при эволюции расплава-раствора.

Кварцевые тела постмагматически-гидротермального класса генетически связаны с плутоническими и вулканоплутоническими комплексами: блоково-кварцевые редкометалльно-пегматитовые — с гнейсо-гранитами, гранодиоритами, гранитами средних и больших глубин древних зеленокаменных поясов и геосинклинальных трогов

(месторождения Хагендорф в ФРГ, Воджина в Австралии, Бикита в Зимбабве, Берник-Лейк в Канаде); ядерно-кварцевые хрусталеносно-пегматитовые — с каледоно-герцинскими постскладчатыми гипабиссальными гранитными или среднепротерозойскими сложными габбро-анортозит-гранитными плутонами (месторождения Казахстана и Украины в СССР; Эспирито-Санта в Бразилии); сплекситовые — с верхнепротерозойскими и герцинскими малоглубинными биотитовыми и аляскитовыми гранитами заключительных стадий магматического цикла (месторождения Урала и Казахстана в СССР, Кассонги в Анголе); скарно-кварцевые — с мезозойскими биотитовыми гранитами и диоритами (месторождения Азегур в Марокко, Янзяолин в КНР); грейзено-кварцевые — с кимберийскими и альпийскими лейкократовыми гранитами (месторождения Маунт-Бишов, Ардистан, Кингсгейт в Австралии); полевошпат-кварцевые — с поздневарисскими гранитоидами (месторождения СССР); вторичнокварцитовые — с раннемезозойско-кайнозойскими вулканоплутоническими комплексами гранодиорит-порфиров и риолитовых порфиров (месторождения в СССР); пропилито-кварцевые — с позднемезозойско-кайнозойским андезитодацитовым и основным наземным вулканизмом (месторождения Потоси, Льялья-Гуа, Оуро в Боливии, Приморья в СССР); березито-кварцевые — с верхнеархейско-нижнепротерозойскими вулканоплутоническими натровыми комплексами и позднепалеозойским инверсионным или раннеорогенным натровым магматизмом; аргиллизито-кварцевые — с позднемезозойско-кайнозойскими излияниями траппов, средних и кислых вулканитов (месторождения синеклизы Парана в Бразилии) или с позднемезозойскими гранитоидами (месторождения Хиллгров в Австралии, Ноцари, Барун-Шивея, Шайтанское, Ватиха в СССР).

Пространственное размещение кварцевых тел постмагматически-гидротермального класса контролируется конфигурацией гидротермальных ореолов плутонов. Они образуются при высоких градиентах температуры и давления, имеют обычно неизофациальные с вмещающими их породами минеральные парагенезисы и сопровождаются отчетливо зональными метасоматитами.

Определяющие рудоконтролирующие факторы для месторождений и проявлений данного класса — магматический и тектонический при заметном влиянии литологического. Метаморфизм может рассматриваться только в качестве фактора возможного последующего преобразования кварцевых тел.

Кварцевые образования рассматриваемого класса отличаются неравномерным распределением минералов-примесей в жильной массе и относительно высоким содержанием основных минеральных компонентов (обычно более 12).

Геохимические особенности кварца постмагматически-гидротермального класса, обусловленные исходным составом флюидов, заключаются в преимущественно хлоридном составе газово-жидких включений или в пониженном (в среднем 2,62 моль/кг H_2O , по данным В. А. Буряка) по сравнению с кварцем ортометаморфического

класса содержания CO_2 в растворах ГЖВ, в высоком общем содержании в кварце элементов-примесей (от 300 до $700 \cdot 10^{-4} \%$ в различных формациях), окрашивающих компонентов ($10-40 \times 10^{-4} \%$), наследуемых из исходного расплава—раствора, повышенном коэффициенте алюминиевости ($K_a=54-80$) и, наоборот, низком коэффициенте щелочности ($K_{щ}=10-40$), титанистости ($K_t=1-2,7$), натриевости ($K_n=0,1-1,7$).

ФОРМАЦИИ И ГЕНОТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕТАМОРФОГЕННОГО КВАРЦА

Месторождения кварца ортометаморфического класса — горного хрусталя, гранулированного, перекристаллизованного кварца — главные источники сырья в СССР для производства прозрачного кварцевого, оптического и другого специального стекла. Учитывая промышленное значение этих месторождений, в книге уделено особое внимание характеристике их геологического строения, генезиса, формационной принадлежности и закономерностям размещения.

Слюдоносно-пегматитовая формация

На протяжении уже более двух столетий слюдоносные пегматиты привлекают пристальное внимание геологов, что обусловлено их научной и практической значимостью. Изучению генезиса пегматитов, закономерностей их размещения, внутреннего строения, описанию слюдоносных провинций, полей и месторождений посвящены труды многих исследователей (К. А. Власова, А. И. Гинзбурга, Г. Г. Родионова, Н. А. Заварицкого, Д. С. Коржинского, В. Д. Никитина, Ю. М. Соколова, А. Е. Ферсмана, Б. М. Шмакина и др.). В общей проблеме изучения и использования слюдоносных пегматитов нас интересуют два момента: первый — происхождение мусковитовых пегматитов и второй — связь с ними кварцевых образований.

Мусковитые пегматиты содержат кварцевые ядра и блоки, встречающиеся, однако, реже, чем в хрусталеносных и редкометалльных пегматитах, некоторые из которых достигают значительных размеров. Генезис слюдоносных пегматитов различными исследователями рассматривается с принципиально отличных позиций: 1) кристаллизация из остаточного постмагматического расплава (П. Ниггли, А. Е. Ферсман); 2) кристаллизация из метаморфогенных расплавов — растворов с последующей перекристаллизацией (Д. А. Великославинский, Ю. М. Соколов, В. А. Глебовицкий); 3) перекристаллизация под воздействием пневматолито-гидротермальных растворов (А. Н. Заварицкий, В. Д. Никитин, С. А. Руденко). Отметим, что в последнее время на основе теорет-

тических представлений Д. С. Коржинского, А. А. Маракушева [25] проведено обобщение огромного эмпирического материала по слюдоносным провинциям мира. Выполнены дополнительные полевые наблюдения и достаточно убедительно показано метаморфогенное происхождение слюдоносных пегматитов [42, 44], отнесенных к образованиям больших глубин (15—25 км) в отличие от среднеглубинных (7—15 км) редкометальных и малоглубинных (1—7 км) хрусталеносных пегматитов.

По данным Ю. М. Соколова и А. Н. Лукашева, в пользу метаморфогенного происхождения слюдоносных пегматитов свидетельствуют: 1) залегание в метаморфических породах, четкая связь с региональными разломами и отсутствие непосредственно установленной генетической связи с определенными гранитными интрузиями; 2) пространственное размещение, согласующееся с зональностью регионального метаморфизма (амфиболитовая фация) или мигматитовых полей; 3) отсутствие промышленных интрамагматических типов мусковитовых пегматитов; 4) равномерное распределение теплового потока, что проявляется в широком развитии высокотемпературных пород (пегматиты, мигматиты) при отсутствии явлений контактового метаморфизма и гидротермалитов в пределах полей, иногда интенсивно насыщенных пегматитами; 5) временное положение слюдоносных пегматитов в истории развития подвижной области определяется периодом проявления складчатости и высокотемпературного регионального метаморфизма; пластовые тела пегматитов нередко смяты в складки (средние этапы развития геосинклиналей); 6) присутствие скианитов (до теплых реликтов) метаморфических пород; 7) сходство особенностей геохимического цикла развития слюдоносных пегматитов с геохимической эволюцией определенных стадий пегматитообразования с *PT*-условиями определенных этапов регионального метаморфизма; 8) размещение слюдоносных пегматитов в зонах кианито-альмандиновой и (в меньшей мере) силлиманито-альмандино-мусковитовой субформациях — кианито-силлиманитового типа метаморфизма; 9) последовательное уменьшение температур вмещающих пород по направлению к пегматитовым телам до минимума в самих телах, что возможно только для областей больших глубин, где пегматитовый флюид может образовываться в процессе метаморфизма самих пород. С учетом этих данных слюдоносные пегматиты рассматриваются в группе метаморфогенных полезных ископаемых, а содержащиеся в них кварцевые ядра и блоки относятся также к метаморфогенным образованиям. На основе конкретных геологических особенностей размещения и строения пегматитовых жил выделена полевошпат-кварц-мусковитовая субформация слюдоносных метаморфогенных пегматитов.

Полевошпат-кварц-мусковитовая субформация является основной субформацией, с которой связаны промышленные скопления мусковита. Наиболее характерными провинциями ее распространения считаются Мамский слюдоносный район Северо-Байкальского нагорья, Северная Карелия, Неллурский и Бихарский пояса Индии

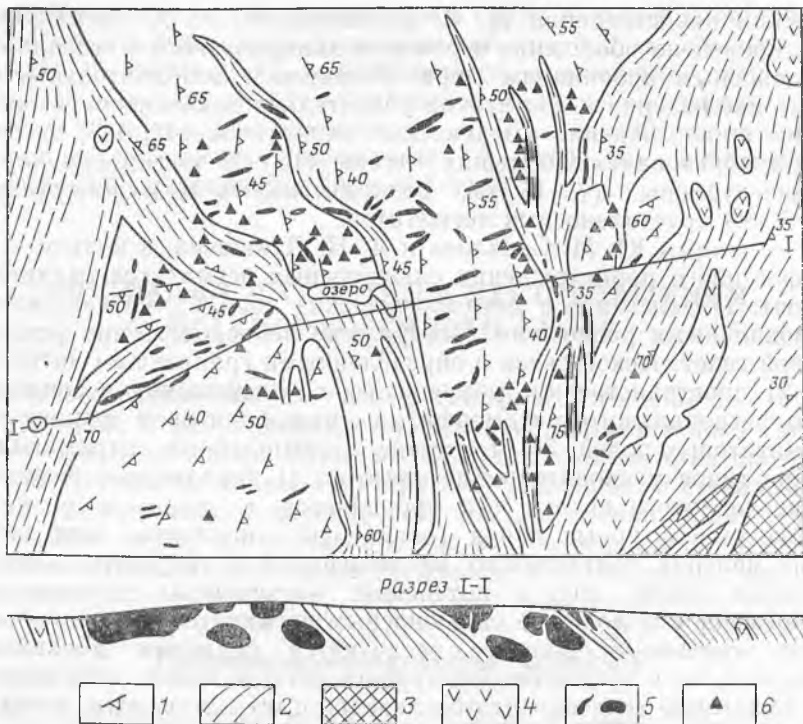


Рис. 9. Геологическое строение месторождения. Карелия. По В. В. Зарубину.
 1 — мелко-среднезернистые глиноземистые гнейсы со слабо выраженной сланцеватостью; 2 — грубозернистые итенсивно рассланцованные гнейсы с дистеном и мусковитом; 3 — биотитовые гнейсы; 4 — перидотиты; 5 — пегматитовые жилы (в плане и в продольном сечении); 6 — кварцевые жилы (силектиты)

(месторождения Талипур, Калактамби), Минас-Жерайский пояс Бразилии, Аппалачский пояс в США.

Слюдоносным пегматитам в целом несвойственно наличие крупных кварцевых ядер, что является следствием их глубинного происхождения [24]. Но иногда и жилы мусковитовых пегматитов имеют довольно значительные скопления первичного кристаллического кварца, встречающиеся практически во всех известных слюдоносных провинциях мира. Так, зональные слюдоносные пегматиты Беломорской провинции привлекают внимание как возможные источники кварцевого сырья [11]. Провинция насчитывает более 8000 пегматитовых тел.

В пределах пегматитовых поясов основные кварцевые обособления сосредоточены главным образом в северо-западной части Беломорской структуры. Здесь зафиксировано наибольшее количество крупных пегматитовых жил (рис. 9).

По результатам прогнозно-оценочных работ 1975—1978 гг. под руководством Н. Б. Турылева кварц пегматитовых жил представ-

лен молочно-белым с участками стекловидного. Пробы, отобранные из выделенных перспективных объектов, показали широкие вариации значений светопропускания (от 20 до 80 %) и суммы элементов-примесей (от $5-7 \cdot 10^{-3}$ до $35 \cdot 10^{-4}$ %). Из проб, отобранных на месторождениях, получено прозрачное стекло, а из него вытянуты кварцевые трубы, соответствующие техническим условиям. По заключению ГОСНИИ кварцевого стекла, жильный кварц ряда пегматитовых объектов Беломорского района может быть использован при производстве труб из прозрачного кварцевого стекла в соответствии с ГОСТом. Здесь необходимо заметить, что количество прозрачного кварца, пригодного для плавки, не превышает нескольких процентов от общей жильной массы. В то же время остальная часть кварца может быть использована для оптического стекловарения, синтеза монокристаллов и других целей. Поэтому необходима комплексная оценка и отработка пегматитовых жил слюдоносной формации.

Диафторез слюдоносных пегматитов. Слюдоносные пегматитовые тела подвергаются воздействию наложенных тектонических и метаморфических процессов уже будучи сформированными геологическими образованиями. Применительно к кварцу, слагающему ядра, оси и блоки, отчетливо фиксируются диафторические преобразования типа рекристаллизации, грануляции и хрусталеобразования (рис. 10, 11). Рекристаллизация хотя и проявлена практически в каждом пегматитовом теле, но масштабы ее развития обычно незначительны и не определяют ни структурно-текстурный облик породы, ни ее генезис и последующие изменения, ни практическую значимость. Напротив, хрусталеобразование и в особенности грануляция кварца распространены достаточно широко и имеют существенное значение в окончательном становлении пегматита и его использовании в промышленности.

Впервые гранулированные пегматиты описал Г. Н. Бунтин вблизи ст. Чула (Северная Карелия). На западном склоне вараки им обнаружены жилы при общем внешнем сходстве которых с обычными пегматитовыми жилами отмечается необычная их особенность: многие жилы в зальбандах, а иногда и в центре заметно осланцованы. Осланцевание создается благодаря ориентированным параллельно гнейсовидности вмещающих пород выделениям серого кварца в розовых или белых полевых шпатах (см. рис. 10). К тому же участки, принимаемые первоначально за гомогенные крупнокусковые выделения розового микроклина, на самом деле состоят из агрегата полевого шпата размером 2—3 мм. Но при этом участки розового и белого вещества часто разграничены прямыми линиями, и контуры их по форме совершенно аналогичны идиоморфным выделениям полевых шпатов. Встречаются реликты перекристаллизованных индивидов микроклина, имеющих одинаковую ориентировку среди гранулированной мелкозернистой массы. Из этого делается вывод о том, что такие жилы подвергались метаморфизму после того, как раскристаллизовался пегматитовый расплав. В перекристаллизованном микроклине при на-

Рис. 10. Зарисовка гранулированного пегматита, Карелия. По Г. Н. Бунтину.

1 — гнейсы; 2 — мелкозернистый гранулированный пегматит; 3 — кварц; 4 — мелкозернистый микроклиновый пегматит

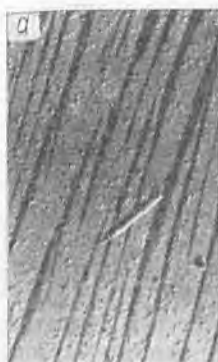
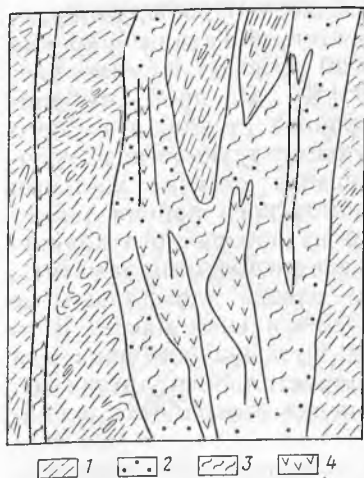


Рис. 11. Поверхность скола (а) и границы зерен гранулированного кварца формации П.А.1 с фигурами природного травления (б), полостями от газожидких включений (в) и аксессуарами роста — растворения (г). Средний Урал. Электронно-микроскопическая фотография угольной реплики. Увел. 12 000

личи очень тонкой двойниковой решетки пертитовые вроски альбита распределяются в виде мельчайших линзочек или капель. В зернах же микроклина, слагающих мелкозернистый агрегат, пертитовые вроски почти отсутствуют. Решетка микроклина очень грубая. Альбит выделяется часто в трещинах на границах различных зерен. Иногда наблюдается, что пертитовый вросок, заключенный в зерне микроклина, доходя до края зерна, образует ответвления по границе материнского зерна с соседними. Указанные обстоятельства позволяют говорить о том, что при перекристаллизации (грануляции. — Е.М.) крупнокускового пегматитового агрегата альбит пертитовых вросков выделяется из микроклина и вытесняется в промежутки и трещинки между его зернами, т. е. идет природный процесс очищения первичных зерен минералов под воздействием последующих тектоно-метаморфических процессов, в частности — грануляции. В этих же пегматитах Г. Н. Бунтиным отмечена грануляция плагноклазов, мусковита, турмалина и кварца. Явления грануляции в пегматитах Карелии фиксировались К. А. Шуркиным, Ю. М. Соколовым — для микроклина из пегматитов Восточной Сибири, В. В. Гордиенко — для плагноклазов, сподумена и берилла из пегматитов Кольского полуострова, А. С. Никаноровым и И. И. Михайловым — для микроклина, плагноклазов, мусковита и кварца пегматитов Карело-Кольского региона, Г. Н. Вертушковым, Э. Ф. Емлинным, Г. Ф. Зверевой, Е. П. Мельниковым, О. А. Суставовым, Г. А. Синкевичем, А. А. Щеколдинным, В. И. Якиншиным [14, 26, 31] и другими исследователями — для кварцевых и пегматитовых жил Урала.

Для всех минералов оказывается справедливым правило: грануляция сопровождается тенденцией к обособлению чистых фаз, так же, как это происходит при процессах температурных и механических воздействий на слитки металлов, детально изученных металлургами. Этот процесс относится нами к явлениям автолизии.

Процессы грануляции в гнейсово-мigmatитовых комплексах Урала проявлены не только в кварцевых жилах, а имеют широкое распространение и отчетливо фиксируются в слюдоносных пегматитах, гранитоидных образованиях и во вмещающих их гнейсах, амфиболитах и кристаллических сланцах. Пространственно гранулированные породы различного состава совпадают с зонами бластомилонитов и бластокатаклазитов [23, 26].

Генотипом месторождений слюдоносных пегматитов, подвергшихся процессам интенсивной грануляции, может служить месторождение мусковита на Среднем Урале [44], известное с 1883 г. Но эти процессы развиты и на других уральских месторождениях слюды-мусковита в Уфалейском, Сысертско-Ильменогорском, Мариинском и других комплексах. Практически весь кварц, встречающийся в слюдоносных пегматитах месторождения-генотипа в виде блоков, ядер и обособлений более сложной формы, представляет собой равномерно гранулированный агрегат с размерами зерен 1—2 мм характерной гранобластовой структуры (рис. 12). Редкие исключения представляют непереработанные участки первичного

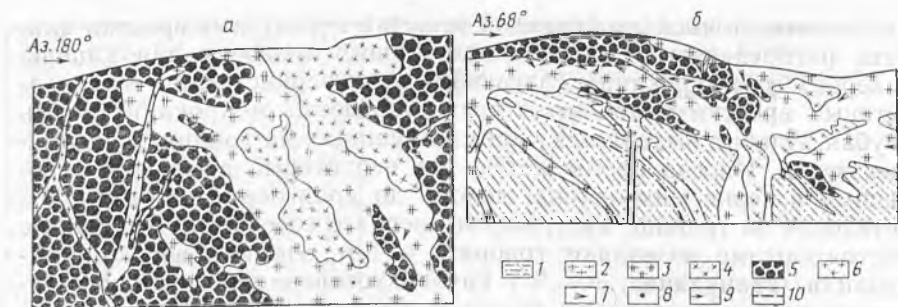


Рис. 12. Строение пегматитовых жил месторождений слюды — мусковита с блоками гранулированного кварца. Средний Урал.

a — зарисовка стенки карьера; *b* — зарисовка забоя очистного блока. 1 — биотитизированные амфиболиты и амфиболовые гнейсы; 2 — гранито-гнейсы биотитовые; 3 — пегматит пегматитовой структуры; 4 — пегматит блоково-диабластической структуры с гранулированным кварцем и плагиоклазом; 5 — гранулированный кварц; 6 — лейкократовый, гранит мусковитовый порфиридовый; 7 — кристаллы мусковита; 8 — кристаллы апатита; 9 — направление погружения линейности; 10 — тектоническое нарушение

стекловидного кварца размером 2×3 см или прожилки более позднего кварца. В гранулированном кварце пегматитов преобладают удлиненно-овальные или сглаженно-угловатые формы с округлыми контурами границ, отчетливо ориентированные в направлении погружения линейности («*v*» — составляющая структурных координат) вмещающих гнейсов и мигматитов с хорошо выраженным поясом «*ас*».

Такие структурные особенности пегматитов, представляющих собой типичные тектониты, свидетельствуют об их тектоно-метаморфических преобразованиях в условиях бокового субширотного сжатия, перпендикулярного к простиранию структур. В гранулированном кварце из пегматитовых жил месторождения мусковита на Среднем Урале Г. Ф. Зверевой описано расположение в нем энантиоморфных групп кварца, отражающих размеры и строение исходных индивидов, подвергшихся грануляции. В этих же пегматитовых жилах нами обнаружена грануляция плагиоклазов, превращенных в большинстве случаев, как и кварц, в мелкозернистый (1—2 мм) агрегат с сохранением реликтов (фрагментов) исходных кристаллов альбит-олигоклаза размером до 3×4 см в центральных частях полевошпатовых обособлений. Так же как и в пегматитах, во вмещающих породах наблюдается грануляция очков микроклина и плагиоклаза, а большинство гнейсов и гранито-гнейсов приобретает гранулитоподобный облик и обладают определенной оптической ориентировкой типа *B*- или *B+S*-тектонита. Подобную оптическую ориентировку с несколько более сложным рисунком обнаруживает и кварц в пегматитовых жилах и жилах гранулированного кварца, в которых оптические оси кварца ориентированы в направлении склонения этих жил (азимут 130° , угол $20\text{—}30^\circ$), совпадающего с линейностью и общим погружением в этом направлении оси главной антиклинали (рис. 13). Регионально рас-

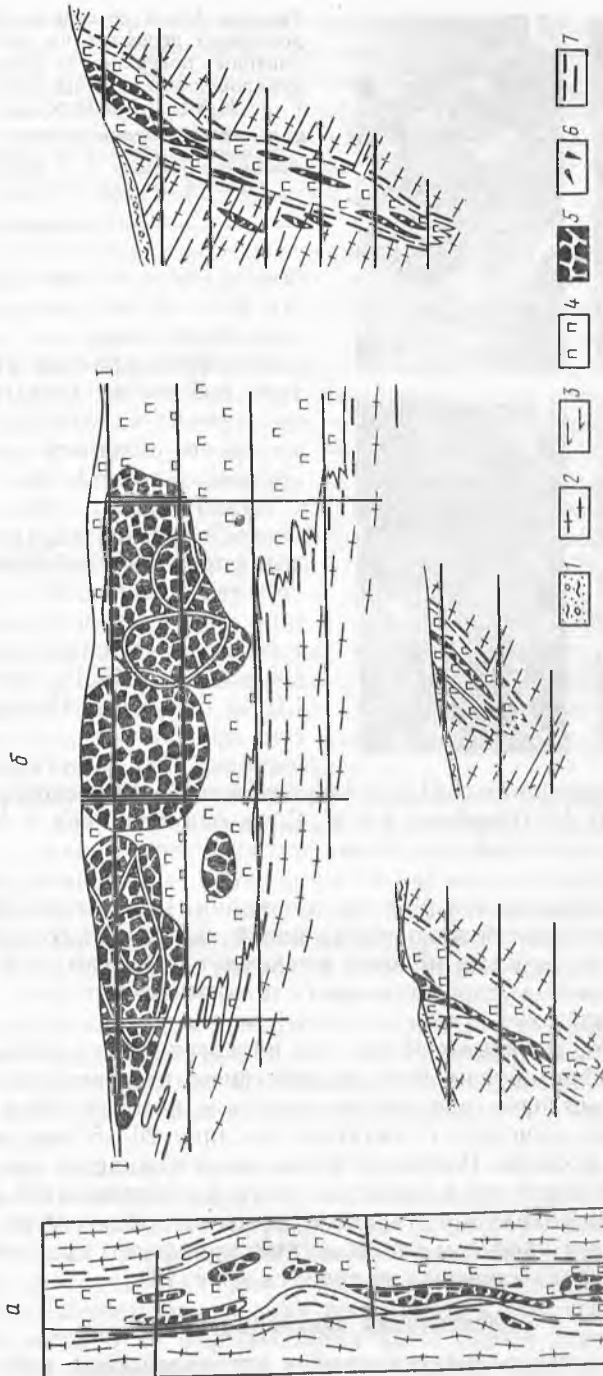


Рис. 13. Схема геологического строения (а) и разрезы месторождения (б) слюдяных пегматитов, Урал.

1 — элювиально-делювиальные отложения; 2 — двухстадийные гранито-гнейсы; 3 — амфиболовые гнейсы; 4 — пегматиты; 5 — гранулированный кварц ядерных и блоковых обособлений; 6 — кристаллы мусковита; 7 — зона биотитизации вмещающих пород

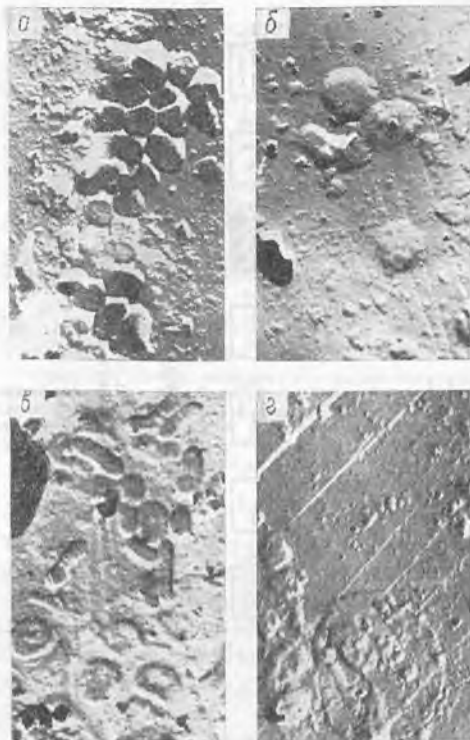


Рис. 14. Характер скопленений опаловидного вещества на регенерированных поверхностях скола гранулированного кварца формации П.А.1. Средний Урал.

а, в — обособленные выделения; б, г — отложения на поверхности. Электронно-микроскопическая фотография угольной реплики. Увел. 12 000

пространенная в южной части Уфалейского комплекса «аплитовидная», т. е. панидноморфнозернистая структура различных горных пород, очевидно, обязана своим происхождением именно процессам грануляции.

Наложенная хрусталеносность также характерна для формации слюдоносных пегматитов. Полости с горным хрусталем встречаются в большинстве слюдоносных провинций СССР, Индии, США, Бразилии. Особенности проявлений хрусталеносности в классических

слюдоносных провинциях — Мамско-Чуйской и Беломорской отражены в трудах Б. П. Шмакина, Ю. М. Соколова и др. Так, в Мамско-Чуйской слюдоносной провинции пегматитовые жилы с хрусталеносными полостями составляют порядка 1% от общего количества жил, но встречаются по всей провинции. Полевыми наблюдениями устанавливается явно наложенный характер хрусталеобразования: хрусталеносные полости имеются только там, где развита промышленная мусковитоносность и проявлена поздняя минеральная ассоциация — альбит, зеленый мусковит, колумбит, галенит и др. Б. М. Шмакин считает, что интенсивные процессы изменения пегматитов обусловлены воздействием наложенных гидротермальных растворов, единых для всех генетических типов пегматитов. Крупные кристаллы достигают в длину 20—50 см, обычные их размеры 5×2 см. Рост кристаллов сопровождается отложениями альбита и серицита в полостях, часто фиксирующихся в виде «присыпок» на гранях кристаллов и по зонам роста внутри них, а завершаются эти процессы отложениями аморфного кремнезема на плоскостях соприкосновения индивидов (рис. 14).

Силектитовая формация

Подобно тому как редкометалльные и хрусталеносные пегматиты магматогенного происхождения сопровождаются существенно

кварцевыми образованиями типа силекситов, охарактеризованных выше, так и слюдоносным пегматитам метаморфогенного генезиса сопутствуют тела преимущественно кварцевого состава, которые мы предлагаем именовать, в отличие от кварцевых тел предыдущей группы, силектитами, во избежание их необоснованного объединения и с целью отражения их различия в генезисе, условиях залегания, свойствах, времени образования и практическом использовании.

Метаморфогенные существенно кварцевые пегматиты (силектиты) встречаются практически во всех слюдоносных провинциях мира: в Индии, Аппалачах [50], Северо-Байкальском нагорье и Северо-Западном Прибайкалье, Карелии и Кольском полуострове, на Среднем Урале [44], в Мугоджарах [22]. По сведениям журнала «Indian Minerals», многочисленные тела силектитов отмечаются в пределах Неллурского и Майсорского поясов слюдоносных и редкометалльно-слюдоносных пегматитов. Некоторые тела обрабатываются. Геологическими, металлогеническими и метаморфическими [6] исследованиями, а также специализированным изучением кварценосности Северо-Байкальской провинции (материалы ВНИИСИМСа и экспедиции «Байкалкварцсамоцветы») установлены особенности минерогенезиса отдельных ее зон в зависимости от интенсивности развития в них процессов метаморфизма. Считается, что главной структурой, контролирующей магматизм, метаморфизм и образование различных полезных ископаемых в Байкало-Патомском районе является система глубинных разломов краевого шва древней Сибирской платформы, отделяющая от нее Байкало-Саянскую складчатую область.

Главные черты минерогенезиса провинции заключаются в том, что: 1) в центральной ее зоне, претерпевшей метаморфизм в условиях амфиболитовой и гранулитовой фаций с явлениями палингенеза и ультраметаморфизма, распространены слюдоносные, редкометалльные пегматиты, силекситы (и/или силектиты в нашем понимании. — Е.М.); 2) во второй (к периферии) зоне, испытавшей метаморфизм на уровне эпидот-амфиболитовой фации, проявлено высокотемпературное пневматолито-гидротермальное редкометалльное оруденение; 3) в следующей периферийной зоне, метаморфизованной в условиях фации зеленых сланцев, известны золото-колчеданные проявления; 4) наконец, в самой внешней зоне неметаморфизованных пород развито телетермальное свинцово-цинковое оруденение.

У. Ж. Миллером подробно изучены пегматиты и кварцевые образования северной части штата Нью-Йорк (район Лайон Маунтин, США), развитые в гренвилльских роговообманковых гнейсах (метагаббро), кварцито-гнейсах и блотитовых гранито-гнейсах, и убедительно показано, что силектитовые тела представляют собой высококремнеземистые фации пегматитов и что они начали развиваться задолго до формирования даже самых ранних пегматитов [50]. Этот вывод является принципиальным, подтверждающим генетические и временные отличия силекситов и силектитов.

Биотит (сфен, апатит)-микроклин-кварцевая субформация. Силектиты биотит-микроклин-кварцевой формации фиксируются во многих слюдоносных полях и провинциях. Они могут сохранять черты первичных индивидов, слагающих жилы и тела неправильной формы, или быть в различной степени изменены наложенными процессами. Особенности и свойства слабо измененных силектитов отчетливо выявляются на примере месторождения Беломорской провинции. Для Карело-Кольского региона отмечается не только развитие самостоятельных кварцево-жильных полей, но и образование существеннокварцевых тел (силектитов.—*Е.М.*), пространственно совмещенных с площадями крупных пегматитовых месторождений слюды — мусковита и керамического сырья.

Количество силектитовых жил в пределах пегматитовых месторождений составляет не более 2 % от всего количества жильных тел. Существенно кварцевые жилы как бы фиксируют фланги промышленно-слюдоносных пегматитовых зон или (реже) залегают внутри слюдоносных зон, узлов и участков (см. рис. 9). Длина жил не превышает 15—20 м, мощность до 2 м. Сложены они, так же как и кварцевые ядра и блоки пегматитов, бледно-розовым кварцем. Иногда вокруг силектитовых тел удается наблюдать оторочку мощностью до 0,3 м из микроклина, плагиоклаза и крупнопластинчатого биотита. По физико-химическим свойствам кварц силектитов близок к блоковому кварцу слюдоносных пегматитов.

Из процессов диафореза в телах силектитов устанавливаются дислокационные изменения, развивающиеся фрагментарно в некоторых телах и не играющие существенной роли, и процессы грануляции, проявленные иногда чрезвычайно интенсивно и полностью определяющие структурно-текстурный и минералого-петрографический облик жил, превращенных в результате во вторичной зернистый агрегат — гранулированный кварц. Хрусталеобразование не отмечается. Грануляция силектитов, связанных с пегматитами слюдоносной формации, широко проявлена в Мугоджарах, где она описана В. Б. Леухом и В. М. Смертенко [22] на позднедокембрийских месторождениях гранулированного кварца. Эти образования традиционно именуется В. Б. Леухом и В. М. Смертенко силекситами и вместе с пегматитами слюдоносной формации относятся к магматогенным образованиям. Мы считаем более обоснованным их метаморфическое происхождение.

В Мугоджарах силектиты образуют несколько полей и месторождений. Основной характерной чертой внутреннего строения силектитовых жил является зональность. Мономинеральные кварцевые пегматиты следует рассматривать как исключение. Почти всем силектитам свойственно развитие краевых и реже осевых зон кварц-микроклинового или микроклинового состава. Суммарная доля их в объеме жил не превышает 15 %. Кварцевые оси (ядра) занимают большую центральную часть силектитов. В пределах одного из месторождений они составляют 90—95 % объема жильных тел, на площади другого поля — от 85 до 90 %. Контакты кварцевых ядер с кварц-микроклиновыми и микроклиновыми зонами

четкие, резкие, извилистые. Различаются две основных генерации кварца ядер силектитовых жил. Первая генерация — реликтовый крупно- и гигантокристаллический кварц ядра массивной текстуры. Наблюдается в единичных силектитовых телах, где он слагает мелкие обособленные участки кварцевых ядер (осей). Доля реликтового кварца в объеме ядер силектитов месторождений не превышает 3—5%. Реликтовый кварц представляет собой агрегат индивидуализированных выделений обычно вытянутой и неясно ограниченной формы. Окраска его молочно-белая и серовато-белая, обусловленная большим количеством газовой-жидких включений и густой полигональной сетью залеченных трещин. Размеры индивидов реликтового кварца по длинной оси большей частью варьируют в пределах 2—15 см. В шлифах кварца этой генерации обнаружены рассеянные мелкие (до 1 мм) и малочисленные (сотые доли процента) включения альбита, биотита, сфена, апатита, серицита и циркона. В реликтовом кварце наблюдаются разрозненные гранулы кварца последующих генераций. Вторая генерация — глубоко метаморфизованный зернистый (гранулированный) кварц — преобладает в составе силектитовых жил, занимая обычно более 98% объема их ядер. По сравнению с реликтовым кварцем в гранулированном резко уменьшается содержание газовой-жидких включений. Сохранившиеся вакуоли размещаются главным образом в залеченных трещинах. Многие зерна совершенно лишены дефектов. Б. А. Дороговым, В. Б. Лекухом, В. М. Смертенко и Э. М. Ташкером в силектитах установлены газовой-жидкие включения, 70—95% объема которых занимает газовая фаза. Гомогенизация систем таких вакуолей происходит при температурах 475—535 °С, что близко к термодинамическому уровню эпидот-амфиболитовой фации. Очень редко фиксируются единичные мелкие (0,009 мм) раскристаллизованные включения с неправильным газовым пузырьком уплощенной формы, относящиеся по систематике [12] к классу кристалло-флюидных. Температуры гомогенизации затвердевших включений лежат за пределами 700 °С. Все эти факты наряду с геологическими служат доказательством пегматитового происхождения силектитов. Генетическим и промышленным этапом кварцевых образований рассматриваемого типа следует считать детально исследованные силектиты из месторождений на Среднем Урале [26, 41].

Прежде чем непосредственно перейти к характеристике силектитов, составляющих только часть промышленных объектов месторождения, приведем необходимые сведения о геологии месторождения и типичного гнейсо-мигматитового комплекса, являющихся генотипами месторождений гранулированного кварца и комплексов структурно-минерогенических единиц подвижных поясов с разнообразными метаморфогенными типами полезных ископаемых, в том числе с гранулированным кварцем в пегматитах, силектитах и кварцевых жилах [17, 26—30, 44, 45].

Краткий геологический очерк Уфалейского гнейсо-мигматитового комплекса. Уфалейский комплекс образует в тектоническом от-

ношении одноименный антиклинорий, составляющий часть Уралауского мегантиклинория, входящего в Центрально-Уральское поднятие. На западе Уфалейский антиклинорий граничит с Тараташским антиклинорием, отделяясь от него региональным тектоническим нарушением. Восточной границей комплекса является Главный Уральский глубинный разлом, отчленяющий комплекс от осадочно-вулканогенных толщ Тагильско-Магнитогорского прогиба. В Уфалейском комплексе, так же как и в других аналогичных комплексах Урала (Салдинском, Сысертском, Харбейском), выделяются две главные структурные и, соответственно, стратиграфические единицы: брахиформное гнейсовое ядро, сложенное породами уфалейской свиты, и конформно окружающее его сланцевое обрамление, представленное породами ордовикской серии с простой линейной складчатостью. Горизонтальное или близкое к нему положение осевых поверхностей изоклинальных складок и кристаллизационной сланцеватости в сводовых частях гнейсовых куполов, форма разделяющих их синклинорных зон, соотношение гнейсовых ядер со сланцевым обрамлением и ряд других особенностей указывают на существенную роль в развитии гнейсо-мигматитовых комплексов вертикального перемещения пластических масс, носящего диапироидный характер. Еще одна отличительная особенность геологии Уфалейского комплекса — наличие ряда долгоживущих тектонически подвижных зон, в пределах которых чрезвычайно интенсивно проявлены пликативные (изоклинальная и асимметричная складчатость, плейчатость) и дизъюнктивные (трещиноватость, расслапцевание, катаклаз, милонитизация) дислокации. Одна из таких зон пространственно совпадает с контактом гнейсового ядра и сланцевого обрамления и, очевидно, обязана своим происхождением в основном диапироидному воздействию гнейсового ядра. Две других крупных зоны, фиксирующиеся в центральной и восточной частях сланцевого обрамления, сформировались главным образом в результате взаимодействия Уфалейского гнейсового комплекса с Главным Уральским глубинным разломом, отчленяющим его от палеозойской эвгеосинклинальной области. Их совокупность составляет в целом зону смятия Главного Уральского глубинного разлома. Специфика формирования Уфалейского гнейсо-мигматитового комплекса наложила свой отпечаток и на характер проявившихся в его пределах метаморфических процессов. Метаморфизм пород рассматриваемого комплекса, имеющего зональный характер, достигает в его ядре термодинамического уровня амфиболитовой фации, а местами и низшей субфации гранулированной фации [16, 17, 18, 27], развиваясь на фоне зеленосланцевого метаморфизма общеуральских региональных поднятий. В Уфалейском комплексе отчетливо наблюдается спад интенсивности метаморфизма от гнейсового ядра к периферии. При этом достаточно ясно обнаруживается концентрическая метаморфическая зональность с приуроченностью относительно низкотемпературных фаций к сланцевому обрамлению комплекса, а высокотемпературных — к гнейсовому ядру (рис. 15).

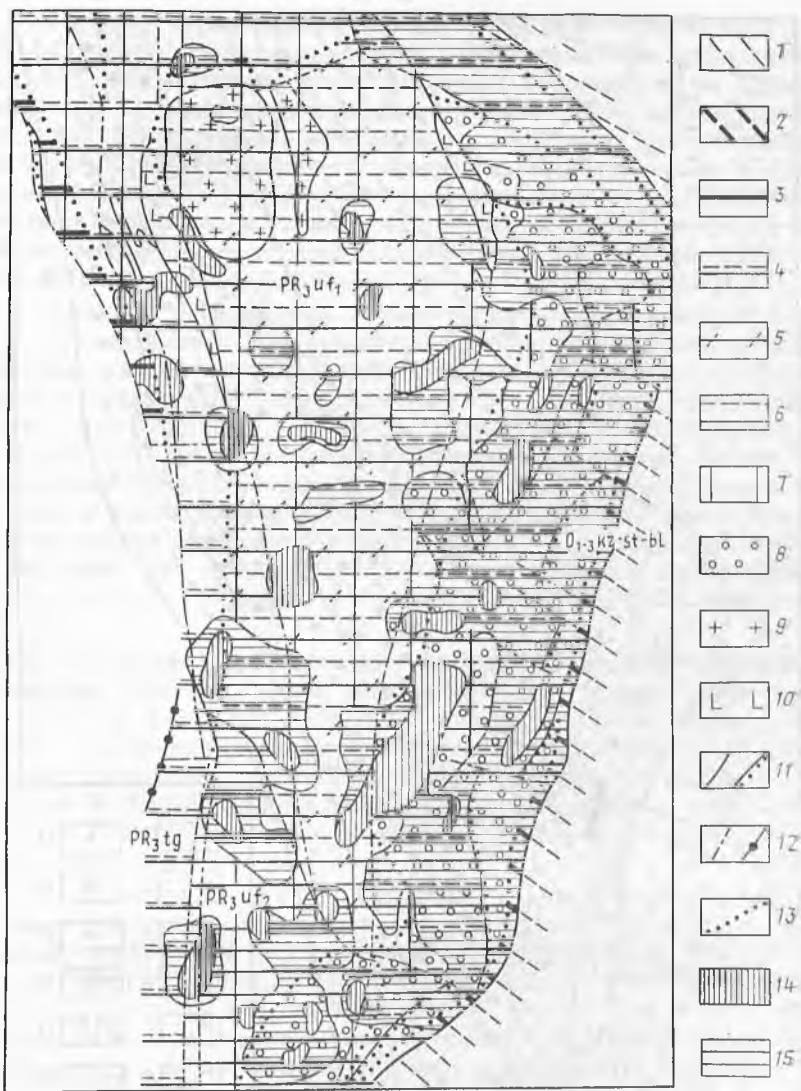
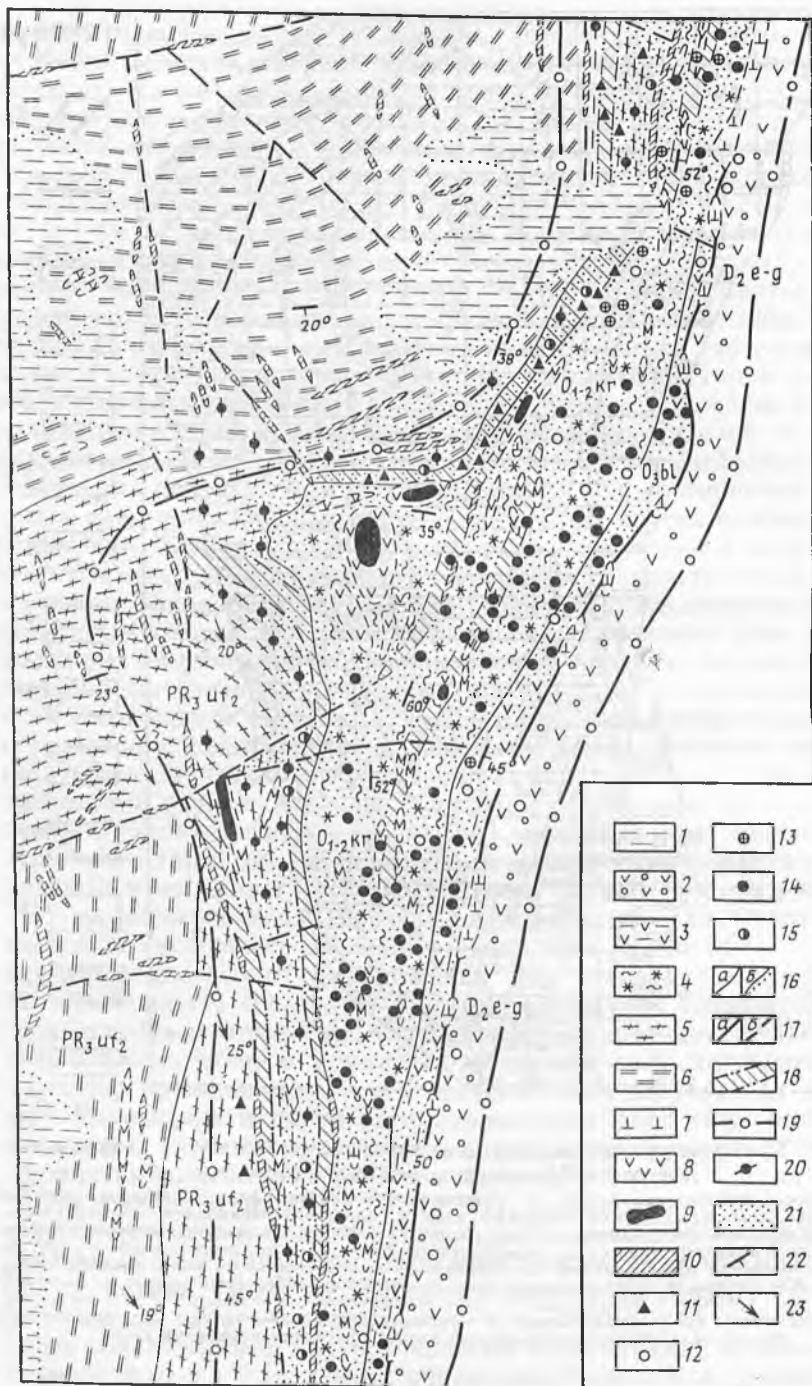


Рис. 15. Пространственное распределение типов гранулированного кварца в южной части Уфалейского гнейсового комплекса.

1 — эпидот-амфиболитовая фация; 2 — лавсонит-глаукофановая фация; средненалеозойский полифациальный метаморфизм гнейсового ядра и сланцевого обрамления; 3 — зеленосланцевая фация; 4 — эпидот-амфиболитовая фация; 5 — фация дистен-мусковитовых сланцев; 6 — фация дистеновых гнейсов и амфиболитовая фация; 7 — позднепротерозойско-кембрийский метаморфизм амфиболитовой и гранулитовой фаций гнейсового ядра; 8 — зона диапиреза; 9 — граниты и плагногранулиты; 10 — габбро, габбро-амфиболиты; 11 — стратиграфические границы (нормальные и стратиграфически несогласные); 12 — тектонические нарушения; 13 — предполагаемые; 14 — микрогранулированный кварц; 15 — гранулированный кварц



Кроме того, метаморфизм нижнего и верхнего структурных этажей отличается своим градиентом, выражающимся в различной быстроте смены метаморфических фаций в пространстве. Породы гнейсового ядра по всей площади развития (1000 км²) испытали более или менее ровный метаморфизм в условиях высшей субфации амфиболитовой фации. В противоположность этому в сланцевом обрамлении вкрест общего простирания структур на сравнительно коротком расстоянии (1—4 км) наблюдается смена фаций метаморфизма — от амфиболитовой во внутренних частях до зеленосланцевой во внешних.

В процессе становления гнейсо-мигматитового комплекса наряду с региональным метаморфизмом широкое развитие на определенных этапах получали метасоматические процессы, выразившиеся в плагиогранитизации, достигавшей максимума в сводовых частях куполовидных структур, кислотном выщелачивании и Fe-Mg-метасоматозе, приуроченном к периферическим частям антиклинория и тектонически ослабленным зонам. Геологические материалы и радиогеохронологические данные определения абсолютного возраста гранитоидов и пород субстрата в интервале от 1215 до 252 млн. лет свидетельствуют о длительном и многоэтапном формировании Уфалейского гнейсо-мигматитового комплекса [17, 18].

Геологическая характеристика месторождений гранулированного кварца. Месторождение, рассматриваемое в настоящей работе, является формационным генотипом и эталоном. Известны и другие проявления жильного кварца, приуроченные к крыльям брахиантиклиналей пегматитовых комплексов. Структурное положение и геологическое строение месторождений и проявлений в общих чертах идентичны, и в их размещении проявляются общие закономерности (рис. 16).

Литология и стратиграфия. Породы, развитые в районе месторождений, относятся к четырем свитам: уфалейской, куртинской, шайтанской и билимбаевской. Образования уфалейской свиты слагают западные части месторождений гранулированного кварца. Остальные три свиты развиты в центре и на востоке этих месторождений. Детальным картированием путем прослеживания маркирующих пластов зафиксировано азимутальное и угловое не-

Рис. 16. Геологическое строение месторождения гранулированного кварца:

1 — рыхлые отложения; 2 — порфиры, туфы; 3 — зеленые сланцы; 4 — кристаллические сланцы и кварциты; 5 — амфиболиты, кварциты, мигматиты; 6 — гнейсы, гранито-гнейсы; 7 — гипербазиты; 8 — цоизит-гранатовые амфиболиты; 9 — эклогиты; 10 — гранитоиды; 11 — мусковитовые пегматиты; 12 — кварц крупно-, гигантозернистый молочно-белый; 13 — кварц гигантозернистый стекловидный; 14 — гранулированный крупно-, среднезернистый кварц; 15 — микрогранулированный кварц; 16 — стратиграфические границы; а — согласные, б — несогласные; 17 — тектонические нарушения; а — установленные, б — предполагаемые; 18 — тектонически подвижные зоны; 19 — границы интенсивного смятия пород, бластомилонитизации и грануляции; 20 — зоны мигматизации; 21 — зона кислотного выщелачивания; 22 — элементы залегания кристаллизационной сланцеватости; 23 — ориентировка линейности

согласие образований ордовика и верхнего протерозоя, выражающееся в налегании одного горизонта куртинской свиты на разные горизонты теплогорской толщи уфалейской свиты, и установлено более пологое залегание пород гнейсового ядра по отношению к сланцевому обрамлению.

Геологическими методами с применением метода многократной статистической корреляции (при помощи ЭВМ) рассеянных элементов определена первичная природа пород рассматриваемого комплекса. Нижняя часть разреза уфалейской свиты (сгустинская подсвита и беркутинская толща слюдяногорской подсвиты) представлена преимущественно первично-вулканогенными образованиями основного (амфиболиты, амфиболовые и биотит-амфиболовые гнейсы) и кислого (двусланцевые гнейсы) состава, тогда как для ее верхов (теплогорская толща) характерно наличие существенной (около 25 %) примеси первично-осадочного материала (кварциты, слюдяно-кварцевые сланцы, биотит-мусковитовые гранито-гнейсы), находящегося в частом и тонком переслаивании с породами вулканогенного генезиса. Ордовикская серия представляет собой мощную толщу первично-осадочных (терригенных) образований, в верхах которой резко возрастает роль вулканогенного материала (зеленые сланцы билимбаевской свиты).

Тектоника. Наиболее крупная структура комплекса — Кизильская антиклиналь, представляющая структуру второго порядка по отношению к Уфалейскому антиклинорию и четвертого — в целом для Уральского складчатого пояса. Главной структурой района месторождения является поперечная синклиральная складка, осложняющая восточное крыло Кизильской антиклинали (см. рис. 16). Характерная структурная черта Уфалейского метаморфического комплекса — это широкое развитие складчатости с амплитудой и размахом крыльев от 1—2 см до первых десятков метров.

Детальным геологическим картированием на месторождении выявлено несколько крупных субмеридиональных сбросо-сдвигов, а также целая серия поперечных разрывных тектонических нарушений, являющихся, как и в целом для Уфалейского антиклинория, шарпирными сбросами. Значительная часть Уфалейского гнейсового комплекса, где расположены месторождения гранулированного кварца, представляет собой систему сближенных тектонически подвижных зон. Этим обуславливается фактическая объемная пликативно-дизъюнктивная деформация толщи сланцевого обрамления и прилегающей части гнейсового ядра, составляющих в целом зону смятия Главного Уральского разлома, отвечающую джагдинскому типу [15, 23, 26, 31]. Наряду с широким проявлением трещиноватости и разноамплитудной складчатости и гофрировки, в пределах зоны смятия Главного Уральского разлома наблюдается интенсивное развитие рассланцевания, катаклаза, бластомилонитизации и объемной грануляции пород, кварцевых, слюдоносных и гранитоидных жил. Именно это явилось одним из необходимых условий формирования здесь месторождений нового ви-

да минерального сырья — гранулированного кварца, сосредоточенного в пегматитовых, силектитовых и кварцевых жилах.

Развитие ярко выраженной минеральной структурной линейности всех пород метаморфического комплекса, погружающейся на юго-восток ($100\text{—}140^\circ$) под углом $15\text{—}40^\circ$, совпадающей с осью «в» структурных координат и параллельной шарнирам крупных складчатых структур, также характерно для описываемой зоны.

При разведке пегматитовых, силектитовых и кварцевых жил было установлено, что они также склоняются на юго-восток под углами, соответствующими погружению линейности. Этой же закономерности подчиняется и ориентировка оптических осей кварца и других минералов из вмещающих пород и жильных образований месторождений гранулированного кварца данной группы. Трещиноватость месторождения чрезвычайно разнообразна. Анализ круговых диаграмм массовых замеров элементов залегания кварцевых жил и тектонических трещин показывает, что характер тектонической трещиноватости горных пород гнейсового ядра и сланцевого обрамления имеет существенные различия. Для диаграмм сланцевого обрамления наиболее типичным является наличие поясового максимума, на диаграммах гнейсового ядра отмечается четкое полярное расположение максимумов. На этих же диаграммах отчетливо видно, что жилы гранулированного кварца залегают преимущественно согласно с вмещающими породами по простиранию и по падению. Для площади месторождения лишь 8,3% от общего количества кварцевых жил являются несогласными с вмещающими породами.

Изучение круговых диаграмм трещин гнейсового ядра и сланцевого обрамления обнаруживает: 1) более сложный (не менее чем двукратный) план тектонической деформации пород нижнего структурного этажа с направлением приложения сжимающих усилий близким к вертикальному, что подтверждает диапирондный характер перемещения пластических масс на первом этапе диастрофизма); 2) относительно простую одноактную региональную деформацию пород сланцевого обрамления вместе с расположенными в них кварцевыми жилами при преобладающем субтангенциальном приложении сжимающих усилий во время второго этапа диастрофизма.

Метаморфизм. Все геологические образования района представляют собой в различной степени метаморфизованные породы (см. рис. 15). В последнее время накапливается все больше данных о полихронном — многоэтапном формировании метаморфических комплексов различных типов — от гнейсо-мигматитовых до эклогит-глаукофановых. Особенно ярко это явление прослеживается в гнейсо-мигматитовых комплексах подвижных поясов. В строении этих комплексов выделяется два главных структурных элемента: гнейсовое ядро, представляющее мобилизованный блок кристаллического основания, и сланцевое обрамление — геосинклинальные серии, претерпевшие термальное и динамическое воздействие диапирондно перемещающегося гнейсового ядра [16, 17].

Фактическим материалом при изучении вопросов фациального уровня и термодинамических условий метаморфических преобразований, происходивших в гнейсо-мигматитовых комплексах Урала, послужили данные по химическому составу и физическим свойствам минералов переменного состава: гранатов, амфиболов, биотитов, полевых шпатов, мусковитов и других, а также исследование минеральных парагенезисов из метаморфических пород Уфалейского, Сысертско-Ильменгорского, Салдинского, Харбейского, Мурзинского и других комплексов Урала.

Геологическими и петрохимическими исследованиями с использованием радиологических данных установлены три главных этапа проявления метаморфизма в Уфалейском гнейсовом комплексе, определены их типы и возрастная последовательность [18, 30, 44].

1. Позднепротерозойско-кембрийский этап (I) метаморфизма. На I этапе метаморфизму подверглись только породы гнейсового ядра (уфалейская свита). Неоднократное метаморфическое воздействие более поздних этапов привело к тому, что парагенезисы этого раннего этапа сохраняются лишь в виде реликтовых парагенетических ассоциаций, отвечающих позднепротерозойско-кембрийскому этапу метаморфизма. Они встречаются преимущественно в породах основного состава (амфиболиты, биотит-амфиболовые гнейсы) и представлены ассоциациями минералов в метабазах: Гип (бронзит) — Ди — Пл (Ap_{40-50}); $Рог_{54}$ — Пл (Ap_{30-33}) — $Гр_{89}$ — Би₅₁; $Рог_{54}$ — Пл (Ap_{30-35}) — Ди.

Наличие гиперстена, моноклинного пироксена, бурвато-зеленой, высокотитанистой роговой обманки ($Ti=0,17$ форм. ед.), граната с содержанием более 22 % пириновой молекулы, до 36,6 % Са-компонента, максимальной железистостью ($f=88,9$) биотита, с низким содержанием $Al^{VI}=0,24$ форм. ед.; $H_2O=0,96$ форм. ед., минимальной железистостью ($f=51,5$) и высоким содержанием титана (среднее значение составляет 0,31 форм. ед.) указывает на соответствие этих парагенезисов условиям низшей субфации гранулитовой фации (фации амфиболовых гранулитов или фации B_1 — двупироксеновых гнейсов — по схеме Н. Л. Добрецова и др. [9]). Линией устойчивости обыкновенной роговой обманки ограничивается верхний температурный предел наблюдаемых реликтовых парагенезисов — не более 900 °С. Нижняя температурная граница фации B_1 — 750 °С, давление 600 МПа. Достаточно сильно проявленные в южной части Уфалейского гнейсового комплекса процессы переплавления и магматизации пород уфалейской свиты, протекающие в интервале температур 650—800 °С, хорошо согласуются с указанными PT -условиями I этапа метаморфизма.

2. Среднепалеозойский этап (II) метаморфизма был общим для гнейсового ядра и сланцевого обрамления. Однако его воздействие на эти две структурные единицы имеет существенное различие, заключающееся в том, что для пород уфалейской свиты, ранее уже претерпевших метаморфизм гранулитовой фации, он носил регрессивный характер, а для пород ордовикской серии — прогрессивный. Метаморфизм этого этапа, сопровождавшийся интенсив-

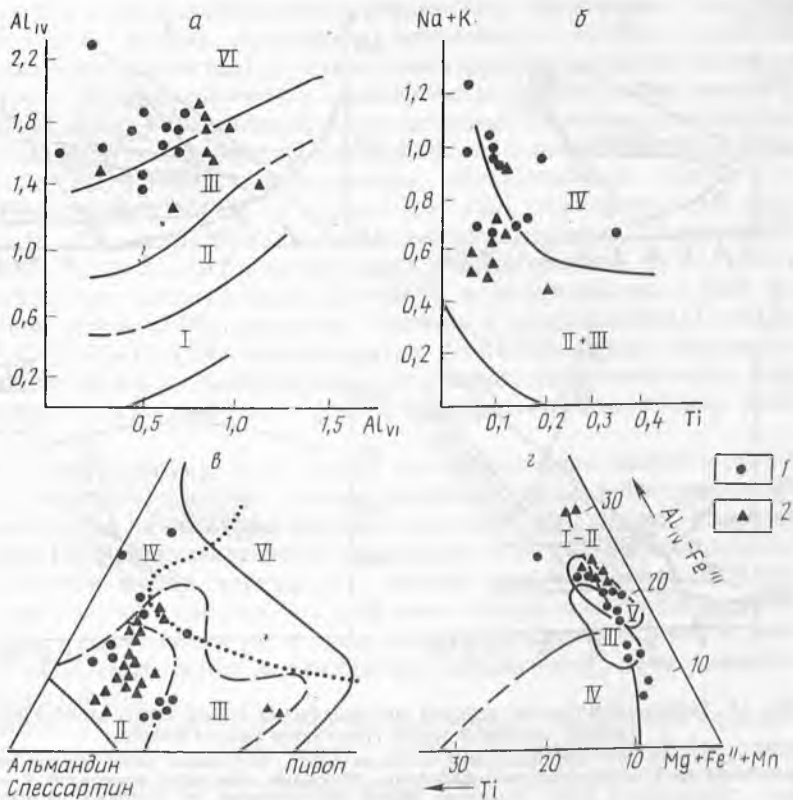


Рис. 17. Соотношение компонентов в минералах из метаморфических пород месторождений гранулированного кварца Урала.

a — Al_{IV} и Al_{VI} в амфиболах, $б$ — Ti и $Na+K$ в амфиболах, $в$ — пирона-гроссуляра-альмандина в гранатах, $г$ — катионы шестерной координации в биотитах. Фации метаморфизма: I — зеленосланцевая; II — эпидот-альбит-амфиболитовая; III — амфиболитовая; IV — гранулитовая; V — дистеновых сланцев; VI — эклогитовая. 1 — из гнейсового ядра; 2 — из сланцевого обрамления

ной гранитизацией, проявился в породах гнейсового ядра более или менее равномерно, а в сланцевом обрамлении — зонально, с относительно низким градиентом.

Парагенетические ассоциации ордовикско-раннедевонского этапа метаморфизма следующие. В породах гнейсового ядра: в metabazites — $Рог_{60}$ —Пл ($Ап_{25-35}$)—Гр $_{84}$ —Би $_{52}$ —Ант—Жед; в метапелитах — Пл ($Ап_{18-25}$)—Кв—Би $_{51}$ —Гр $_{82}$ —Ки—Кпш; во внутренней зоне сланцевого обрамления: в metabazites— $Рог_{49}$ —Пл ($Ап_{15-22}$)—Гр $_{87}$ —Ант—Жед—Цо—Би $_{56}$; в метапелитах — Кв—Би $_{54}$ —Мус—Гр $_{86}$ —Ки—Ст—Пл ($Ап_{12-20}$); в эклогитах — Омф—Гр $_{39}$ —Рут. Во внешней зоне сланцевого обрамления: в metabazites—Акт—Клц—Эп—Гр $_{85}$ —Би $_{53}$ —Хл—Ки—Пл ($Ап_{3-8}$); в эклогитах — Омф—Гр $_{38}$ —Рут.

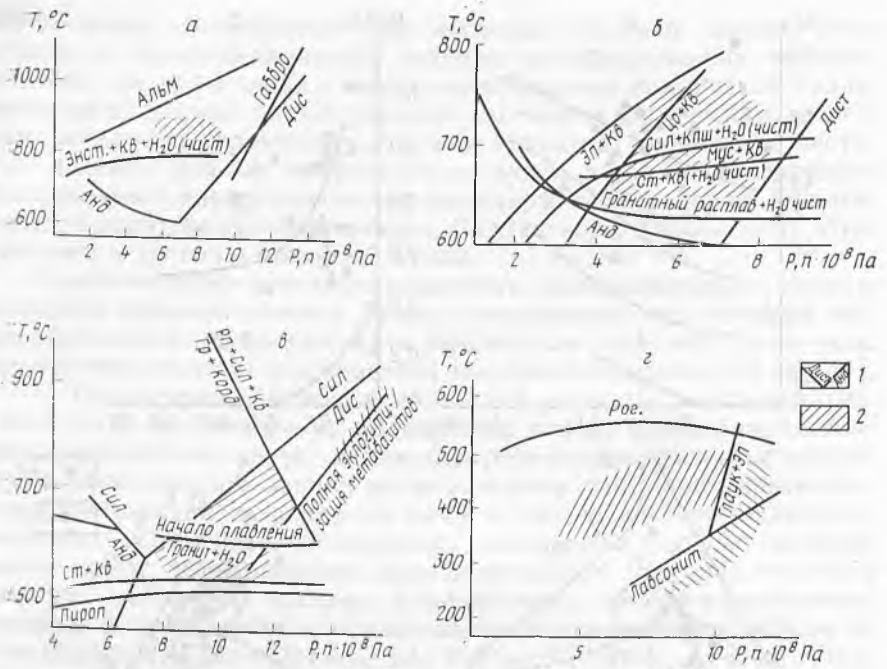


Рис. 18. Термодинамические условия метаморфизма пород Центрально-Уральской группы месторождений гранулированного кварца:
 а — гранулитовой; б — амфиболитовой; в — эклогитовой, дистеновых гнейсов и сланцев; г — зеленосланцевой и глаукофановой фаций. 1 — *PT*-кривые равновесия минералов; 2 — *PT*-области метаморфизма пород различных фаций, определенные по реальным парагенезисам минералов и их физико-химическим свойствам

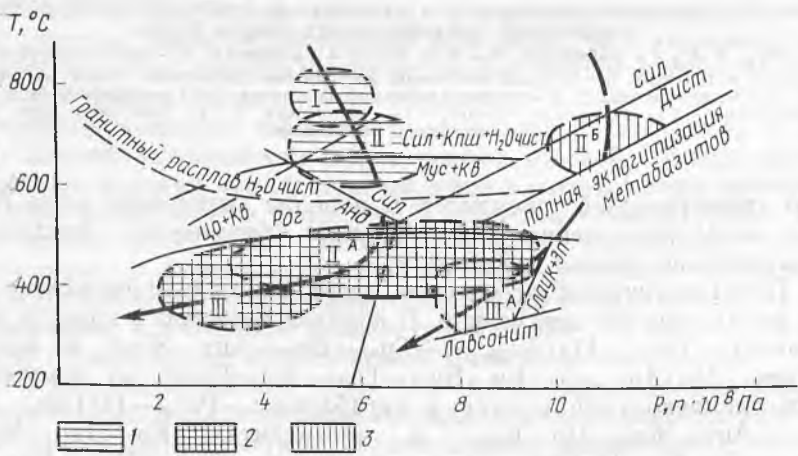


Рис. 19. Поля устойчивости минеральных ассоциаций последовательных этапов метаморфизма пород Центрально-Уральской группы месторождений гранулированного кварца.

Анализ петрографических особенностей, физических свойств и химического состава минералов переменного состава (гранатов, амфиболитов, биотитов), а также некоторых минералов-индикаторов (рис. 17), отражающих специфические *PT*-условия метаморфизма II этапа, показывает более сложный характер распределения температур и давлений по сравнению с позднепротерозойско-комбрийским этапом метаморфизма. Компонентный состав (%) гранатов: алмадин 50—73, пироп 5,0—10,8, спессартин 1—6, гроссуляр 14—24, андрадит 2,0—4,1); высокие значения Са-компонента (23,6) и параметра элементарной ячейки граната ($a^{\circ}=11,651$); максимальная железистость ($f=59,7$) и величина a_{Ca} —38,9 амфиболов ($Ng=1,690$); наличие биотитов с содержанием $Ti=0,24$; $Al^{VI}=0,45$; $H_2O=1,24$, железистостью $f=51,9$ и другие параметры свидетельствуют о каледонском метаморфизме в гнейсовом ядре на уровне амфиболитовой фации (силлиманит-биотитовых гнейсов — B_2).

В нижнем структурном этаже на общем фоне амфиболитовой фации в отдельных узко локализованных зонах встречаются такие минералы-индикаторы высоких давлений, как дистен, омфациит, жедрит. Их присутствие четко фиксирует участки, на которых амфиболитовая фация переходит в аналог высоких давлений — фацию дистеновых гнейсов (C_2). Кианит-жедритсодержащие парагенезисы наблюдаются вдоль тектонически подвижной зоны по контакту гнейсового ядра и сланцевого обрамления, реже — внутри гнейсового ядра.

Черты среднепалеозойского метаморфизма гнейсового ядра дают основание сопоставить его с гнейсо-жедритовым (Б-1) типом метаморфизма, по А. А. Маракушеву. Термодинамический уровень фации дистеновых гнейсов, приуроченный к узким линейным зонам, резко отличался от *PT*-условий основного фона гнейсового ядра, на котором он проявлялся, и при той же температуре характеризовался давлением 1000—1300 МПа (рис. 18, 19).

В сланцевом обрамлении метаморфизм II этапа полностью развивался в условиях высокого давления. Это подтверждается многочисленными минералого-петрографическими и петрохимическими данными. В первую очередь обращает внимание аномально высокое содержание граната и рутила во всех породах юго-восточной части Уфалейского гнейсового комплекса (по сравнению с аналогичными образованиями других регионов). Особенно богаты гранатом слюдяно-кварцевые сланцы и ортоамфиболиты, в которых

Минеральные ассоциации: 1 — гнейсовых ядер; 2 — сланцевых обрамлений; 3 — зон дислокационного метаморфизма. I — дорифейский региональный метаморфизм гранулитовой фации; II — среднепалеозойский региональный метаморфизм амфиболитовой фации; III^A — среднепалеозойский региональный метаморфизм эпидот-амфиболитовой фации; III^B — среднепалеозойский дислокационный метаморфизм дистеновых гнейсов и эклогитов; III^C — регрессивный позднепалеозойский региональный метаморфизм зеленосланцевой фации; III^D — регрессивный дислокационный метаморфизм жадеит-лавсонит-глаукофановой фации; тенденция изменения *PT*-режима дислокационного метаморфизма в пределах тектонически ослабленных зон

он порой играет роль породообразующего минерала (20 %). Содержание граната в породе колеблется от 1 до 5 %. Большинство гранатов относится к пиральспитовому ряду с достаточно высоким содержанием пиронового компонента (12—16 %, иногда в локальных зонах до 40—43 %), указывающим на существенную роль давления при их образовании. Обычное присутствие рутила в эклогитах, высокие давления при формировании которых не вызывают сомнений, позволяет высказать предположение о связи аномально высокого содержания рутила в метаморфических породах восточной части Уфалейского антиклинория с повышенными давлениями, сопровождающими региональный метаморфизм.

Характерной чертой, создающей своеобразный минералогический петрографический облик пород сланцевого обрамления, является постоянное присутствие в телах ортоамфиболитов, аповулканогенных сланцах и реже в сланцах первично-осадочного происхождения минералов из группы эпидота — цонзита и клиноцонзита. Находки этих минералов в известково-силикатных «гранулитах» и некоторых эклогитах дают основание считать, что они тяготеют к образованиям высоких температур и давлений и дополнительно указывают на метаморфизм пород сланцевого обрамления в условиях фации S_2 (дистен-мусковитовых сланцев).

Преимущественно в сланцах первично-осадочного происхождения встречается дистен — индикатор высоких давлений. Обычное содержание дистена в сланцах не превышает 1 %, а максимальные его концентрации (до 5 %) отмечаются вблизи контакта сланцевого обрамления с гнейсовым ядром и вдоль линейных, согласных с простираанием структур зон смятия и мигматизации. Приведенные параметры (глиноземистость, титанистость, железистость и т. п.) железо-магнезиальных минералов переменного состава из пород сланцевого обрамления, входящих в парагенезисы II этапа метаморфизма, свидетельствуют об их формировании при высоких температурах и давлении. И наконец, наличие эклогитов и эклогитоподобных рутилоносных амфиболитов, установленных нами, а также описанных А. И. Белковским [4] в этом районе, определяет PT -условия метаморфизма каледонского этапа: фация дистеновых сланцев (S_3) в качестве метаморфического фона сланцевого обрамления с повышением уровня метаморфизма на отдельных линейно-вытянутых участках, совпадающих с тектонически ослабленными зонами до эклогитовой фации (C_1). Метаморфический фон сланцевого обрамления создавался при температуре 500—600 °С и давлении 900—1200 МПа, а аномальных участков, подчеркнутых телами эклогитоподобных ортоамфиболитов, — при температуре, превышающей 800 °С и давлении более 1200 МПа (см. рис. 18, 19). На участках, где давление опускалось ниже 700—1200 МПа, в породах внешней зоны сланцевого обрамления на общем фоне дистен-мусковитовых сланцев развивались ассоциации минералов, отвечающие уровню эпидот-амфиболовой фации (B_3), что подтверждается наличием гранатов, амфиболитов, биотитов, по составу и петрохимическим константам соответствующих условиям указан-

ной фации регионального метаморфизма, а также широким распространением альбита и присутствием хлорита (см. рис. 18). По ведущей роли для сланцевого обрамления метаморфизма II этапа на уровне фации дистеновых сланцев он может быть отнесен к субформации богатых калием пород (мигматито-слодяно-сланцевой).

3. Позднепалеозойский этап (III) метаморфизма, завершающий тектоно-метаморфическое формирование Уфалейского антиклинория, не имеет повсеместного распространения, как предшествовавший ему среднепалеозойский, и локализуется в восточной части сланцевого обрамления вдоль глубинного разлома, отделяющего Центрально-Уральское поднятие от Магнитогорского прогиба. Он сопровождает зоны повышенной проницаемости внутри гнейсового ядра и сланцевого обрамления. Локализация метаморфизма позднепалеозойского этапа вблизи Главного Уральского разлома и сопровождающих его более мелких тектонических нарушений и ослабленных зон убедительно свидетельствует об их не только пространственной, но и генетической связи. Позднепалеозойский метаморфизм по своей интенсивности достигал уровня эпидот-амфиболитовой фации в вулканогенных образованиях Магнитогорского прогиба, ранее претерпевших зеленокаменное превращение, чем устанавливается его прогрессивная направленность и локализация вдоль границы Уфалейского антиклинория и Зеленокаменного синклинория. В то же время для пород Уфалейского гнейсового комплекса, глубоко метаморфизованных в каледонский этап орогении, метаморфизм носил регрессивный характер и захватывал главным образом прилегающую к глубинному разлому восточную часть сланцевого обрамления.

Парагенетические ассоциации позднепалеозойского этапа метаморфизма следующие. В породах гнейсового ядра и внутренней зоны сланцевого обрамления: в метабазитах — Хл—Эп—Акт—Ка—Мус—Ал (Ap_{9-14}); в метапелитах — Кв—Ал—Мус—Хл—Эп—Дол. В породах внешней зоны сланцевого обрамления: в метабазитах — Гл—Жад—Пл (Ap_{6-12})—Клц—Эп—Пар; в метапелитах — Гл—Лав—Кв—Пл (Ap_{3-8})—Эп—Пар—Сер. Равновесные парагенезисы с участием таких минералов, как плагиоклаз (Ap_{3-10}), хлорит (Ap_{44}), актинолит, мусковит (серицит), эпидот, возможны в условиях зеленосланцевой (B_4) фации; дополненные оптическими свойствами они определяют *PT*-условия III этапа метаморфизма во внутренних частях антиклинория в пределах 350—500 °С и 200—600 МПа.

В периферической части сланцевого обрамления, непосредственно примыкающего к Главному Уральскому разлому, уровень регионального метаморфизма резко отличается по величине давления при выдержанности указанного температурного интервала. Это устанавливается по вхождению в ассоциации позднего этапа метаморфизма глаукофана, хлорита ($f=28-36$), лавсонита, цонзита, клиноцоизита, являющихся типичными стресс-минералами. Все эти минералы устойчивы лишь в жадеит-лавсонит-глаукофа-

Таблица 3

Температура образования парагенетических ассоциаций

Проба	Mg (Mg+Fe+Mn)		Ca (Ca+Na+K)		Na мусковита (с Na плагноклаза)	T °C по биметрической термометрии	T °C по схеме фации метаморфизма
	Биотиты	Гранаты	Амфиболы	Плагиоклазы			
М-2, А-Г	—	0,276	0,528	—	—	700	800
М-51, А-П	—	—	0,628	0,32	—	620	650—750
М-48, А-П	—	—	0,633	0,31	—	600	650—750
М-41, А-П	—	—	0,715	0,36	—	650	650—750
М-3, Б-Г	0,540	0,238	—	—	—	600	650—750
М-4, Б-Г	0,574	0,181	—	—	—	575	500—650
М-5, Б-Г	0,591	0,154	—	—	—	500	500—650
М-9, А-Г	—	0,165	0,679	—	—	440	500—650
М-12, Б-Г	0,656	0,248	—	—	—	600	500—650
М-14, Б-Г	0,340	0,134	—	—	—	660	750—800
М-29, Б-Г	0,499	0,143	—	—	—	550	500—650
М-30, Б-Г	0,480	0,132	—	—	—	540	500—650
М-33, Б-Г	0,473	0,146	—	—	—	600	500—650
Д-1, М-П	—	—	—	—	0,04	360	350—500
Д-2, М-П	—	—	—	—	0,04	360	350—500
Д-4, М-П	—	—	—	—	0,03	330	350—500
М-62, М-П	—	—	—	—	0,05	390	500

новой фации — S_4 , представляющей аналог фации зеленых сланцев при высоких давлениях (более 800—1000 МПа). Отмеченные черты позднепалеозойского этапа метаморфизма позволяют сопоставить его, как и линейные локализованные участки фации S_1 на фоне фации дистено-мусковитовых сланцев метаморфизма II этапа, с формацией А, по А. А. Маракушеву (эклогиты, амфиболиты, глаукофановые сланцы, спилиты и др.).

Наличие химических анализов сосуществующих минералов с общим изоморфным компонентом дает возможность [16, 40] оценить температурные условия образования выделенных парагенетических ассоциаций (табл. 3). Из рассмотренных минеральных ассоциаций к гранулитовой фации относятся гранат и биотит пробы М-14. Амфиболы ассоциации амфибол-плагноклаз (пробы М-41, М-48, М-51) и гранат в парагенезисе с биотитом (М-3) находятся на границе гранулитовой и амфиболитовой фаций. Учитывая, что плагноклаз в основных породах при гранитизации в той или иной мере деанортизируется, можно предположить, что температура, полученная для указанных ассоциаций, несколько занижена. Температурный интервал возникновения ассоциаций биотит—гранат и амфибол—гранат, относящихся к эпидот-амфиболитовой фации и фации дистеновых сланцев, составил 440—600 °С, а ассоциации мусковит—плагноклаз 330—390 °С, что соответствует PT -условиям зеленосланцевой фации. Температура, определенная по сосуществующей ассоциации амфибол—гранат из эклогитоподобного цон-

зит-гранатового амфиболита (проба М-2), составляет 700 °С. Полученные значения температур по биминеральным геотермометрам ниже температур равновесия соответствующих ассоциаций, устанавливаемых при помощи петрогенетической решетки на 50—100 °С. Причинами этого являются, очевидно, полиметаморфизм изученного комплекса, приводящий к появлению неравновесных ассоциаций, вторичных включений в минералах, изменению химизма минералов при диафорезе, а также отличие изоморфных смесей от идеальных растворов. Поэтому температуры ранних этапов метаморфизма, протекавших на уровне высокотемпературных фаций и фиксируемых в реликтовых парагенезисах, оказываются, как правило, заниженными вследствие наложения позднейших регрессивных процессов. В отличие от этого температуры, принятые по указанной схеме фаций, основываются на максимальном использовании моновариантных линий равновесия минералов и экспериментальных материалов и являются максимальными температурами каждого этапа метаморфизма.

Установленные температурные интервалы выделенных этапов метаморфизма для Уфалейского гнейсового комплекса близки к оценке термодинамического уровня формирования рассматриваемого комплекса [9, 27, 30, 48]. Кристаллические сланцы, амфиболиты и гнейсы восточного крыла Уфалейского антиклинория, прилегающие с запада к Главному Уральскому разлому, претерпели в целом региональный метаморфизм дистен-силлиманитового типа. Они включают тела эклогитов и на общем фоне широко распространенных высокотемпературных фаций аномально метаморфизованы в линейных интенсивно деформированных зонах в условиях жадеит-лавсонит-глаукофановой фации и фации дистеновых гнейсов и сланцев. Эти породы представляют собой составную часть прерывистого метаморфического пояса высокого давления [9], аналогично метаморфическим поясам приконтинентальных областей [25]. Такая геологическая позиция предопределила возникновение специфических высоких давлений и температур при тектоно-метаморфическом формировании данного комплекса. Кроме того, избыточное тектоническое давление, в два—три раза превышающее литостатическое, необходимое для образования указанных метаморфических пород, установленных при петрографическом изучении Уфалейского комплекса, возникало, очевидно, при комбинированном действии динамических факторов, в пределах «зоны смятия», а также обусловливалось диапиродным характером перемещения гнейсового ядра.

Характеристика силектитов. Силектиты составляют только часть объектов и жил месторождения, однако содержат основные запасы гранулированного кварца, сосредоточенные в нескольких крупных телах [26, 41]. Жилы силектитов встречаются только в образованиях гнейсового ядра, локализуясь на его контакте со сланцевым обрамлением и представляя в совокупности одну из выделенных нами на месторождении (крайнюю западную) зону концентрации жил гранулированного кварца. Эта зона повыше-

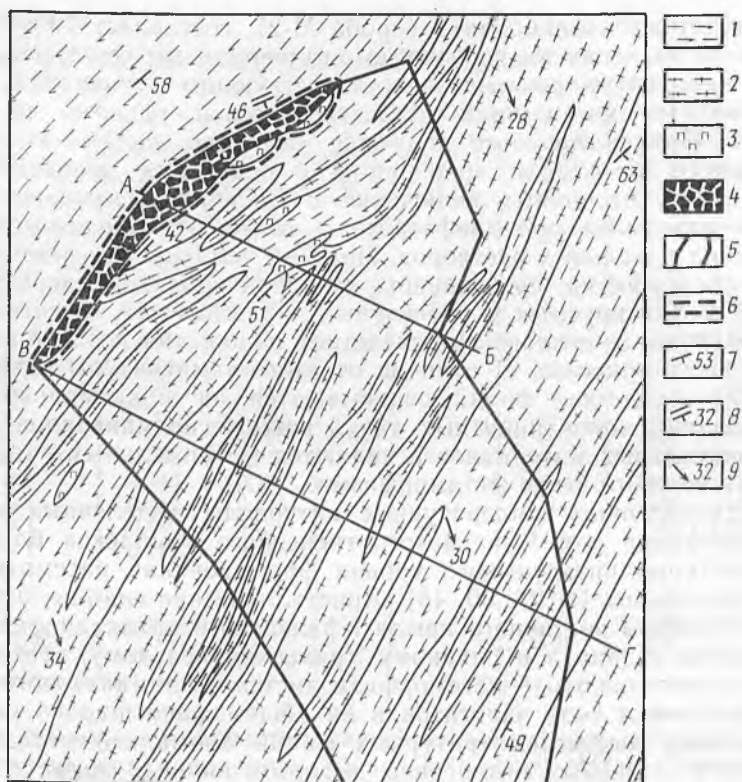


Рис. 20. Геологический план силектитовой жилы гранулированного кварца. Поздний протерозой: 1 — гнейсы биотит-амфиболовые; 2 — гранито-гнейсы двуслюдяные; 3 — плагиоклазовые пегматиты; 4 — гранулированный кварц; 5 — проекция контуров жилы гранулированного кварца на горизонтальную плоскость; 6 — зона интенсивной биотитизации. Элементы залегания: 7 — гнейсовидность и кристаллизационная сланцеватость; 8 — контакты жильных образований; 9 — линейность

ной трещиноватости, рассланцевания, будинажа и грануляции ограничивает с запада зону смятия Главного Уральского разлома, являясь южным структурным продолжением месторождения слюдоносных пегматитов, содержащих блоки гранулированного кварца, и пространственно совпадая с площадью другого месторождения мусковита. В пределах этой сложной зоны перемежаются тела слюдоносных пегматитов и силектитов. Кварц и тех, и других полностью гранулирован, а жилы разбудинированы и отчетливо склоняются на юго-восток (рис. 20). Жилы силектитов, так же как и пегматитовые жилы, сложены тонко- и мелко-равномерно-зернистым (от 0,2 до 2 мм, обычно 1—2 мм) агрегатом зерен кварца типичной гранобластовой структуры, известным под названием гранулированного кварца «уфалейского» типа. Кроме тесной пространственной связи с пегматитами и приуроченности исключи-

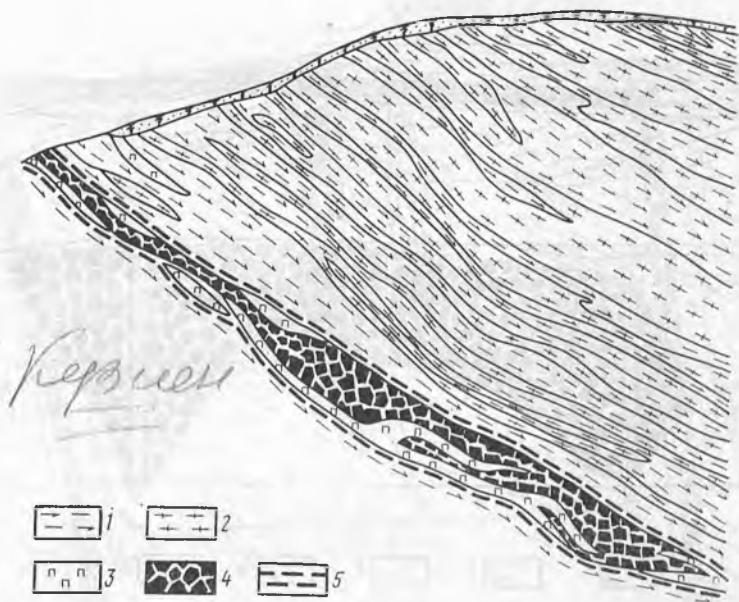


Рис. 21. Разрез силектитовой жилы гранулированного кварца.

1 — биотит-амфиболовые гнейсы; 2 — двуслюдяные гранито-гнейсы; 3 — кварц-полевошпатовая порода; 4 — гранулированный кварц; 5 — приконтактные зоны биотитизации

тельно к древним образованиям уфалейской свиты гнейсового ядра, они имеют и ряд других отличительных особенностей.

Минеральный состав гранулированных силектитов более разнообразен в качественном и количественном отношении. Силектиты обладают большим набором минералов-примесей и процент содержания их выше, чем в метаморфогенно-гидротермальных кварцевых жилах. Если жилы гранулированного кварца, развитые в восточной части Центрально-Уральской группы месторождений, содержат в заметных количествах, как правило, лишь два-три минерала (мусковит, графит, рутил), составляющих в совокупности не более 1% жильной массы, то жилы гранулированных силектитов характеризуются наличием трех—пяти минералов-примесей в существенных количествах (плаггиоклаз, микроклин, ортоклаз, биотит, мусковит) и некоторых других, присутствующих непостоянно (гранат, сфен, рутил, апатит, амфиболы). Суммарное содержание их находится в пределах 4—8% от общего объема жильной массы.

В гранулированном кварце силектитов выделяется несколько групп включений, в общем ухудшающих его качество и осложняющих процессы обогащения и наплава из обогащенных концентратов прозрачного кварцевого стекла (рис. 21). Отметим, что представлены они минералами-спутниками, комбинированными с минералами-спутниками углекислыми и водно-углекислыми включениями, самостоятельными водно-углекислыми включениями, водными и глобулярными включениями. В группе минеральных примесей

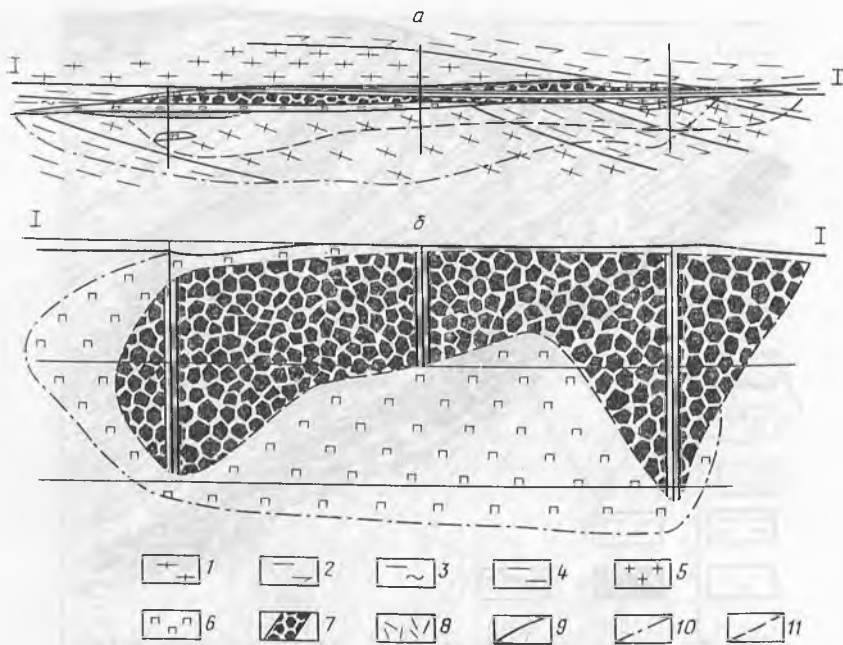


Рис. 22. Геологический план (а) и продольный разрез (б) силектитовой жилы гранулированного кварца.

1 — двуслюдяные гранито-гнейсы; 2 — биотит-амфиболовые гнейсы; 3 — двуслюдяные гнейсы; 4 — биотитовые гнейсы; 5 — мусковитовые граниты; 6 — кварц-полевошпатовая (пегматитовая) порода; 7 — гранулированный кварц; 8 — приконтактные зоны биотитизации; 9 — геологические границы; 10 — проекция контура кварц-полевошпатовой оторочки на вертикальную и горизонтальную плоскости; 11 — проекция контура силектитового тела на вертикальную и горизонтальную плоскости

самые распространенные — полевые шпаты. Так, в типичной силектитовой жиле наблюдается кварц-полевошпатовая зона мощностью 0,3—0,7 м. Полевой шпат розового и серого цвета представлен микроклином с небольшим количеством плагиоклаза № 15. Иногда полевые шпаты образуют оторочки мощностью от 10—15 см до 1—3 м по одному или обоим зальбандам кварцевых жил или скопления на выклинивании жил (рис. 22, 23), или прожилки различных направлений в кварцевых жилах. Нередко выделения полевых шпатов в силектитовых жилах не имеют четкой приуроченности к какой-либо определенной системе трещин и наблюдаются в виде отдельных кристаллов (рис. 24, 25) размером до 6 мм или их скоплений. (В гранулах плагиоклаз всегда имеет большую основность (A_{150}) по сравнению с плагиоклазами в межзерновом пространстве (A_{15-17}) и образует идиоморфные мелкие (0,02—0,5 мм) кристаллы. Ортоклаз и микроклин встречаются в гранулированном кварце в виде средне-, крупнозернистых агрегатов в зальбандах и в центральных частях жил, а ортоклаз, кроме того, отмечается пластинчатыми кристалликами размером 0,03 мм и менее внутри гранул. Биотит в гранулированном кварце встречается довольно

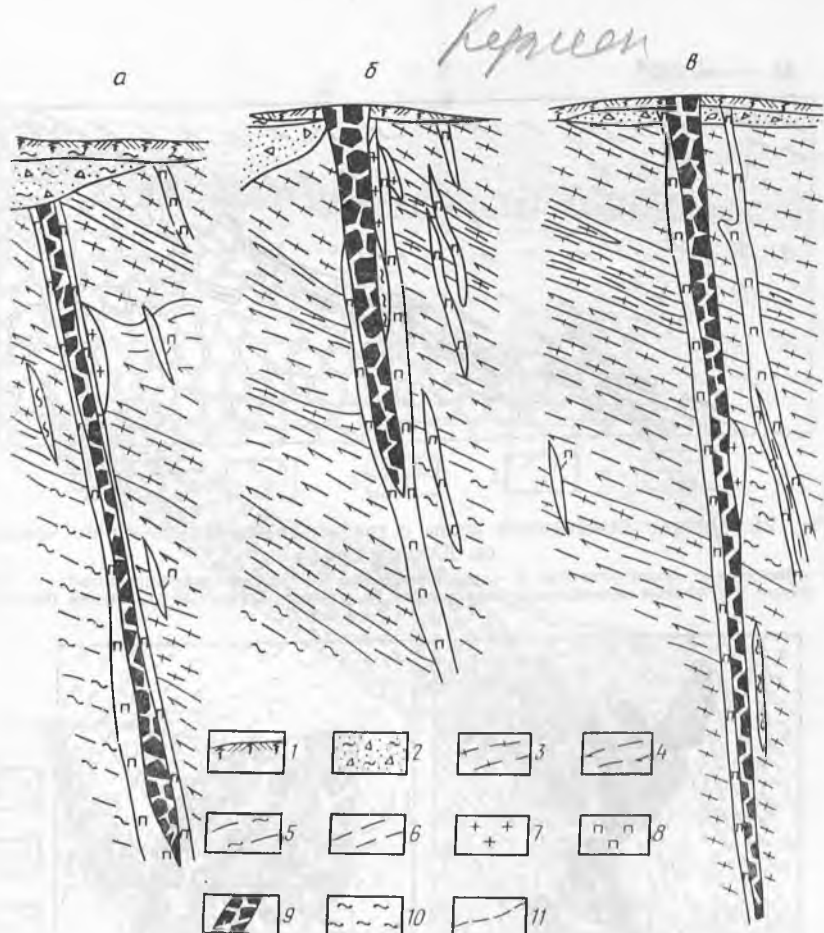


Рис. 23. Геологические разрезы силектитовых жил гранулированного кварца. а, б, в — различные жилы Урала. 1 — почвенно-растительный слой; 2 — элювиально-делювиальные отложения; 3 — двухслойные гранито-гнейсы; 4 — биотит-амфиболовые гнейсы; 5 — двухслойные гнейсы; 6 — биотитовые гнейсы; 7 — мусковитовые граниты; 8 — пегматиты; 9 — гранулированный кварц; 10 — зона тектонического смятия пород; 11 — геологические границы

часто в гранулах, но обычно в межзерновых пространствах и по трещинам. Апатит фиксируется обычно в жилах силектитов, залегающих в биотит-амфиболовых гнейсах и преимущественно в их зальбандовых участках в форме пластинчатых кристаллов, реже прожилков и еще реже крупных (2×3—5 см) кристаллов, которые так же, как и вмещающий их кварц, гранулированы и содержат тонкие иглы рутила. Рутил — достаточно широко распространенный минерал, образующий включения от тонких иголок в гранулах кварца до кристаллов размером 2—3×6—10 см в жильной массе. Является одним из минералов, создающих окрашенные включения в плавном кремнеземе и требующих введения специальных методов обогащения в технологические линии для его

Аз. → 280°

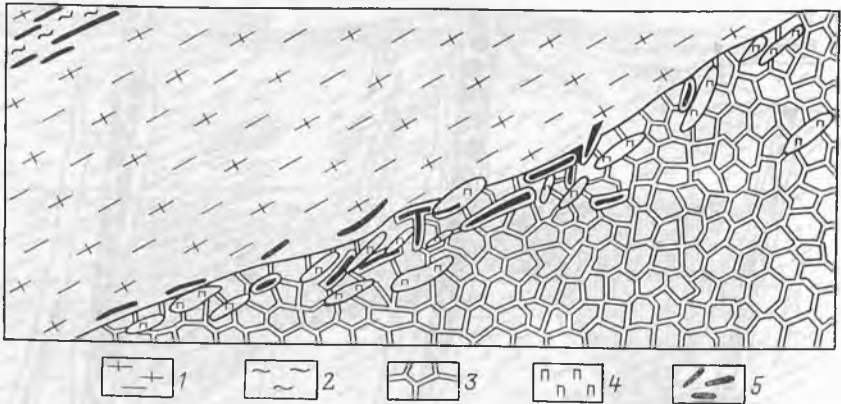


Рис. 24. Контакт силектитовой жилы с гранито-гнейсами Губенского комплекса. Южный Урал.

1 — биотитовые гранито-гнейсы; 2 — зона дробления; 3 — кварц гранулированный; 4 — шлицевые и блоковые обособления микроклина; 5 — крупночешуйчатые выделения биотита

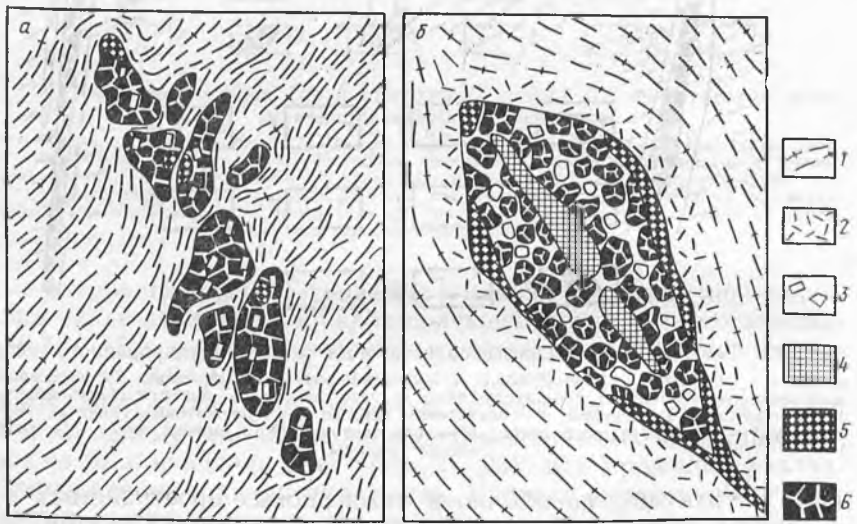


Рис. 25. Будинированные силектитовые жилы:

а — Мугоджары; б — Урал. 1 — биотитовые гранито-гнейсы; 2 — мелкочешуйчатый биотит; 3 — блоки микроклин-пертита; 4 — блоковый пегматит; 5 — разномасштабный пегматит; 6 — гранулированный кварц

удаления. Сфен встречается в виде мелких включений в телах силектитов в основном в приконтактной части жил и в околожильных измененных породах в ассоциации с биотитом, амфиболами и эпидотом. Мусковит всегда присутствует как поздний минерал, развивающийся по биотиту, полевым шпатам или встречающийся тонкими чешуйками по трещинам (рис. 26).

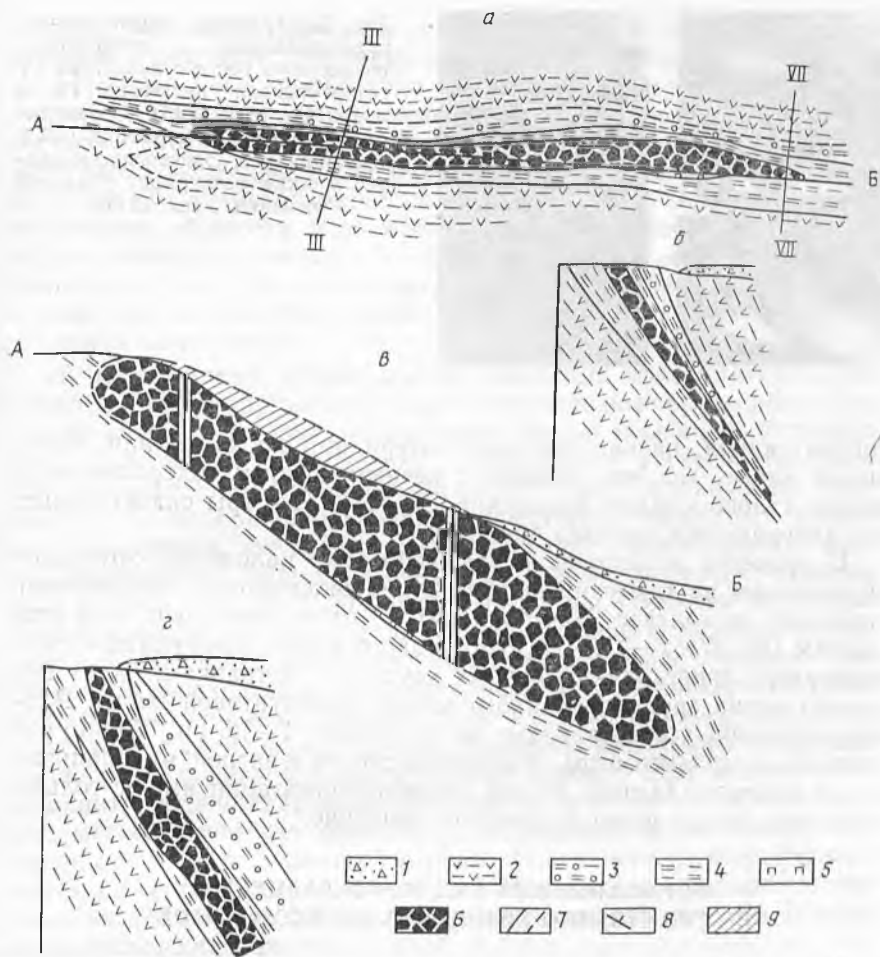


Рис. 26. Геологический план и разрезы месторождения гранулированного кварца (Прибайкалье). По А. А. Брензею, с изменениями и дополнениями Е. П. Мельникова.

a — геологический план; *б* — продольный разрез по А—Б; *в* — разрез по III—III; *г* — разрез по VII—VII. 1 — гнейсовые грунты с супесчаным заполнителем; 2 — амфибол-биотитовые гнейсы очково-полосчатые; 3 — кварц-хлорит-слюдистые сланцы, тонкочешуйчатые (диафориты); 4 — слюдяные черные сланцы, тонколистватые (диафориты); 5 — зоны полевошпатового состава; 6 — гранулированный кварц; 7 — геологические границы (прослеженные и предполагаемые); 8 — элементы залегания; 9 — эродированная часть жилы

В силектитах фиксируется множество прожилков и включений гранитоидного и пегматоидного состава, а также ксенолитов вмещающих пород. С их учетом количество минеральных и породных примесей возрастает до 8—12%. Но в то же время гранулированный кварц силектитов обладает рядом свойств, положительно выделяющих его среди других формаций гранулированного кварца (рис. 27). К таким свойствам относятся высокий коэффициент све-

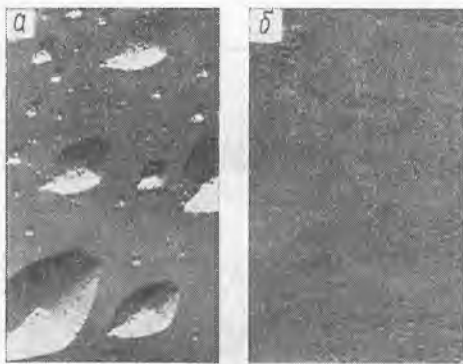


Рис. 27. Границы зерен кварца, представляющих поверхности совместного роста с полостями от газовой-жидких включений (а) и микроскульптурой (б) в гранулированном кварце формации П.А.2 Средний Урал. Электронно-микроскопическая фотография угольной реплики. Увел. 12 000

топропускания, низкие значения потери при прокаливании, отношения влага—газ, что связано с незначительным содержанием в кварце газовой-жидких включений [26, 41]. Размеры селектитовых тел изменяются в широких пределах.

В процессе исследований зафиксировано наложение хрусталеобразования на гранулированные жилы селектитов в Уфалейском гнейсовом комплексе. Иногда в них по отдельным трещинам или мелким (6—20×1—2 см) пустотам растворения образуются многочисленные кристаллики горного хрусталя. Затравками для них служат зерна гранулированного кварца селектитовой жилы. Размер прозрачных кристалликов не превышает 1—1,5 см, обычно составляя доли сантиметра. Масштабы хрусталеносной минерализации и сопровождающих ее зон перекристаллизации имеют только генетическое или минералогическое значение.

ФОРМАЦИОННЫЙ РЯД МОНОКВАРЦЕВЫХ И СУЩЕСТВЕННО КВАРЦЕВЫХ МЕТАСОМАТИТОВ

Монокварцевые и существенно кварцевые метасоматиты подразделяются на две генетические группы: гидротермальную генезиса и метаморфогенную. Первая группа метасоматитов детально исследована при изучении гидротермальных рудных месторождений различных формаций в СССР и за рубежом и представлена зонами окварцевания пород, вмещающих рудные жилы, кварцевыми обособлениями внутренних частей колонок гидротермально-метасоматических изменений и вторичными кварцитами. Вторая группа кварцевых метасоматитов изучалась преимущественно попутно при картировании метаморфических комплексов. Кварцевые метасоматиты не представлялись как особые образования, объединенные общностью происхождения. Описывались лишь отдельные кварцевые продукты метаморфической дифференциации, кислотного выщелачивания и собирательной перекристаллизации кварца. В данную группу включаются: 1) эпидот-альбит-кварцевые, мусковит-эпидот-кварцевые, мусковит-кварцевые, силлиманит-

кварцевые, дистен-кварцевые и чисто кварцевые метасоматические очковые, гнездовые, прожилковые и жильные обособления; 2) пластобразные метасоматические кварциты. Ряд признаков позволяет отнести все эти горные породы ко второй генетической группе метасоматитов; существенно кварцевый состав породы (80—99 % от общей массы породы) при незначительном содержании (обычно от 1 до 10 %) других минералов; региональный характер распространения; общность метаморфогенного происхождения; идентичность термодинамических условий образования, отвечающих стадий кислотного выщелачивания; близость временной позиции формирования на заключительных этапах тектоно-метаморфического развития комплексов.

В то же время разновидности кварцевых метасоматитов, входящие в эту группу, имеют и свои отличительные особенности. Так, струйчато-прожилковые обособления имеют регионально-площадный характер распространения, а кварциты — регионально-линейное развитие, связанное с локализацией вдоль тектонических нарушений. Среди обширной группы существенно кварцевых метасоматитов стадии кислотного выщелачивания регионального метаморфизма могут быть выделены три главные формации, отвечающие высоко-, средне- и низкотемпературным условиям их образования: силлиманит-кварцевая, дистен-кварцевая и андалузит-кварцевая. Особо интенсивно явления кислотного выщелачивания проявились в экзоконтактных гранито-гнейсах, в верхних структурных этажах — в сланцевых обрамлениях, а также в зонах сочленения последних с гнейсовыми ядрами. Процессы кислотного выщелачивания, выразившиеся в окварцевании пород с образованием силлиманит-слюдяно-кварцевых метасоматитов и почти мономинеральных метасоматических кварцитов с силлиманитом, интенсивно проявлены в гнейсах, сланцах, мигматитах, гранито-гнейсах Уфалейского, Сысертско-Ильменогорского и Мариинского гнейсово-мигматитовых комплексов Урала, в Удокапо-Становой зоне, на Кяхтинском месторождении.

Для кислотного выщелачивания рассматриваемой формации чрезвычайно характерно замещение биотита, полевых шпатов сплошными агрегатами силлиманита (фибролита). Локализация метасоматитов так же, как и кварцевых жил, довольно четко контролируется подвижными зонами с широко проявленными в них диафорическими явлениями. Хотя иногда фибролит-кварцевые замещающие комплексы охватывают значительные площади, линейные размеры шпильковых и прожилковых и линзовидных обособлений среди сланцев, гнейсов и мигматитов обычно не превышают десятков сантиметров или первых метров.

Дистен-кварц-метасоматитовая формация

Явления дистенизации, мусковитизации и сопутствующего окварцевания кристаллических сланцев, гнейсов и мигматитов вплоть до образования дистен- и мусковитсодержащих кварцитов проявле-

ны достаточно широко в регионально метаморфизованных комплексах Урала. Часто они сопровождают месторождения гранулированного кварца и могут служить поисковым признаком на этот вид полезных ископаемых. Кислотное выщелачивание в условиях дистен-мусковит-кварцевой формации проявилось в различной степени во всех гнейсо-мигматитовых комплексах Урала и сопровождалось образованием кианитовых алюмокварцитов и дистен-мусковит-кварцевых сланцев со шлирами кварцевых образований, содержащих включения дистена и мусковита. Характерная особенность кислотных производных — развитие их в пределах локальных подвижных зон. Кианит, биотит и мусковит в метасоматитах такого типа замещаются серицитом. Масштабы процессов кислотного выщелачивания значительны (Уфалейский, Кочкарский комплексы Урала) и приводят к существенным концентрациям дистена и метасоматического кварца довольно высокой чистоты.

Андалузит-кварцево-метасоматитовая формация отличается наиболее низкотемпературными условиями образования и развита обычно на Урале по периферии сланцевых обрамлений гнейсово-мигматитовых комплексов. Она подразделяется на несколько самостоятельных фаций, проявляющихся в различных породах и термодинамических условиях.

Мусковит-кварцевая фация кислотного выщелачивания характерна для гнейсовых ядер и сланцевых обрамлений, пользуется региональным распространением и более поздним развитием. Поля мусковитизированных гнейсов, мигматитов и сланцев измеряются иногда сотнями метров по простиранию при ширине в несколько десятков метров. Метасоматические изменения выражаются в мусковитизации (серицитизации) биотита, кианита и андалузита, силлиманита и других минералов, высокоглиноземистых метapelитов при заметном их окварцевании. При далеко зашедшем процессе возникают шлировые, струйчатые и прожилковые мусковит-кварцевые обособления и неправильной или линзовидной формы тела вторичных кварцитов. Мусковит является самым распространенным минералом в кварцевых жилах и во всех случаях обнаруживает наиболее позднее развитие. Кварц-мусковитовый замещающий комплекс развит не только в гнейсах и сланцах, но наблюдается и в слюдоносных пегматитах. Кварц-мусковитовая фация накладывается на ранее прогрессивно метаморфизованные породы и отвечает регрессивным этапам.

Эпидот (клиноцоизит)-кварцевая и парагонит-кварцевая фации кислотного выщелачивания наиболее яркое выражение получили в телах ортоамфиболитов, в которых вдоль зон интенсивной трещиноватости и рассланцевания происходит образование метасоматическим путем за счет амфиболов исходной породы агрегатных скоплений эпидота (цоизита, клиноцоизита), парагонита и кварца. В результате этого возникают чаще всего биминеральные парагенезисы Кв+Эп (Цо, Кли) или Кв+Пар, а иногда и мономинеральные кварцевые, парагонитовые и клиноцоизитовые обособления. Минеральные агрегаты имеют, как правило,

прожилковую, линзовидную или неправильную форму с размерами в несколько метров по длине и до десятков сантиметров по мощности. Кварц-парагонитовая фация отмечается только во внешней зоне сланцевого обрамления Уфалейского мигматитового комплекса, отчетливо тяготея к зоне сочленения Уфалейского антиклинария с Тагильско-Магнитогорским прогибом. Парагонитовые оторочки около кварцевых жил, залегающих в амфиболитах, достигают мощности 2—3 м.

ФОРМАЦИОННЫЙ РЯД НЕМЕТАЛЛОНОСНЫХ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ

Неметаллоносные, или так называемые безрудные кварцевые жилы составляют неотъемлемую часть метаморфических комплексов, связаны с ними генетически и встречаются во всех областях, где известны регионально метаморфизованные породы. Метаморфические процессы, приводящие к освобождению кремнезема и кристаллизации его в виде кварца, характерны для различных термодинамических условий и фаций метаморфизма. Особенно отчетливо окварцевание и образование практически мономинеральных кварцевых жил фиксируется в породах, метаморфизованных на уровне зеленосланцевой, эпидот-амфиболитовой, амфиболитовой фаций и их аналогов в условиях высоких давлений (глаукофан-сланцевой, дистеновых сланцев, дистенового гнейсов), а также при процессах диафореза (например, кислотного выщелачивания). К этому же классу относятся и так называемые жилы «альпийского типа», формирующиеся в результате проявления процессов метаморфизма, минеральный состав которых детерминирован составом вмещающих их пород [8, 14].

Несмотря на теоретическую обоснованность возникновения мономинеральных кварцевых обособлений при проявлениях различных типов и фаций метаморфизма, а также многочисленные примеры таких объектов, они длительное время не выделялись в качестве самостоятельных геологических образований. Очевидно, подобное положение можно объяснить традиционностью взглядов исследователей и присутствием в большинстве метаморфических комплексов интрузивных пород, затушевывающих и усложняющих закономерности образования и размещения кварцевых жил различного генезиса. Обычно все кварцевые жилы объединялись в одну группу гидротермальных образований и генетически относились к какому-либо плутону или считались производными гипотетического интрузива, не вскрытого эрозией. Лишь в последнее время некоторые из жил стали рассматриваться как производные процессов регионального метаморфизма и относиться к метаморфогенным полезным ископаемым. Исследование хрусталоносных и так называемых безрудных кварцевых жил Урала, Казахстана, Прибайкалья, Средней Азии и некоторых других регионов, обобщение опыта изучения и разведки этих объектов позволили среди обширной группы метаморфогенных кварцевых жил выделить четыре кварцево-жильные формации, отличающиеся геологическими условиями

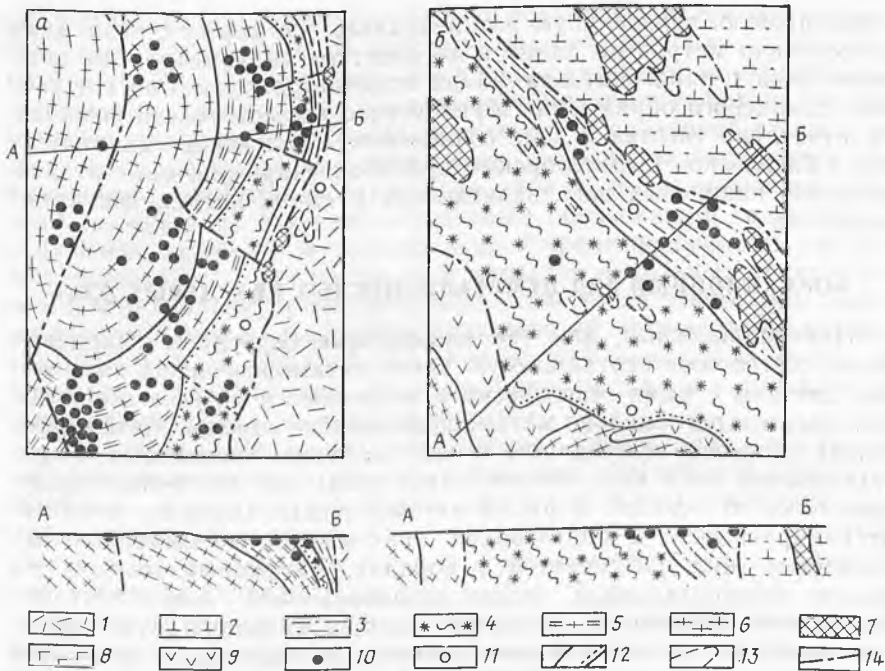


Рис. 28. Геологическое строение и разрезы месторождений гранулированного кварца:

а — Южный Урал, *б* — Средний Урал. 1 — туфогенные породы смешанного состава; 2 — диабазы, диабазовые порфиры и их туфы; 3 — мусковит-графитовые кварциты и слюдястые сланцы; 4 — гранат-слюдяно-кварцевые и слюдяно-кварцевые сланцы, гранито-гнейсы; 5 — амфиболиты, слюдястые и дистеновые кварциты, слюдяно-кварцевые сланцы, гранито-гнейсы; 6 — амфиболиты, амфиболовые и биотитовые гнейсы, гнейсы-граниты; 7 — серпентиниты, тальковые и тальково-карбонатные породы; 8 — габбро; 9 — амфиболиты апогаббровые, апоэклогитовые и гранат-цоизит-амфиболовые породы; 10 — жилы гранулированного кварца; 11 — жилы молочно-белого кварца; 12 — стратиграфические границы (согласные и несогласные); 13 — интрузивные образования; 14 — тектонические нарушения

ми локализации, типом генерирующего их метаморфизма, свойствами жильного кварца и степенью его диафторического изменения: дистен (эклогит)-сланцевую, глаукофан-зеленосланцевую, зеленосланцевую и диафторез-зеленосланцевую. Последовательность возникновения кварцево-жильных формаций отвечает периодам эволюции подвижных поясов. В глубокометаморфизованных комплексах складчатых поясов затруднительно выделение кварцевых образований, соответствующих начальным этапам развития поясов. В общем кварцевые жилы должны отвечать ранней зеленосланцевой кварцево-жильной формации. В средние этапы развития подвижных поясов формируются кварцевые жилы, содержащие такие типоморфные минералы, как силлиманит, калишпат, дистен, биотит, а в заключительные периоды образуются жилы, сложенные кварцем в парагенезисе с серицитом, альбитом, хлоритом и содержащие иногда кристаллы горного хрусталя.

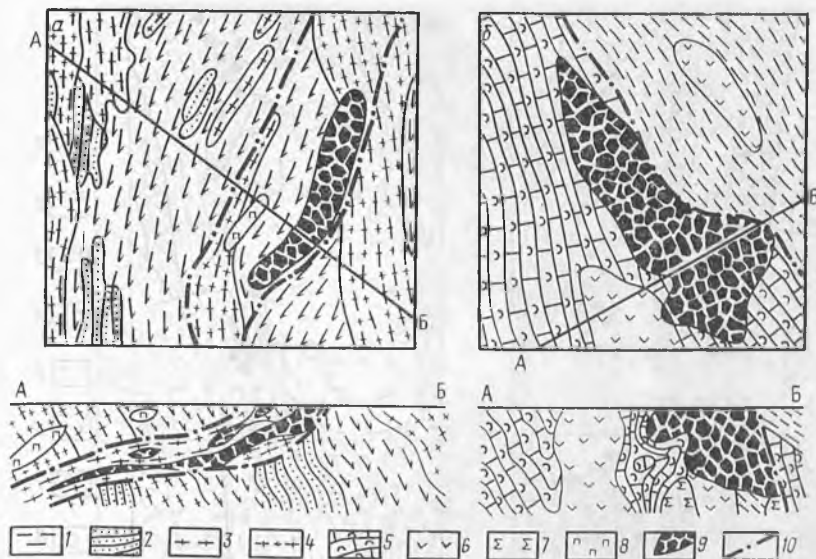


Рис. 29. Геологические планы и разрезы жил гранулированного кварца.

а — Южный Урал; б — Средний Урал. 1 — сланцы слюдяно-кварцевые; 2 — слюдистые кварциты; 3 — двусланцевые гранито-гнейсы; 4 — мусковитовые гнейсо-граниты; 5 — талько-карбонатные породы; 6 — амфиболиты; 7 — серпентиниты; 8 — пегматиты; 9 — кварц гранулированный; 10 — тектонические нарушения

Дистен (эклогит)-сланцевая кварцево-жильная формация

Кварцевые жилы данной формации, впервые открытые и известные в основном на Урале, имеют строго определенную геологическую позицию. Они связаны со специфическими структурно-метаморфическими образованиями подвижных поясов — с гнейсо-мигматитовыми, эклогит-сланцевыми комплексами и сопряженными с ними «зонами смятия» глубинных разломов [21, 31]. В пределах комплексов кварцевые жилы формации сосредоточиваются главным образом в их сланцевых обрамлениях (Уфалейский, Салдинский, Сысертско-Ильменогорский комплексы), в зонах развития эклогитов, ультраметаморфического и динамометаморфического структурных парагенезисов (Максютовский комплекс) и реже среди гнейсовых ядер указанных структур (Мугоджары, Даринский купол) [20, 22, 26]. Проявления кварца этого типа установлены на Приполярном Урале (Лянинский и Харбейский комплексы), в Туве (нагорье Сангилен), на Енисейском кряже и в других районах (рис. 28—30).

Парагенезисы минералов, встречающихся в кварце рассматриваемой формации, свидетельствуют о его образовании в условиях эпидот-амфиболитовой фации. Мусковит встречается в жилах повсеместно, биотит также отмечен в большинстве жил, по количеству уступает мусковиту. Калишпат установлен макроскопически в жилах мугоджарских и среднеуральских месторождений и

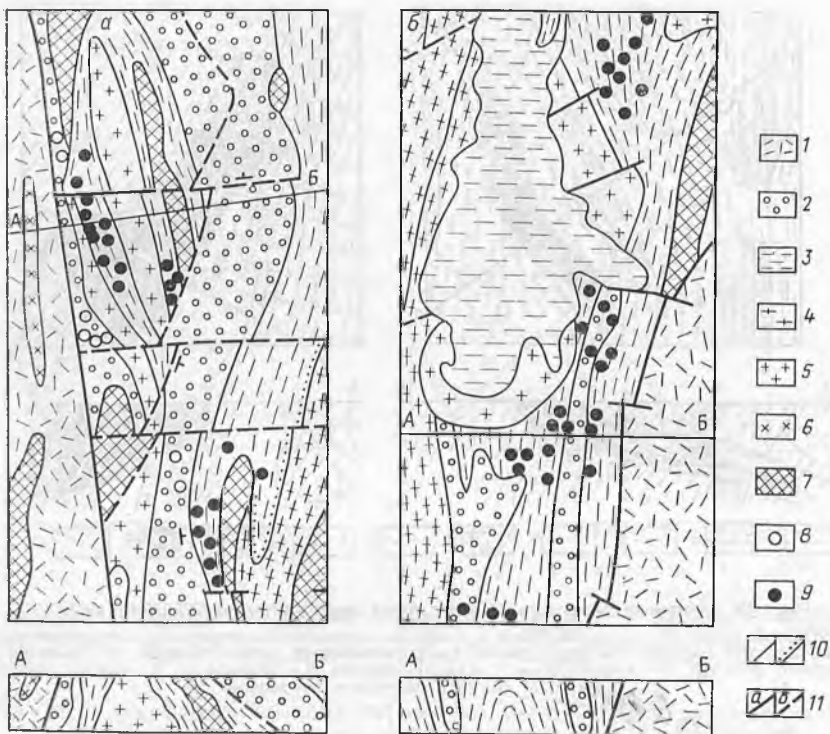


Рис. 30. Геологическое строение и разрезы месторождений гранулированного кварца. По И. И. Захарченко, В. Г. Кузьмину, Е. П. Мельникову.

a — Средний Урал; *б* — Южный Урал. 1 — осадочно-вулканогенные образования региональных прогибов; 2 — углистые фосфоритонесущие кварциты и сланцы; 3 — сланцы амфиболовые, гнейсы; 4 — амфиболиты гранат-биотитовые, гнейсы, кварциты; 5 — биотитовые граниты; 6 — плагиограниты; 7 — ультрабазиты; 8 — слабометаморфизованный кварц; 9 — жилы гранулированного кварца; 10 — стратиграфические границы (согласные и несогласные); 11 — тектонические нарушения: *a* — установленные, *б* — предполагаемые

при микроскопических исследованиях внутри гранул кварца Центрально-Уральской группы месторождений. Здесь же присутствует плагиоклаз с 40—50% анортитовой составляющей. Алюминий фиксируется макроскопически, а силлиманит и дистен при микроскопических исследованиях в кварце данной формации всех месторождений Центрально-Уральской группы и на других объектах. Диафорез неметаллоносных метаморфогенных кварцевых жил формации заключается в их грануляции. Эти процессы отчетливо фиксируются на месторождениях Мугоджарской и Центрально-Уральской групп.

Грануляция в условиях диафорически проявленной зеленосланцевой фации с образованием фрагментарного кварца, содержащего участки новообразованного рекристаллизованного кварца, свойственна кварцу месторождения в Мугоджарах и месторождения на Среднем Урале. Наиболее отчетливо процессы рекристаллизации индивидов исходного кварца проявляются на перегибах, вы-

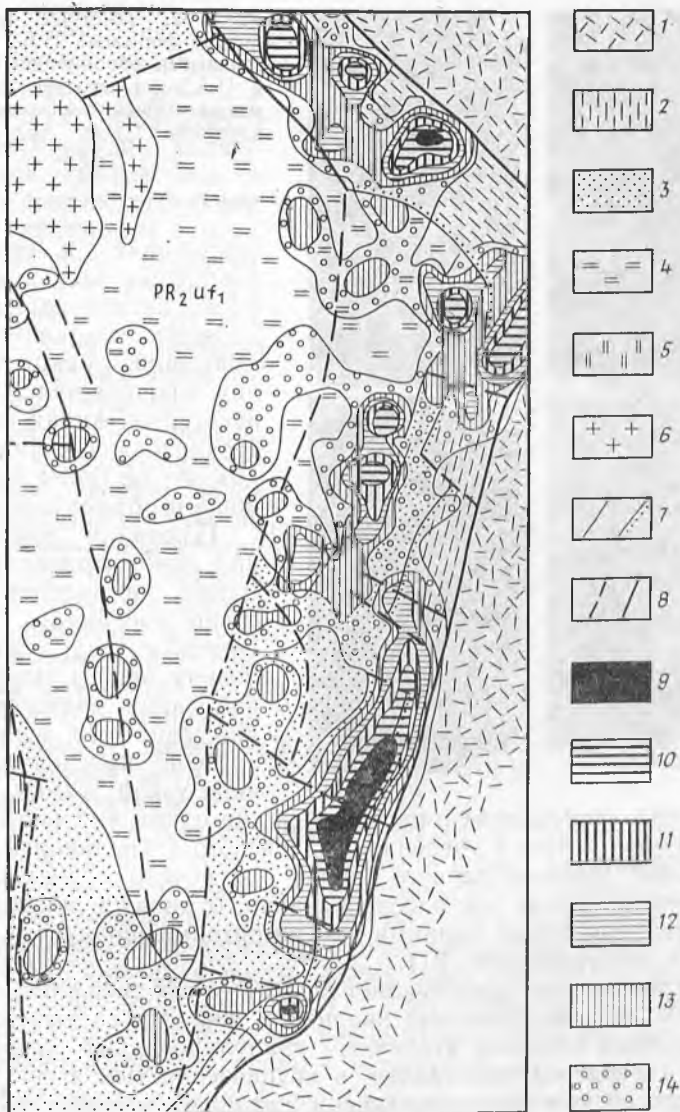


Рис. 31. Кварценоность площади развития гранулированного кварца.

1 — порфириды и туфы улутауской свиты Тагило-Магнитогорского прогиба; 2 — кристаллические сланцы и кварциты сланцевого обрамления мигматитового комплекса; 3 — амфиболиты, гранито-гнейсы и мигматиты слюдяногорской и указарской подсистем гнейсового ядра комплекса; 4 — гнейсы и амфиболиты егустинской подсистемы гнейсового ядра комплекса; 5 — кристаллические сланцы и кварциты таганайской свиты комплекса; 6 — гранитоиды; 7 — стратиграфические границы (согласные и несогласные); 8 — тектонические нарушения; а — установленные, б — предполагаемые; 9—14 — суммарные площади кварц-проявлений в м² на 1 км² вмещающих пород (9 — >2000 м²/км², 10 — 1000 м²/км², 11 — 700 м²/км², 12 — 300 м²/км², 13 — 100 м²/км², 14 — 10 м²/км²)

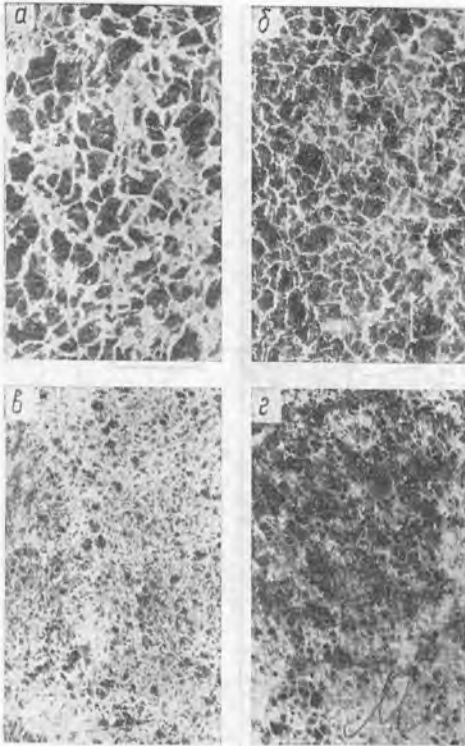


Рис. 32. Текстуры грануляции кварца формаций П.Б.2 (а, б) из сланцевых обрамлений, П.А.1 (в) и П.А.2 (г) из гнейсовых ядер мигматитовых комплексов. Полнр. пластины. Нат. вел. Средний Урал

клиниваниях и пережимах кварцевых жил, т. е. в участках концентрации максимальных механических деформаций. Рекристаллизация проявляется только в некоторых жилах, и рекристаллизованные участки занимают не более 1—3 % от общего объема жилы.

Генотипом месторождений рассматриваемой формации, на котором интенсивно проявилась диафторическая грануляция в условиях эпидот-амфиболитовой фации, является месторождение на Среднем Урале. Оно прослеживается в виде узкой полосы северо-

западного направления и расположено на одном из участков сланцевого обрамления в пределах Уфалейского антиклинория на Урале. Жилы гранулированного кварца приурочены к локальным зонам смятия, кроме зон рассланцевания, будинажа и грануляции, подчеркнутым также мелкими телами ортоамфиболитов, ультрабазитов и эклогитов (рис. 31).

Месторождение представляет собой крупное скопление неметаллоносных метаморфогенных кварцевых жил. Кварцевые жилы месторождения сложены вторичным гранулированным кварцем, который характеризуется средне- и крупнозернистым агрегатом гранобластовой и, в большей степени, катакластической структуры с реликтами гигантозернистого гетерогранобластового стекловидного кварца (рис. 32, 33). Размер гранул колеблется от долей миллиметра до 8—10 мм. Реликтовый кварц представлен прозрачными, слабо замутненными поздними залеченными трещинами, участками, размер которых варьирует от 1 до 8—12 см², в среднем 2—3 см². Он содержит те же минеральные и газово-жидкие включения, что и гранулированный кварц, обладая близкими к нему физико-химическими свойствами, но в то же время отличаясь пониженным светопропусканием ($T=42-50\%$), несколько большей суммой элементов-примесей ($125 \cdot 10^{-4}\%$) и параметрами элемен-

тарной ячейки. Зерна гранулированного кварца образуют характерную катакластическую структуру с разориентировкой оптических осей гранул относительно материнского реликтового крупно-гигантозернистого индивида не превышающей $8-12^\circ$, обычно составляющей $3-5^\circ$, что позволяет путем изучения эпантиморфизма зерен устанавливать границы первичных зерен. Но в результате того что гранулированный кварц формировался при существенном участии тектонических направлений в зоне смятия Главного Уральского разлома, все его новообразованные гранулы приобрели отчетливую ориентировку оптических осей, совпадающую с направлением погружения линейности в конкретной части геологической структуры. Размеры линзовидных жил варьируют в широком диапазоне от 0,1—0,3 до 100 м по простиранию, мощность редко превышает 2,5—2,8 м. Для жил месторождения, приуроченного к северному периклинальному замыканию главной антиклинали вмещающего мигматитового комплекса, характерно северо-восточное склонение под углом $5-15^\circ$. Основная часть объема жил (98—99 %) сложена кварцем и лишь незначительная (1—2 %) — другими минералами. Включения в гранулированном кварце рассматриваемой формации подразделяются [46] на группы и виды (табл. 4).

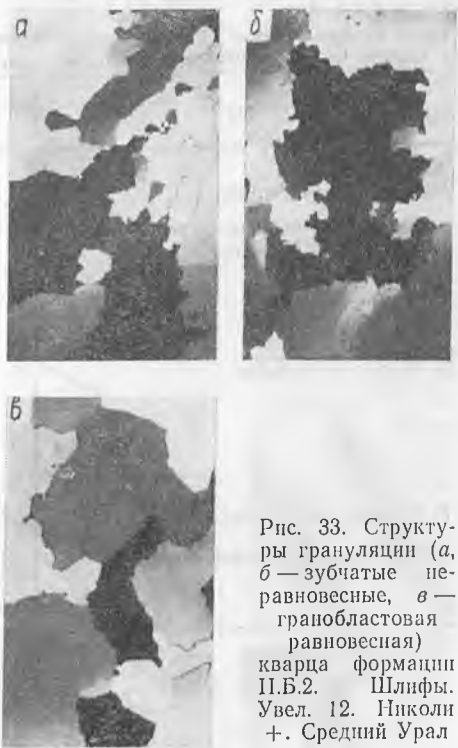


Рис. 33. Структуры грануляции (а, б — зубчатые неравновесные, в — гранобластовая равновесная) кварца формации П.Б.2. Шлифы. Увел. 12. Николы +. Средний Урал

Из приведенных в табл. 4 групп и видов включений в гранулированных кварцах месторождений Урала встречаются все виды. Причем, включения минералов-спутников (группа А) имеются как в гранулах, так и в межгранулярном пространстве (рис. 34—37), комбинированные с МС углекислые и двужидкие включения, а также глобулярные включения (группа Д) развиты только в гранулах кварца (рис. 38, 39), а в межгранулярном пространстве и в трещинах, пересекающих гранулы, широкое распространение получили включения групп В и Г (см. рис. 38).

Минералы-спутники широко развиты в гранулированных кварцах всех месторождений. В порядке убывания частоты встречаемо-

Таблица 4

Типы минеральных и газовой-жидких включений
в кварце метаморфогенных кварцевых жил Урала

Группа	Вид
А. Минералы-спутники (МС) Б. Комбинированные с минералами-спутниками углекислые и водно-углекислые включения	1. МС 2. МС + ЖСО ₂ 3. МС + ЖН ₂ О + ЖСО ₂ 4. МС + ЖН ₂ О + ЖСО ₂ + Г 5. МС + ЖН ₂ О + ЖСО ₂ + К + Г
В. Водно-углекислые	6. ЖН ₂ О + ЖСО ₂ 7. ЖН ₂ О + ЖСО ₂ + Г 8. ЖН ₂ О + ЖСО ₂ + К + Г 9. ЖН ₂ О + Г
Г. Водных растворов	10. ЖН ₂ О + К + Г
Д. Глобулярные включения	11. Аналогичные по составу (без МС) группам Б и В вторичные («дочерние») включения

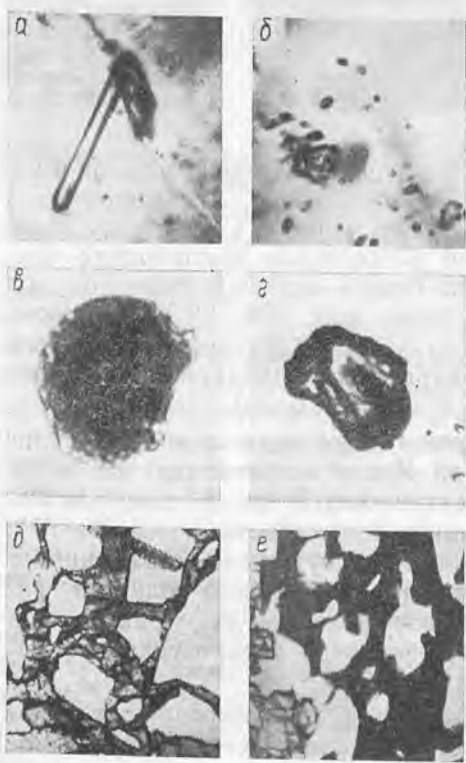
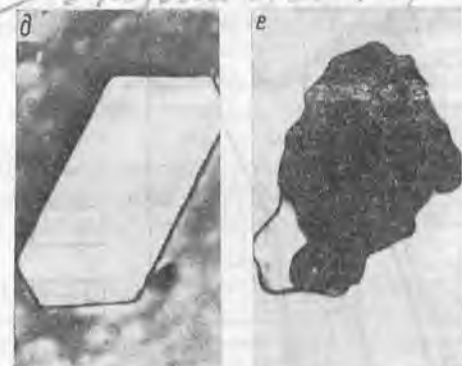
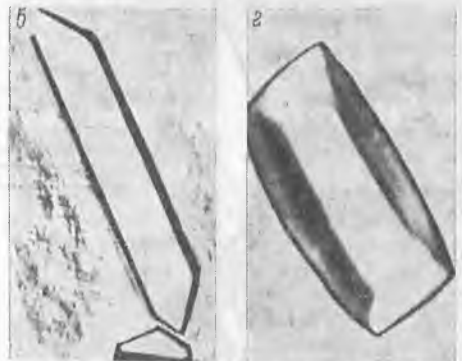
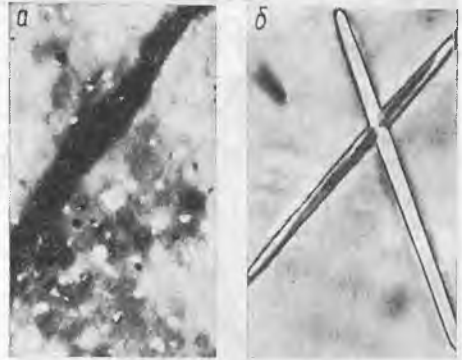


Рис. 34. Микровключения силлиманита (а), ставролита (б), пироксена (в), сфена (г), граната (д), биотита и эпидота (е) в гранулированном кварце силектитов формации П.А.2. Шлифы. Николи ||. Увел. 700 (а-д) и 45 (д, е). Средний Урал (а, б, г, д, е) и Северо-Западное Прибайкалье (е)

Рис. 35. Минералы-спутники (МС) в гранулированном кварце месторождений:

а — участок гранулы с массой МС (белые пятна). Полир. пластина. Увел. 120. Николи +; б — иглы силлиманита; в — монокристалл и двойник эпидота (пьемонтита); г — кристалл дистена; д — кристалл плагиоклаза. Шлиф. Увел. 1050. Николи + (б-д); е — графит с адсорбированной жидкостью и газовым пузырьком. Полир. пластина. Увел. 600



сти в гранулах присутствуют: плагиоклазы, рутил, калишпат, силлиманит, дистен, мусковит, корунд, амфиболы, турмалин, апатит, эпидот, графит, магнетит, ильменит, сфен, гранат и другие МС. Дистен, биотит, кислый плагиоклаз, эпидот, мусковит и хлорит встречаются в межгранулярных пространствах или в периферийной (регенерированной) части гранул, отражая наложенные парагенезисы этапа грануляции, калишпат, дистен, силлиманит, андезит, рутил и другие первичные парагенезисы. Наибольшее распространение из группы Б получили комбинированные с минералом-спутником двужидкие водно-углекислые включения видов 3 и 4. Гомогенизация углекислоты и водного раствора, адсорбированных на МС, для разных проб осуществляется от 212 °С до 405 °С в фазу водного раствора. Среди отрицательно ограниченных бипирамидальных включений в гранулах кварцев месторождения часто встречаются многофазовые. Они содержат от 20 до 40 % кристаллической фазы, 20—25 % жидкой углекислоты и 60—20 % водного раствора и иногда газовый пузырек. Кристаллическая фаза обычно светлая полупрозрачная неправильной формы, иногда шестигранно-призматического или кубического облика. Реже встречаются две-три твер-

→ первичные парагенезисы

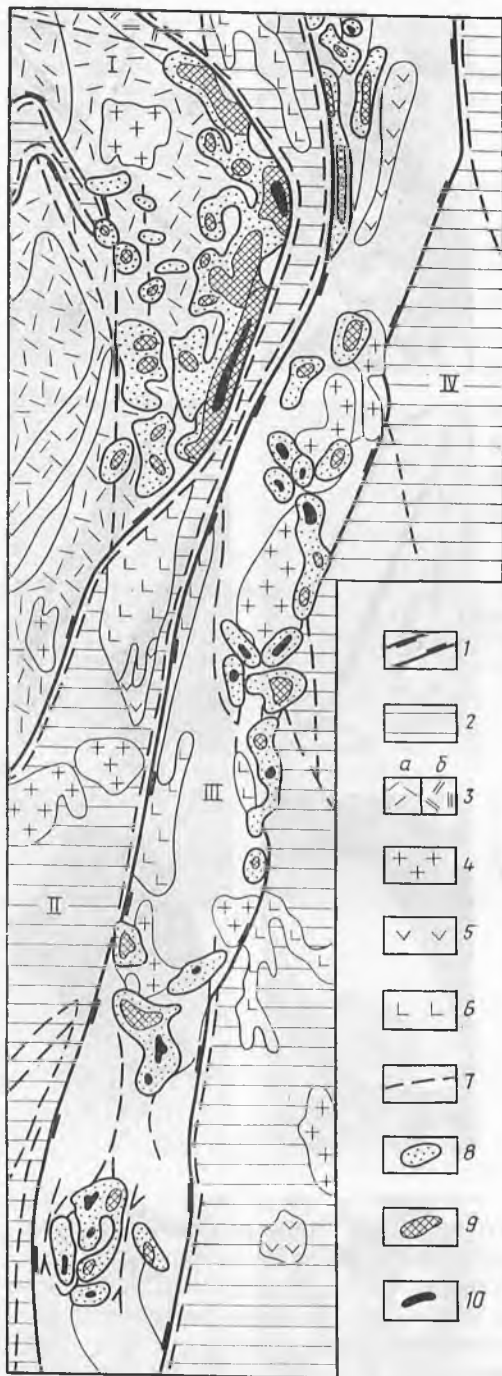
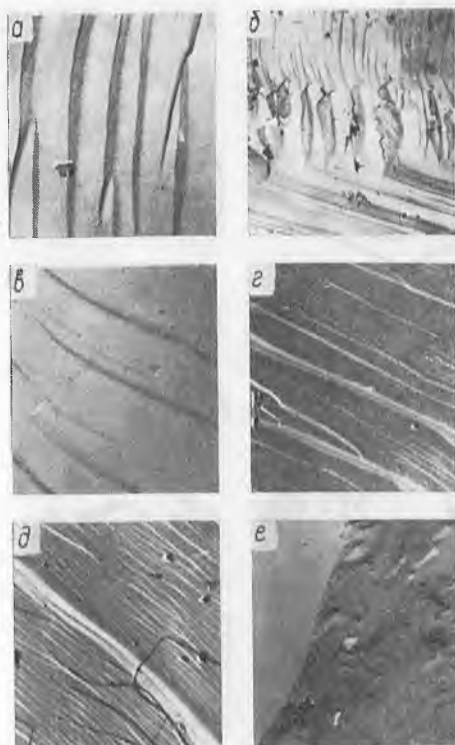


Рис. 36. Распределение метаморфогенного неметаллоносного гранулированного кварца на территории Урала:

I — общеуральские антиклинорные структуры (I — Центрально-Уральское, III — Восточно-Уральское поднятия); 2 — общеуральские синклинозные структуры (II — Тагильско-Магнитогорский, IV — Восточно-Уральский прогибы); 3 — гнейсомигматитовые комплексы: а — гнейсовые ядра, б — сланцевые обрамления; 4 — гранитоиды; 5 — габброиды; 6 — гипербазиты; 7 — тектонические нарушения; 8—10 — суммарные площади кварцпроявлений в м² на 1 км² территории: 8 — от 0,5 до 20, 9 — от 21 до 300, 10 — более 300

Рис. 37. Ровные и тонкоступенчатые субпараллельные сколы с «отщепами» кварцевых волокон толщиной в высоту ступеньки в совершенных монокристаллических индивидах гранулированного кварца (а, б, в, г, д) и излом на границе зерен (е). Средний Урал. Электронно-микроскопическая фотография угольной реплики. Увел. 12 000



дых фазы. Гомогенизация жидкостей таких включений происходит в фазу водного раствора при температурах 270—330 °С. Нагревание выше этих температур до 1,5—2 часов способствует лишь некоторому (до 5—10 % объема) растворению твердой фазы. Полную гомогенизацию осуществить не удалось ни в одном из включений данного вида — выше 370—400 °С все они расшнуровываются или чернеют. Таким образом, содержимое подобных многофазовых включений представляет собой высококонцентрированный (до 50—70 %) расплав — раствор.

Газово-жидкие включения (ГЖВ). В гранулированных кварцах наблюдаются все виды газово-жидких включений группы В и Г, которые приурочены в основном к межгранулярной сети трещин и частично к трещинам, секущим гранулы. Причем включения, имеющие форму негативных бипирамид, располагаются преимущественно в приконтактной (регенерированной) зоне гранул. Все другие разновидности: негативные формы с гранями призмы, щели, инкрустированные горным хрусталем, неправильной и сложной формы включения — локализованы в центральной части межгранулярных зон. Включения в секущих гранулы трещинах большей частью имеют форму негативных кристаллов с гранями призмы и пирамиды, реже неправильной формы. Фазовый состав включений рас-

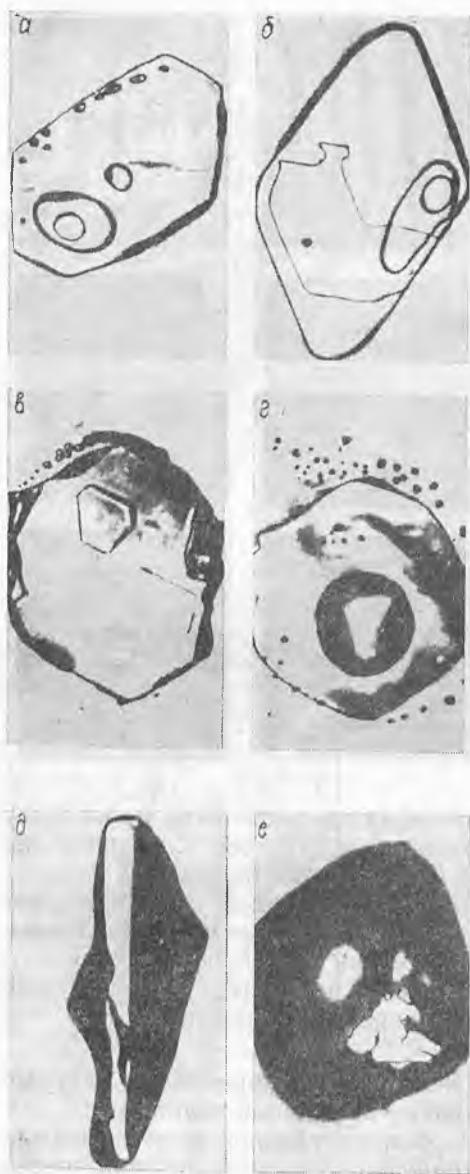


Рис. 38. Комбинированные включения в гранулах кварца:

a, б, в — водно-углекислые с газовой фазой на пластиночках полевых шпатов (*a, б*) и мусковита (*в*); *г* — «капля» жидкой углекислоты на поверхности кристаллика калишната; *д* — тоничные формы адсорбированных водно-углекислых включений на МС — при наблюдении с торца; *е* — многофазовое включение вида $Ж_1+Ж_2+К+Г$ дигириамидальной формы. Средний Урал. Увел. 1350 [46]

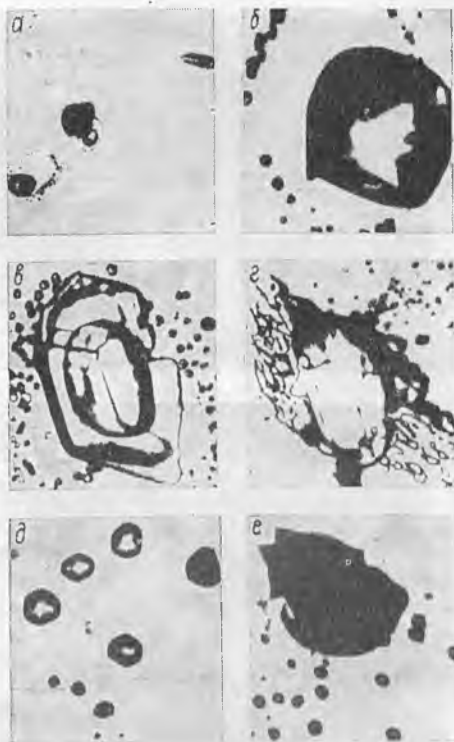
личный. Наиболее распространены двухфазовые ($Ж_{H_2O}+Ж_{CO_2}$) и трехфазовые ($Ж_{H_2O}+Ж_{CO_2}+Г$) углекисло-водные и двухфазовые ($Ж_{H_2O}+Г$) включения водных растворов. Гомогенизация фаз происходит главным образом в водную, реже в газовую фазу при температурах от 60 до 400 °С. Максимальные температуры гомогенизации 490—525 °С зафиксированы в негативно ограниченных межгранулярных включениях водных растворов в кварце Маукского месторождения.

Глобулярные включения (ГЛВ). В гранулах кварца Маукского и других уральских месторождений гранулированного кварца распространены своеобразные глобулярные включения, тесно связанные с развитием трещин вокруг МС и первичных ГЖВ.

По характеру локализации выделяются две подгруппы ГЛВ: 1) включения, образующие форму замкнутого кольца вокруг МС и ГЖВ (см. рис. 39); 2) включения, более или менее равномерно распределенные на поверхности прерывистых трещин. Первая подгруппа ГЛВ связана с образованием микроскопических замкнутых (слепых) трещин, проходивших через включения МС, $МС+Ж_{H_2O}+Ж_{CO_2}+Г$, $Ж_{H_2O}+Ж_{CO_2}+Г$ и другие и имеющих форму круга или овала размером в несколько диаметров самого включе-

Рис. 39. Глобулярные включения в гранулах кварца:

a — участок гранулы с комбинированными и глобулярными включениями; *b* — кольцевые гирлянды из глобулярных включений вокруг МС+Ж₁+Ж₂; *в* — две системы залеченных трещин с кольцевыми гирляндами из глобулярных включений; *г* — комбинированное включение с бахромчатой (темное) двухжидкой фазой; *д* — глобулярные включения вокруг двухжидкого включения. Увел. 1050; *e* — то же, увел. 3000. Образцы *a*, *б*, *в*, *д*, *e* — Средний Урал, *г* — Южный Урал [46]



ния. Трещинки, как правило, сопровождаются кольцеобразной гирляндой из ГЛВ, которые обычно располагаются по периферии трещинки, на границе ее выклинивания. Пространство от гирлянды ГЛВ до самого включения никак не проявляется (прозрачно в проходящем свете и однородно в скрепленных николях) — оно залечено материнским веществом. Реже наблюдаются две-три пересекающиеся через МС трещинки, фиксируемые по взаиморасположению гирлянд ГЛВ (см. рис. 39, б, в).

Собственно глобулярное включение имеет форму отрицательно ограниченной бипирамиды (см. рис. 39, е) и крайне малые размеры (доли микрона и первые микроны). В редких крупных (до 5 мкм) ограниченных ГЛВ просматриваются две или три фазы: Ж₁, Ж₂ и газовый пузырек. Редко в ГЛВ наблюдаются один-два микроскопических кристаллика минералов-узников. Так как несимметричные кольца-гирлянды ГЛВ часто примыкают к МС, то легко устанавливается единство ГЛВ с жидкими включениями, смачивающими МС. Причем соотношение жидких фаз в ГЛВ такое же, как и в материнских водно-углекислых включениях, адсорбированных на МС. В двух случаях в ГЛВ (проба Ж=201) удалось наблюдать гомогенизацию жидких фаз $Ж_{H_2O} + Ж_{CO_2} + Г$ в фазу водного раствора при температурах 275 и 234 °С. При этих же температурах гомогенизировались материнские двухжидкие включения: в первом случае на МС и во втором — в обособленном отрицательно ограниченном двухжидком включении.

Установленные особенности несекущих ГЛВ трещинок (блесток): локализация и замкнутость вокруг комбинированных и газожидких включений, идентичность состава и соотношения фаз, а также температур частичной гомогенизации жидких фаз ГЛВ



Рис. 40. Ильменит (а) и рутил (б) в гранулированном кварце формации П.Б.2. Урал. Штуфы. Нат. вел.

и материнских включений и др., позволяют предполагать, что они образовались при высокотемпературном «отжиге» кварца или в связи с его усадкой при охлаждении, непосредственно следующей за прогревом, т. е. при повторных подъемах температуры, аналогично ореолам субмикроскопических включений, экспериментально полученным Г. Г. Леммлейном в результате перегрева вокруг жидкого включения в селитре.

ГЛВ второй группы тоже локализуются вокруг комбинированных или ГЖВ включений, но несущие их трещины имеют сложную извилистую форму поверхности и значительную протяженность (до 3—5 диаметров МС). Пространственно они легко прослеживаются, так как поверхность их усеяна мельчайшими включениями. Часто такие трещины с ГЛВ кулисообразно и прерывисто протягиваются далеко от первичного комбинированного включения, вплоть до межгранулярной зоны, с которой когда-то соединялись. Характерные особенности трещинок данной подгруппы (волнистая поверхность, кулисообразное расположение и др.), по-видимому, свидетельствуют об образовании их под воздействием ориентированного давления. Особняком от вышеописанных подгрупп стоят «бахромчатые» включения (см. рис. 39, з). Они имеют характерные расплывчатые или бахромчатые формы и образовались на пере-

сечении и за счет жидкой фазы комбинированных включений плоскими трещинами, достигающими межгранулярного пространства. Глобулярные и бахромчатые включения вторичны по отношению к двужидким и комбинированным включениям, так как отщеплены и обособлены в связи с вскрытием последних трещинами контракционного или стрессового происхождения и последующим залечиванием. Они являются «дочерними» по отношению к первичным включениям групп Б и В.

Гранулированный кварц описанного месторождения (рис. 40) по качеству характеризуется следующими средними показателями: коэффициент светопропускания 66 %; потери при прокаливании 0,006 %; сумма элементов-примесей $1,7 \cdot 10^{-3}$ %; высококачественное сырье для производства прозрачного кварцевого стекла. Многие жилы этого типа обрабатываются.

Глаукофан-зеленосланцевая кварцево-жильная формация *Урал*

Кварцевые жилы названной формации имеют характерный структурно-минералогический облик и только им свойственную геологическую позицию. Прежде всего, они сложены крупно-, гигантозернистым стекловидным кварцем, в большинстве случаев содержащим прозрачные участки (рис. 41, 42). Состав минералов-при-

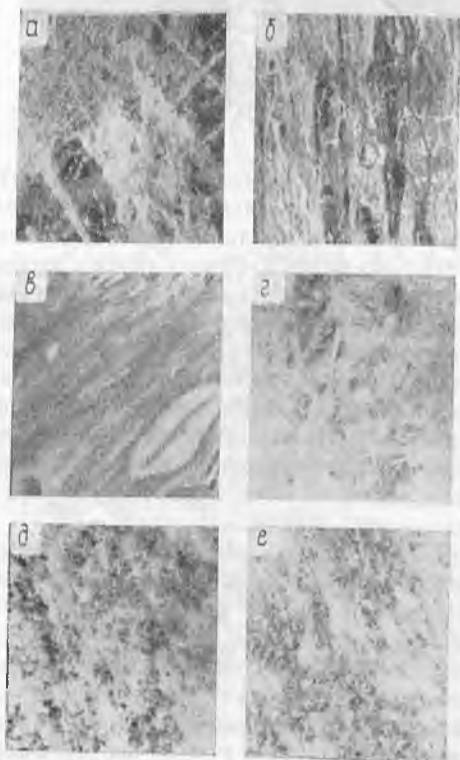


Рис. 41. Текстуры рекристаллизации в кварце формаций II.Б.3 (а—с) и II.Б.2 (д, е). Полир. пластины. Нат. вел. Средний Урал (а, д, е) и Южный Урал (б, в, е)

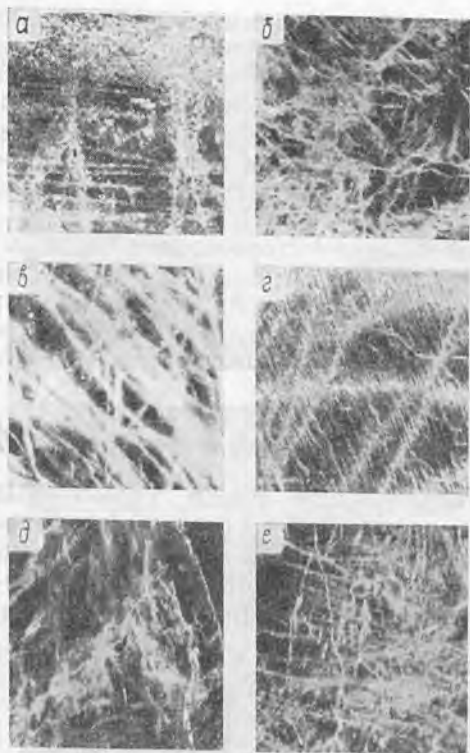


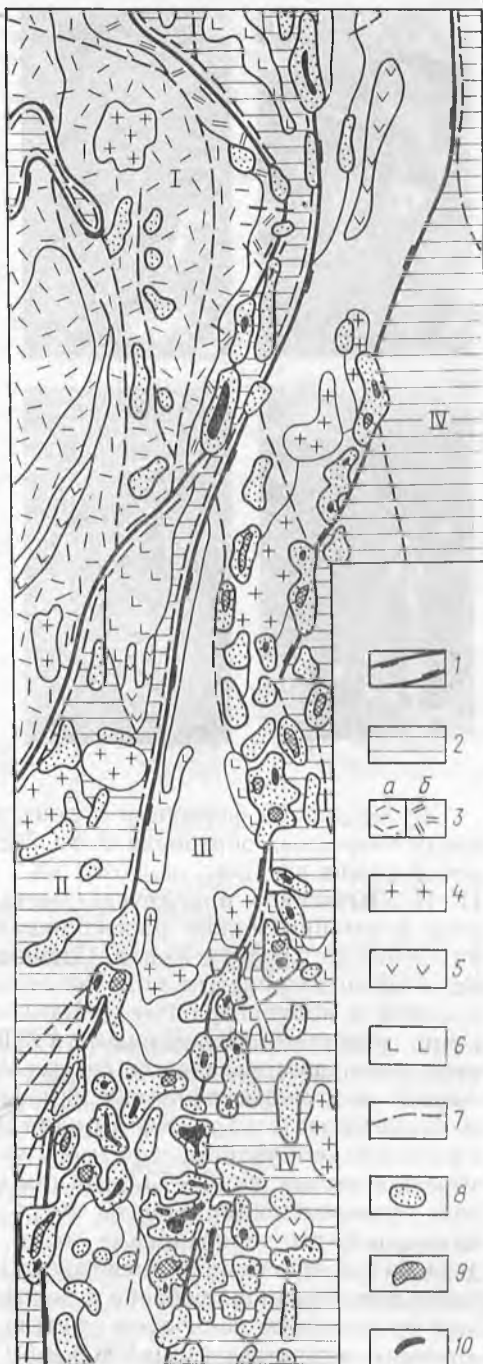
Рис. 42. Текстуры кварца формации II.B.3 с различным количеством тектонических трещин, залеченных газовой-жидкими включениями. Средний Урал. Полупластины. Нат. вел.

месей в них счень однообразен (актинолит, хлорит, кальцит), количество минеральных примесей незначительно (доли процента). Размещаются жилы этого типа преимущественно в прогибах и значительно реже в прилегающих краевых частях смежных антиклинорных структур (на Урале). Причем в пределах прогибов они явно тяготеют к их прибортовым частям, к шовным зонам, сопутствующим разломам глубинного заложения, расчленяющим структуры с противоположным знаком тектонических движений и сопровождающимся проявлением глаукофан-сланцевого метаморфизма (рис. 43). Часто такие зоны фиксируются внедрением ультрабазитов, рассланцеванием и локальными повышениями уровня метаморфизма до эпидот-амфиболитовой фации на общем фоне зеленосланцевой фации.

Парагенезис минералов, сингенетичных с образованием основной массы жильного кварца, отвечает в целом глаукофан-зеленосланцевой фации (хлорит, глаукофан, лавсонит, кальцит, кварц, актинолит и т. п.). Они не обнаруживают ни пространственной, ни генетической связи с какими-либо комплексами или интрузивами гранитоидного или иного состава, а напротив, отчетливо размещаются в линейных тектонических и метаморфических зонах, что свидетельствует в пользу их метаморфогенного происхождения.

Рис. 43. Количественное распределение метаморфогенного неметаллоносного кристаллизованного кварца на территории Урала.

1 — общеуральские антиклинорные структуры (I — Центрально-Уральское, III — Восточно-Уральское поднятия); 2 — общеуральские синклинорные структуры (II — Тагил-Магнитогорский, IV — Восточно-Уральский прогибы); 3 — гнейсомигматитовые комплексы; а — гнейсовые ядра, б — сланцевые обрамления; 4 — гранитоиды; 5 — габброиды; 6 — гипербазиты; 7 — тектонические нарушения; 8—10 — суммарные площади кварцпроявлений в м² на 1 км² территории: 8 — от 0,5 до 10, 9 — от 11 до 100, 10 — более 100



*— все было
после поднятия
Урала, но кварц
проявления*

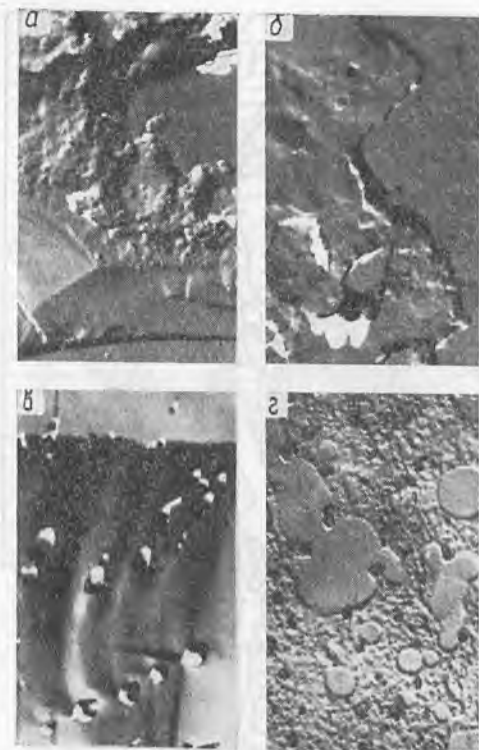


Рис. 44. Изломы по палеотрещинам (а, б) с неструктурной примесью (в) и полостями от уплотненных газожидких включений в кварце формации I.Б.3 (г). Средний Урал (а, б) и Башкирия (в, г). Электронно-микроскопическая фотография угольной реплики. Увел. 15 000

Жилы данной формации хорошо известны на Урале, отмечены среди кварцевых образований в Средней Азии, в спилит-кератофировой толще верхнего палеозоя на Северо-Востоке СССР (данные П. П. Лычагина) и в других местах. Генотипом месторождений этой формации можно рассматривать наиболее изученное месторождение на Среднем Урале. Сложены жилы месторождения крупно- и гигантозернистым молочно-белым кварцем, содержащим прозрачные и полупрозрачные участки со слабо проявленными поздними трещинами, залеченными ГЖВ (рис. 44). Прозрачные участки в большем количестве содержатся в центральных, слабо тектонически и метаморфически измененных частях жил. Их размер изменяется от 3 мм до 8 см в наибольшем сечении, основную массу составляют участки с размерами до 3 мм. Выход прозрачных участков составляет 3—75%. Жилы с прозрачными участками других месторождений Урала несут те же следы наложенных изменений, что и кварцевые тела характеризуемого месторождения. При возрастании диафтореза в них появляется значительное количество трещин, особенно в периферических частях. Параллельно с увеличением количества трещин в жилах возрастает содержание сингенетических с ними ГЖВ и МС, представленных мусковитом (серицитом), альбитом, эпидотом (цонзитом), и появляются ли-

Таблица 5

Условия образования и параметры гранулированного кварца метаморфических комплексов различного фациального уровня

Параметр кварца	Фаши регионального метаморфизма		
	гранулитовая, эклогитовая, амфиболитовая	дистенновых сланцев, энхит-амфиболитовая	зеленосланцевая глаукофан-я высоко-товая
T °С	650—900	500—650	350—500
$P \times 10^8$ Па	5—15	2—12	2—10
Петрогенетические процессы	Бластез, α - β -инверсия, регенерация	Катаклаз, рекристаллизация	Рекристаллизация
Структурно-генетический тип	Бластогранулированный	Катаклазгранулированный	Фрагментарногранулированный
Текстура	Массивная	Массивная сланцевая	Фрагментарная
Структура	Гранобластовая, мозаичная, сотовая	Катакластическая зубчатая	Рекристаллизационно-реликтовая
Размер индивидов, мм	0,4—3,0	2—10	0,05—1,0
Светопропускание (%)	72—94	46—68	33—51
Σ эл. прим. ($n \times 10^{-4}$ %)	30—72	42—66	35—51
H_2O/CO_2	1,3—1,8	2,7—3,5	3,8—6,0
Na/K	1,2	0,7	2,7
Параметр элементарной ячейки, А			
гранул	<u>4,91248</u>	<u>4,91238</u>	<u>4,91240</u>
реликтов <i>a</i>	<u>4,91257</u>	<u>4,91243</u>	<u>4,91265</u>
гранул	<u>5,40437</u>	<u>5,40435</u>	<u>5,40439</u>
реликтов <i>c</i>	<u>5,40443</u>	<u>5,40440</u>	<u>5,40451</u>
гранул	<u>112,9476</u>	<u>112,9409</u>	<u>112,9498</u>
реликтов <i>v</i>	<u>112,9538</u>	<u>112,9461</u>	<u>112,9537</u>
Геолого-промышленный тип	Промышленный	Промышленный	Непромышленный

нейные или сложной формы участки рекристаллизованного тонко-микрзернистого (менее 1 мм) кварца, развивающегося вдоль тектонических трещин на фоне крупно- и гигантозернистого кварца.

Проявление этих процессов, характерных для стрессовых условий зеленосланцевой и лавсонит-глаукофановой фаций, отмечается почти в каждой жиле рассматриваемой формации, но наиболее ярко они фиксируются в подобных жилах Максютковского комплекса, залегающих в кварцитах с кианитом, слюдяно-гранато-глаукофановых сланцах и зеленосланцевых диафторитах по этим породам. Порой они целиком состоят из тонкозернистого вторичного агрегата с разрозненными участками недифторированного молочно-белого кварца с прозрачными участками. В резуль-

тате этого кварц упомянутых месторождений имеет очень характерную струйчатую или сетчатую текстуру. Одновременно с развитием рекристаллизации идет очищение кварцевых зерен от примесей (главным образом от газовой-жидких), в связи с чем возрастает коэффициент светопропускания кварца, и несколько увеличивается содержание эпигенетических минералов.

Таким образом, исследование процесса грануляции кварца в различных геологических и термодинамических условиях позволило установить основные особенности ее проявления в различных фациальных условиях (от зеленосланцевой и глаукофан-лавсонитовой до эклогитовой и гранулитовой фаций), физико-химические свойства возникающего при этом гранулированного кварца, определяющие возможность его использования в промышленности для получения плавленого кремнезема (табл. 5).

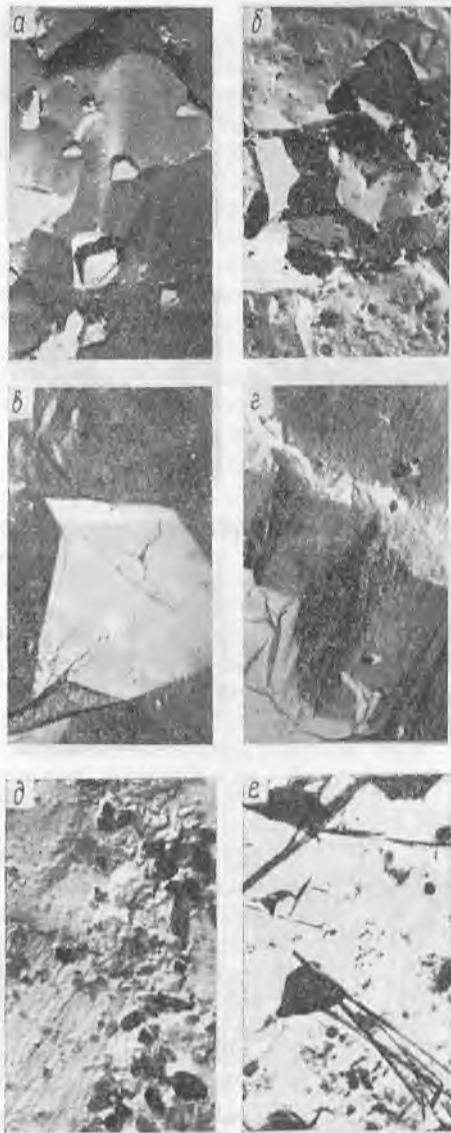
Зеленосланцевая кварцево-жильная формация П.Б.4

*Белый
кварц
из
ЖКТАС*

Жилы рассматриваемой кварцево-жильной формации размещаются главным образом в региональных поднятиях, но иногда и в прилегающих частях соседних прогибов, составляя основной фон метаморфогенных кварцево-жильных образований положительных структур Урала и подвижных поясов других регионов. По отношению к метаморфогенным существенно кварцевым образованиям других рассмотренных типов кварцевые тела данной формации являются более поздними, что устанавливается по геологическим особенностям и по редким взаимным пересечениям. Их размещение контролируется преимущественно локализацией на периклиналях или крыльях положительных структур высоких порядков, в прибрежных частях синклиналей и наложенных мульд в пределах крупных поднятий, вдоль зон тектонических нарушений. В общем термодинамический уровень их формирования отвечает условиям зеленосланцевой и, значительно реже, эпидот-амфиболитовой фаций. В силу специфики происхождения и локализации они могут быть как равновесными с вмещающими породами, так пэнзофациальными с ними по степени метаморфических и метасоматических преобразований. Кварцевые жилы этой формации распространены значительно шире кварцевых жил остальных метаморфогенных формаций и известны во многих регионах: на Урале (Адамовский антиклинорий, Максютковский и Белорецкий комплексы Башкирии, жилы Златоустовского, Кочкарского, Текельдытауского комплексов и др.), в Средней Азии, Забайкалье, Казахстане.

Жилы формации сложены мелко-, среднезернистым, реже крупнозернистым молочно-белым кварцем массивной текстуры, содержащим массовое количество равномерно распределенных ГЖВ водного и водно-углекислого состава типа: $\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Ж}_{\text{CO}_2}$; $\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Ж}_{\text{CO}_2} + \text{Г}$; $\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Ж}_{\text{CO}_2} + \text{К} + \text{Г}$; $\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Г}$; $\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{К} + \text{Г}$. В жильных крупно- и гигантозернистых (негранулированных) молочно-белых кварцах отсутствуют высокотемпературные и «стрессовые» минералы-спутники, комбинированные и глобулярные

Рис. 45. Отражение процессов наложенного хрусталеобразования на кварц формации П.Б.4 с образованием трещин, залеченных крупными вторичными ГЖВ (а), микрокристаллов (б, в), пластической (блокование) деформацией (г) и аргиллизацией (д, е). Казахстан. Электронно-микроскопическая фотография угольной реплики. Увел. 12 000



включения групп А, Б и Д. Большинство ГЖВ расположены беспорядочно или приурочены к залеченным линейным трещинам различных направлений. Наиболее распространена неправильная форма включений, реже встречаются ограниченные формы негативных кристаллов с развитыми гранями призмы. Концентрация водных растворов в большинстве двухфазовых ГЖВ не превышает 10—15%. Редко встречается твердая фаза галита. В трехфазовых водно-углекислых включениях концентрация CO_2 достигает 40% объема. Гомогенизация ГЖВ осуществляется большей частью в фазу водного раствора, реже — в газовую. Температуры гомогенизации для всех месторождений формации близки и находятся в пределах от 104 до 427 °С. В так называемом «фрагментарном кварце» формации широко развиты включения вида $\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Ж}_{\text{CO}_2} + \text{K} + \text{Г}$ с температурами гомогенизации от 300 до 427 °С. В некоторых включениях гомогенизация не достигнута и при нагревании до момента взрыва при 450—470 °С. Месторождения на Урале и в Казахстане являются типичными представителями кварца данной формации.

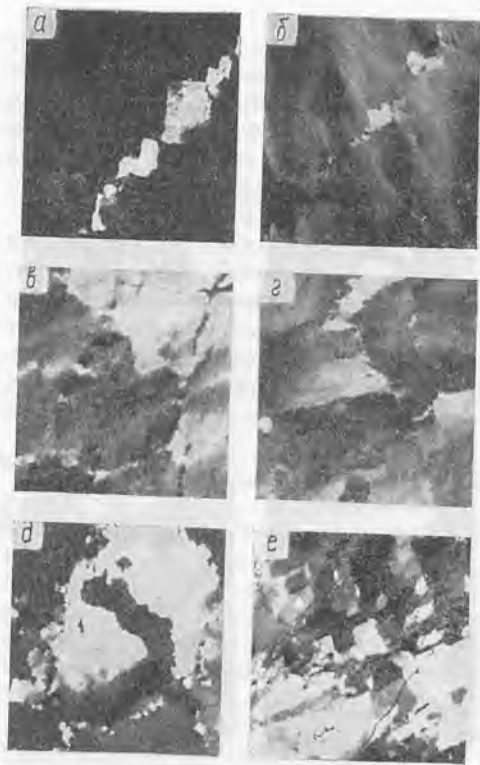


Рис. 46. Последовательные этапы развития структур рекристаллизации в кварце формаций П.Б.2 (а), П.Б.3 (б, в) и П.Б.4 (г—е). Шлифы. Увел. 20. Николи +. Мугоджары (а), Средний Урал (б, в), Башкирия (г—е)

В жильном кварце формации фиксируются процессы диафореза различной интенсивности и типа, приводящие к деформационным (фрагментация, рекристаллизация) и кристаллизационным (хрусталеобразование) изменениям. Наложенный характер процессов хрусталеобразования устанавливается в жилах хрусталеносио-кварцевых полей на Урале, но наиболее отчетливо проявлен и изучен в Казахстане (рис. 45). Характерными процессами гидротермально-метасоматических изменений являются: каолинизация, серицитизация, эпидотизация, хлоритизация, выщелачивание и перекристаллизация. Обогащенный кварц месторождения пригоден для варки многокомпонентных оптических стекол, а перекристаллизованный кварц поздней генерации — для плавки прозрачного кварцевого стекла. На примере месторождения, локализованного в узкой тектонической зоне глубинного разлома в пределах Текельдытауского комплекса Южного Урала, отчетливо устанавливается наложенный характер деформационного диафореза (типа рекристаллизации) жильного кварца поздней метаморфогенной формации орогенного этапа развития подвижных поясов. В результате метаморфогенно-гидротермальной деятельности образуются вначале кварцевые жилы, сложенные молочно-белым кварцем. Затем, при проявлении приразломного позднего метаморфизма, происходит рекристаллизация ранее образованных кварцевых жил. Условия

метаморфизма соответствуют границе зеленосланцевой и эндотамфиболитовой фации. Метаморфизм его проявлен слабо и выражен в деформации и блоковании, в результате которых зерна массивного кварца имеют волнистое погасание и превращаются в совокупность разноориентированных блоков без нарушения сплошности. Рекристаллизованный кварц состоит из прозрачных зерен размером от 0,2 до 4 мм. Часто в одной жиле наблюдаются переходы от микротонкозернистой структуры к средлезернистой. В отдельных жилах рекристаллизованного кварца встречаются блоки молочно-белого первичного массивного кварца, что говорит о незаключенности процесса рекристаллизации (рис. 46). Для рекристаллизованного кварца месторождения характерна неоднородность микроструктуры. По химическому составу оба типа кварца мало различаются, но наличие в молочно-белом кварце большого количества газово-жидких включений резко ухудшает его технологические свойства.

Диафторез-зеленосланцевая хрусталеносная кварцево-жильная формация

П. Б. С.

Среди метаморфогенных кварцево-жильных формаций хрусталеносно-кварцевая формация наиболее поздняя. В различных регионах абсолютный возраст хрусталеносных кварцевых жил может быть различным, но всегда уверенно устанавливается их формирование или на заключительных этапах развития складчатых поясов (как, например, на Урале), или в период метаморфической активизации древних платформ (Бразилия, Мадагаскар, Алдан) или ранее консолидированных областей (Казахстан). В это время образуются самостоятельные кварцевые жилы с гнездами горного хрусталя рассматриваемой формации, а также происходит процесс наложения хрусталеносности на ранее возникшие кварцевые жилы, особенно формации П.Б.4, наиболее широко распространенной в позитивных структурах, где концентрируется хрусталеобразование. Основные закономерности размещения хрусталеносной минерализации в земной коре, установленные А. Е. Карякиным, В. И. Смирновой, Ю. Н. Ануфриевым и др. [1], отражают наложенность процессов хрусталеобразования на ранее возникшие кварцевые жилы и их приуроченность последних к долгоживущим региональным разломам, сопровождающим поздние зоны тектоно-метаморфической и магматической активизации. Нашей задачей является установление формационной принадлежности самих хрусталеносных кварцевых жил и сопровождающих их метасоматитов.

По мнению В. Кеннеди, Ю. Шуберта, А. Фор-Мюре, Дж. Паллистера и др., разделяемому Ю. Н. Ануфриевым и Е. П. Мельниковым, образование бразильских месторождений горного хрусталя тесно связано с процессами вендской тектоно-метаморфической активизации. Эндеогенные хрусталеносные образования провинции представлены главным образом метаморфогенными кварцевыми жилами и минерализованными полостями, меньшее значение име-

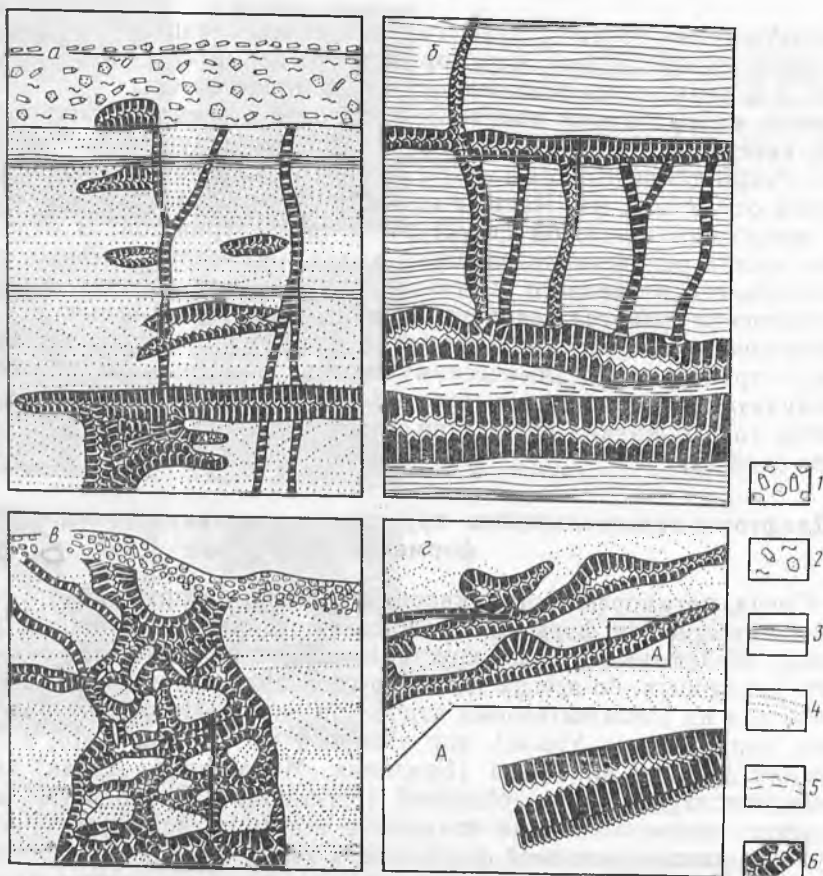


Рис. 47. Условия залегания и морфология хрусталеносных кварцевых жил и полостей месторождений Бразилии.

a — кварцевые карманы в стенке карьера рудника Сьерра де Лагриня (Минас-Жерайс); *б* — пластовые жилы в стенке карьера рудника Силва Реджис (Мимозо, Бая); *в* — кварцевая труба в стенке карьера рудника Морро-Рико (Кристаллина, Гояс); *г* — ленточные жилы в забое штольни рудника Батагейрас (Бая); А — фрагмент зарисовки. 1 — элювий кристаллов кварца; 2 — красная глина с обломками кристаллов кварца и песчаников; 3 — ленточный кварц; 4 — песчаники; 5 — ленточный кварц; 6 — гребенчатый (шестоватый) жильный кварц и кристаллы горного хрусталя

ют пегматиты и полевошпато-кварцевые жилы. Жильные тела, представленные пластовыми жилами, линзами, карманами и штокверками, имеют преимущественно согласное залегание с вмещающими их кварцитами и пологое падение (рис. 47). Кварцевые тела с хрусталеносными полостями залегают среди древних слюдястых сланцев цоколя, местами превращенных в результате метасоматической переработки в тонко-, мелкозернистые глинистые породы зеленоватого цвета (гидрослюдисто-монтмориллонитовые — ?). Гнезда с горным хрусталем тяготеют к участкам метасоматической переработки вмещающих пород, где иногда образуют также само-

стоятельные минерализованные полости, не связанные с кварцевыми жилами.

На Мадагаскаре месторождения сосредоточены в протяженной позднепротерозойской зоне тектоно-метаморфической активизации, развивающейся в основном в протерозойских толщах кварцитов Икаламавани и Итермо (средняя часть разреза). Зоны окаймляют архейские глыбы и лишь на севере переходят непосредственно в один из блоков архея. Месторождения представлены кварцевыми жилами и минерализованными полостями, залегающими среди кварцитов, реже среди кристаллических сланцев и гнейсов. Месторождение Покариса в Анголе находится в провинции Южная Кваза в 180 км от Порту-Амбои среди древних протерозойско-архейских комплексов, претерпевших интенсивную рифейскую тектоно-метаморфическую активизацию, явившуюся причиной образования многочисленных кварцевых жил и пегматитов. Кварцевые жилы сложены крупно-, гигантозернистым полупрозрачным кварцем с полостями, а чаще просто участками тесно сросшихся прозрачных и замутненных кристаллов горного хрусталя. Геологическая обстановка и особенности месторождений Анголы близки к бразильским месторождениям пьезокварца, находящимся по другую сторону Атлантического океана.

К кварцитовым горизонтам иенгрской серии архея, осложненным в результате тектоно-метаморфической активизации брахиантиклинальной складчатостью высоких порядков и разрывами, приурочивается большинство полей, месторождений и проявлений пьезооптического кварца Якутии. Кварцево-жилые зоны субширотного направления связаны с вертикальными разломами и зонами расланцевания, где густота трещин гораздо больше, чем во вмещающих недислоцированных породах. Кварцевые жилы в зоне распадаются на ряд изолированных линз, прожилков, соединенных проводниками, и сложены шестоватым и друзовым кварцем. Гнезда располагаются как в жильном кварце, так и в участках зоны, где жильного кварца нет.

Характерной особенностью жильных зон является широкое развитие процессов диафтореза, благодаря чему вмещающие кварциты вблизи зон сильно изменены, обогащены вторичными минералами, выщелочены и перекристаллизованы. Ширина зон околосильных изменений достигает 10—30 м. Для околосильных пород типично развитие мусковита (серпичита), хлорита, рутила, апатаза, гематита и разложение полевых шпатов. Процессы околосильных изменений характеризуются каолиннизацией, лимонитизацией, хлоритизацией, растворением и перекристаллизацией кварцитов и превращением пегматитов и амфиболитовых прослоев в бурые гематит-каолинитовые (эйситовые?) желто-зеленые монтмориллонитовые и светлые каолинит-гидрослюдистые массы (рис. 48). Обычными парагенетическими минералами, образованными при процессах кристаллизации горного хрусталя в гнездах, являются хлорит, гидрослюды, монтмориллонит, бейделлит, каолинит, рутил, гематит, флюорит, серпичит и др.

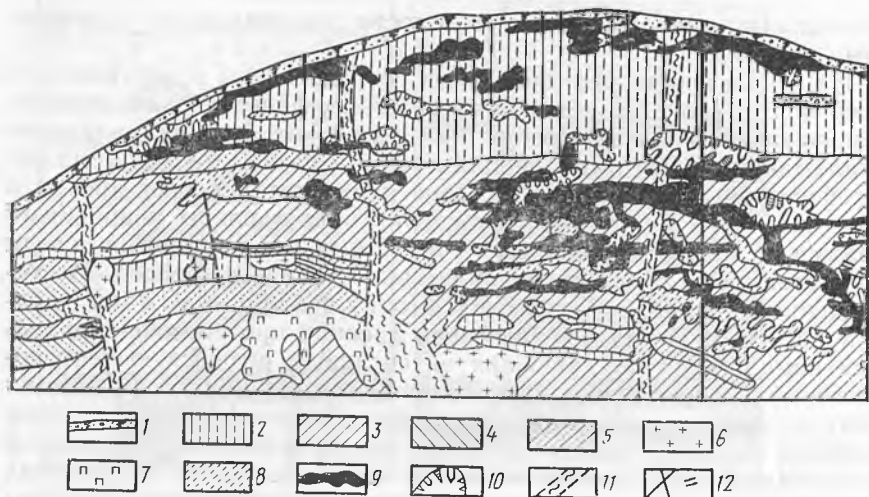


Рис. 48. Проявления хрустальной минерализации и метасоматоза на одном из месторождений Якутии. По М. М. Хотенку, Л. П. Черпышковой с дополнениями Е. П. Мельникова.

1 — растительно-делювиальный слой; 2 — кварциты слоистые; 3 — кварциты массивные; 4 — кварциты массивные, сильно фельшпатизированные с гематитом; 5 — кварцито-гнейсы; 6 — аляскитовые граниты; 7 — пегматиты; 8 — каолин-монтмориллоцитовые метасоматиты; 9 — кварцевые жилы; 10 — хрусталеносные гнезда; 11 — кварц-альбитовые метасоматиты; 12 — трещины

Фанерозойские хрусталеносные провинции Советского Союза и зарубежных стран приурочены к крупным геосинклинальным складчатым поясам (Урал, Альпы, Памир, Аппалачи, Верхоянье). Как справедливо подчеркивают А. Е. Карякин и В. А. Смирнова, в каждом регионе хрусталеносные провинции занимают вполне определенное структурно-геологическое положение, обусловленное особенностями превращения конкретных мобильных геосинклиналей в стабильные складчатые области, но всегда твердо устанавливается, что хрусталеносные жилы во всех складчатых поясах формировались в завершающий этап тектоно-метаморфического и магматического развития. Обычно во всех фанерозойских хрусталеносных провинциях выявляется локализация хрусталеносной минерализации в антиклинорных структурах, а в их пределах — в зонах долгоживущих разломов глубинного заложения. Так, на севере Центрально-Уральской провинции выделено три тектономагматогенно-метаморфических пояса — центральный, западный и восточный, с которыми связана хрусталеносная минерализация.

Установленный повторный метаморфизм зеленосланцевой фации вмещающих толщ имеет исключительно большое значение для развития и понимания процессов кварце- и хрусталеобразования. При этом хлориты диафторитов зеленосланцевой фации служат надежными геотермометрами стадийности метаморфических процессов. Так, общая железистость (F) хлоритов, образующихся на

прогрессивной стадии, равняется 47 %, а хлоритов регрессивной стадии 69 %. Поскольку хлориты регрессивной стадии на многих месторождениях сопровождают процесс хрусталеобразования и являются его индикаторами, то выявленная закономерность позволяет этому минералу служить поисковым признаком на скрытое оруденение.

Зоны гидротермально измененных пород, как правило, в рамках рудолокализирующих структур, контролирующих хрустальную минерализацию, развиваются значительно шире локальных кварцево-хрусталеносных зон. Наиболее распространенными наложенными гидротермальными процессами, сопутствующими хрусталеобразованию, являются хлоритизация, серицитизация, альбитизация, эпидотизация, карбонатизация, осветление, выщелачивание и другие менее распространенные.

В отличие от хорошо изученных северных месторождений горного хрусталя, пьезокварцевые проявления других районов входят в состав другой хрусталеносной провинции геосинклипального подвижного пояса. Хрусталеносная минерализация, связанная иногда с пегматитами, по главным образом с метаморфогенными кварцевыми жилами, обусловлена локальным проявлением диафтореза зеленосланцевой фации вдоль линейно вытянутых тектонически ослабленных зон. Хрусталеносные кварцевые жилы, залегающие в толщах кристаллических сланцев, метавулканитов и среди тел амфиболитов, гранитоидов по текстурно-структурным особенностям и физико-химическим параметрам относятся к поздним кварцевым жилам.

В хрусталеносных полях выделяются околожильные и окологнездовые изменения вмещающих пород. Первые сопровождают образование кварцевых жил, вторые — развитие хрусталеносных гнезд. Эти процессы разорваны во времени. Околожильные изменения выразились в хлоритизации, биотитизации или полевошпатизации пород основного состава и серицитизации (мусковитизации) пород кислого состава. Процессы околожильного метасоматоза в целом отличаются некоторой десиликацией пород, перераспределением щелочей и щелочноземельных элементов и приводят к созданию геохимического равновесия между кварцевой жилой и окружающей средой.

Окологнездовые преобразования вмещающих пород и жил — неотъемлемый процесс формирования минерализованных полостей, обуславливающий выщелачивание кремнезема и его переотложение в хрустальных гнездах (рис. 49). Размеры ореолов выщелачивания пропорциональны размерам гнезд, а интенсивность изменения пород — продуктивности минерализованных трещин; ширина зон метасоматических изменений колеблется от 10—15 см до 1—3 м. В зонах сближения хрусталеносных трещин мощность гидротермально измененных пород достигает 10—15 м и более [38]. Форма ореолов зависит от формы минерализованных полостей и сочетания трещин, т. е., в конечном счете, определяется структурой зон проницаемости растворов. Окологнездовые изменения

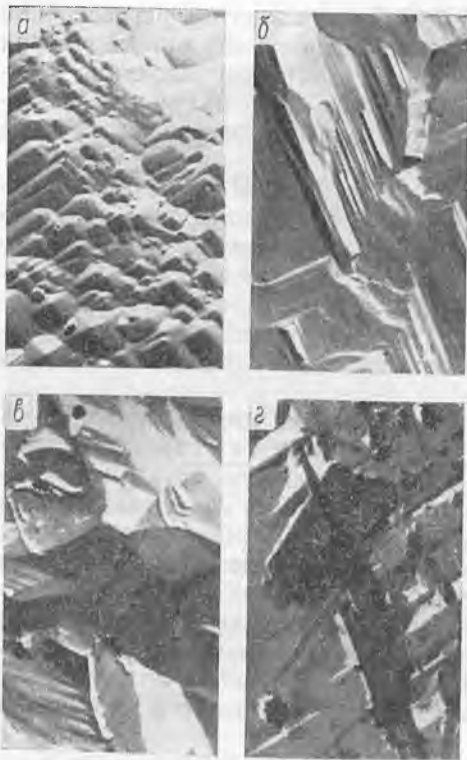


Рис. 49. Деформированный кварц формации П.Б.5 со следами интенсивного природного травления (а) и регенерации (б, в) по плоскостям совместного роста индивидов, включениями галлуазита и диккита (г). Якутия. Электронно-микроскопическая фотография угольной реплики. Увел. 12 000

характеризуются зональным строением. Выделяются зона разложения пород, отличающаяся развитием большого количества вторичных минералов, и зона выщелачивания. Границы между ними нечеткие, расплывчатые. Интенсивность выщелачивания возрастает по мере приближения к стенке полости. В непосредственной близости от гнезда растворяются, в первую очередь, кварц и цветные минералы.

Анализ имеющихся материалов позволяет все многообразие гидротермально измененных околосредовых пород на месторождениях горного хрусталя Урала объединить в четыре типа: 1) слюдястый, 2) слюдясто-альбитовый, 3) альбитовый и 4) гидрослюдясто-каолинитовый, проявляющиеся в зависимости от состава вмещающих пород, гидротермальных растворов, интенсивности и стадийности метасоматоза.

Опыт изучения подобных месторождений с учетом данных О. Н. Грязнова, В. Ю. Эшкина, Н. С. Кухаря, Ю. А. Шатнова и других позволяет установить стадийность метасоматических преобразований и оптимальное сочетание измененных пород для хрусталеобразования. На одном из месторождений горного хрусталя хорошо прослеживается наиболее полная полистадийная со вмещенная метасоматическая зональность вокруг хрусталеносных

кварцевых жил. Выделяются четыре стадии минералообразования, которым сопутствуют синхронные окологнездовые изменения вмещающих пород. Развиваясь вблизи гнезд, они разрастаются в стороны от них, вследствие чего происходит последовательное наложение тыловых зон на фронтальные.

Результирующая метасоматическая зональность имеет вид: первая стадия — околожилные изменения типа биотитизации пропилитизированных пород: плагиоклаз, актинолит, эпидот, биотит, хлорит, кварц, магнетит; вторая стадия — окологнездовые изменения слюдясто-альбитового типа: кварц, олигоклаз, альбит, хлорит, серицит, карбонат, гематит, горный хрусталь (в гнезде); третья стадия — окологнездовые изменения альбит-карбонатного типа: альбит, карбонат, фуксит, пирит, горный хрусталь (в гнезде); четвертая стадия — окологнездовые изменения глинистого типа — метааргиллизиты: каолинит, гидросерицит, диккит, накрит, карбонат, алунит, каолинит, горный хрусталь (в гнезде). Пространственно зональность реализуется в формировании сложного ореола метасоматических пород: биотит-хлоритовая зона (по пропилитизированным породам) — кварц-серицит-альбитовая зона — альбитовая (карбонат-альбитовая) зона — гидрослюдисто-каолинитовая зона — кварцево-хрусталеносная зона (хрусталеносная кварцевая жила). Последовательное совмещение продуктов второй — четвертой стадии хрусталеобразования в одних гнездах обусловило их высокую продуктивность и качество кристаллосырья. Приведенный пример развития сложной метасоматической зональности отражает наиболее оптимальное сочетание условий в образовании хрусталеносных кварцевых жил. Метасоматическая зональность может служить в хрусталеносных тектоно-метасоматических зонах надежным поисковым признаком на скрытые и слабопроявленные месторождения при геологоразведочных работах на горный хрусталь, а вмещенная зональность — критерием оценки продуктивности гнезд и качества сырья в жилах.

Кратко остановимся на сравнительной характеристике окологнездовых глинистых изменений вмещающих пород на метаморфогенных месторождениях горного хрусталя и постмагматических месторождениях горного хрусталя — аметиста.

Постмагматические гидротермальные аргиллизиты и метаморфогенные гидрослюдисто-каолинитовые метасоматиты существенно различаются геологическими условиями образования. Первые развиваются в гранитоидах и гнейсовых толщах, исходные породы которых претерпели метаморфизм не ниже амфиболитовой фации. Вторые возникают в породах различного состава, уровень метаморфизма которых соответствовал дозеленосланцевой, зеленосланцевой, а местами эпидот-амфиболитовой фации. Хрусталеносные аргиллизиты, причинно связанные с гранитным магматизмом, преобладают в куполовидных структурах гнейсовых ядер мигматитовых комплексов. Метаморфогенные глинистые породы с горным хрусталем формируются преимущественно в сланцевом обрамлении.

Обе группы глинистых образований сближает минералогическое сходство ореолов изменений, развитие тех же глинистых минералов в хрусталеносных гнездах и на гранях роста кристаллов горного хрусталя. Вместе с тем метаморфогенным окологнездовым породам свойствен более широкий набор глинистых минералов.

Послемагматические аргиллизиты характеризуются отчетливой метасоматической зональностью; метаморфогенные гидрослюдисто-каолинитовые метасоматиты — азональностью. Масштабы проявления, морфология ореолов измененных окологнездовых пород на месторождениях различного генезиса неодинаковы и определяются конкретной геолого-структурной обстановкой образования, что обуславливает их промышленное значение. Термодинамические условия роста кристаллов горного хрусталя из постмагматических и метаморфогенных растворов несколько различаются. Первым свойственны более низкие температуры (на 70—150 °С) и давления (на 10—80 МПа).

Проведенные материалы на современном уровне изученности гидротермальных месторождений горного хрусталя Урала позволяют говорить о наличии существенных различий в условиях образования глинистых пород в зависимости от их генезиса. В этой связи представляется возможным именовать гидрослюдисто-каолинитовые породы метаморфогенных месторождений метаргиллизитами, что подчеркивает их вещественное сходство с постмагматическими аргиллизитами и в то же время отражает конвергентность признаков метасоматитов различного происхождения. Несомненно, дальнейшие целенаправленные исследования позволяют с большей полнотой раскрыть закономерности образования и размещения месторождений горного хрусталя и в целом хрусталеносных тектоно-метасоматических зон.

Геологические, термобарометрические и геохимические данные об условиях образования кварцевых тел ортометаморфического класса, являющихся основными природными источниками высококачественного специального кварцевого сырья, позволяют констатировать следующее.

1. Кварцевые блоки и ядра слудоносных пегматитов, силектиты, существенно кварцевые региональные диафориты и кварцевые жилы рассмотренных формаций имеют метаморфогенно-гидротермальное происхождение, являясь конечными продуктами химических реакций между минералами в процессе их метаморфизма под воздействием метаморфогенных растворов в различных фациальных условиях, протекающих с освобождением кремнезема и последующей его кристаллизацией в виде свободного кварца.

2. Кварцевые тела метаморфогенной группы причинно и пространственно ассоциируют исключительно с метаморфическими комплексами различного типа и возраста: блоково-кварцевые мусковито-пегматитовые и силектитовые с гранито-гнейсами, кристаллическими сланцами, гнейсами, мигматитами (месторождения Урала и Прибайкалья в СССР); существенно кварцевые метасоматиты и монокварцевые метаморфиты (кварцевые жилы) форма-

ции с кристаллическими сланцами, амфиболитами, эклогитами, кварцитами (месторождения Дарджилинг в Индии, Урала в СССР); формации П.Б.2 — с метаморфическими сланцами, диафторитами, филлитами (месторождения Урала и Мугоджар в СССР); формации П.Б.4 — с углисто-кремнистыми сланцами, порфиритами, туфоалевролитами, мраморизованными известняками кремнисто-вулканогенных натровых серий (месторождения Урала и Забайкалья в СССР); формации П.Б.5 — с кристаллическими сланцами, диабазовыми и андезито-базальтовыми порфиритами, метасоматитами, мраморами, кварцитами (месторождения Сети Лагоас, Кристаллина в Бразилии, Покариса в Анголе, Мапакара, Антамболехибе на Мадагаскаре, Урала и Якутии в СССР).

В пользу метаморфогенного происхождения слюдоносных пегматитов, силектитов, существенно кварцевых диафторитов и монокварцевых метаморфитов (кварцевых жил) свидетельствуют: 1) залегание в метаморфических комплексах определенного фациального уровня, четкая связь с региональными разломами, зонами смятия и тектоно-метаморфической активизации; 2) пространственное размещение, согласующееся с зональностью регионального метаморфизма и генетически обусловленное ею; 3) отсутствие непосредственно установленной причинно-пространственной связи с конкретными интрузивными комплексами; 4) равномерное распределение теплового потока, проявляющееся в региональном развитии метаморфических пород определенных минеральных фаций и ассоциирующих с ними мигматитов, пегматитов, силектитов, метагидротермалитов при отсутствии явлений контактового метаморфизма; 5) наличие тневых реликтов, скиалитов и ксенолитов метаморфических пород; 6) идентичность минеральных парагенезисов в кварцевых телах и вмещающих породах, за исключением случаев наложенного хрусталеобразования; 7) сходство термодинамических и геохимических особенностей газово-жидких включений и изоморфных примесей в кварце с *PT*-условиями и геохимической эволюцией определенных этапов регионального метаморфизма; 8) временное положение конкретных метаневматолитов и метагидротермалитов, согласующееся с временем проявления регионального метаморфизма определенного фациального уровня.

3. Вследствие того что метаморфогенные кварцевые тела формируются при низких градиентах температуры и давления, они имеют регионально выдержанный структурно-минералогический облик, контролируемый распространением метаморфических комплексов определенного фациального уровня, тогда как постмагматически-гидротермальные кварцевые жилы быстро меняют структуру и минеральный состав при удалении от эндоконтакта материнского плутона. Этим же объясняются изофаціальность метаморфогенных кварцевых образований с вмещающими породами, меньшее по сравнению с постмагматически-гидротермальными жилами число основных минеральных компонентов (обычно менее 8), их более равномерное распределение в жильной массе и, как правило, отсутствие отчетливо зональных метасоматитов.

Таблица 6

Сравнительная характеристика постмагматических и метаморфогенно-гидротермальных кварцевых образований

Признаки	Метаморфогенные образования	Постмагматические образования
Генерирующие комплексы	Метаморфические	Вулкано-плутонические
Главные факторы локализации	Метаморфическая зональность	Гидротермальные ореолы
Метасоматические изменения	Азональные диафориты	Зональные метасоматиты
Распределение минералов-примесей	Равномерное	Неравномерное
Светопропускание кварца	15—78 (сред. 37)	1—47 (сред. 25)
Состав ГЖВ	Углекисловодный	Преимущественно хлоридный
Σ общ. эл.-примесей ($n \cdot 10^{-4} \%$)	133	530
Σ окр. эл.-примесей ($n \cdot 10^{-4} \%$)	9	24
V_{H_2O} / V_{CO_2}	2,6	4,5
$K_a = Al / \Sigma$ общ. эл.-примесей	47	67
CO_2 в растворах (мол/кг H_2O)	4,00	2,62
$K_{щ} = Na + Li + K / \Sigma$ общ. эл.-примесей	36	25
$K_T = Ti / \Sigma$ общ. эл.-примесей	2,5	1,8
$K_n = Na / K$	3,0	0,8

4. Определяющими рудоконтролирующими факторами для месторождений ортометаморфического класса являются метаморфический, тектонический и литологический.

5. Геохимические особенности кварца метаморфогенно-гидротермального генезиса (табл. 6) заключаются преимущественно в углекисло-водном составе газовой-жидких включений или в повышенном (в среднем 4,0 мол/кг H_2O , по данным В. А. Буряка), по сравнению с кварцем постмагматически-гидротермального класса, общем содержании в кварце элементов-примесей (от 73 до $228 \cdot 10^{-4} \%$ в различных формациях) и окрашивающих кварцевое стекло компонентов ($4—15 \cdot 10^{-4} \%$); низких значениях отношения H_2O/CO_2 в пределах 1,4—3,6 и коэффициента алюминиевости ($K_a = 40—56$) и, напротив, высоких коэффициентах щелочности ($K_{щ} = 28—47$), титанистости ($K_T = 1,8—3,3$), натриевости ($K_n = 2,64—3,38$).

ГЕНЕЗИС МЕТАМОРФОГЕННЫХ КВАРЦЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

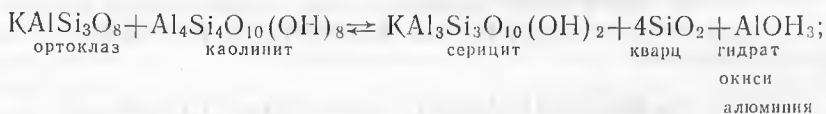
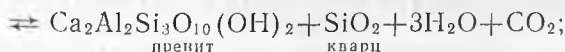
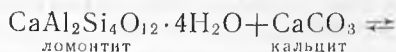
Расшифровка обстановки формирования природных кварцевых образований, а следовательно и закономерностей их размещения в земной коре, определяющих научные основы прогноза и поиска месторождений кварцевого сырья, осложняются чрезвычайным раз-

нообразием геолого-генетических и термобарогеохимических условий локализации кварцевых объектов. Известно, что концентрация свободного кремнезема осуществляется в виде кварцевых жил, преимущественно кварцевых тел и пластов при магматических, метаморфических, метасоматических и осадочных процессах в очень широком диапазоне термодинамических условий.

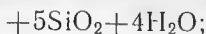
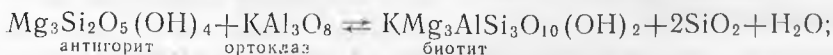
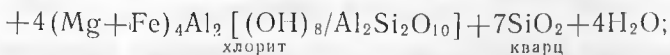
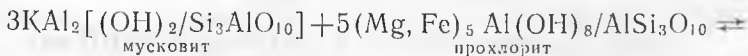
К ВОПРОСУ О МОБИЛИЗАЦИИ И АККУМУЛЯЦИИ КРЕМНЕЗЕМА В ЗЕМНОЙ КОРЕ

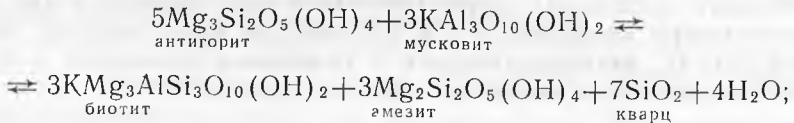
Разнообразие геологических условий проявления кварцевой минерализации свидетельствует о том, что процессы мобилизации и аккумуляции свободного SiO_2 являются обязательной составной частью подавляющего большинства генетически различных петрогенных процессов и обусловлены исключительно важной ролью кремния в геохимии литосферы. Примерами реакций, характеризующих освобождение кремнезема при генетически различных процессах минералообразования, могут служить:

а) реакции, идущие при переходе от стадии диагенеза к низкотемпературной ассоциации фаций зеленых сланцев:

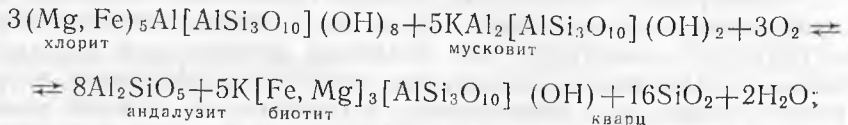


б) реакции, протекающие в условиях зеленосланцевой, лавсонит-глаукофановой и на нижней границе эпидот-амфиболитовой фации:

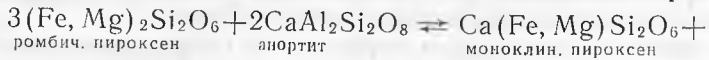




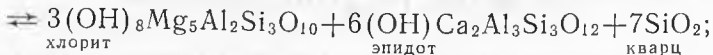
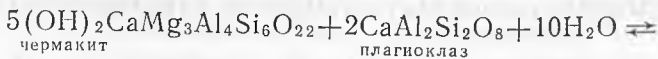
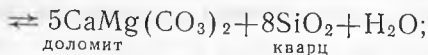
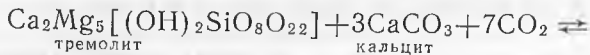
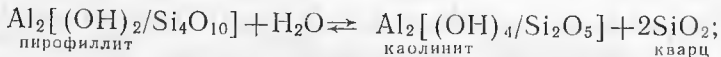
в) реакции между минералами при контактном метаморфизме:



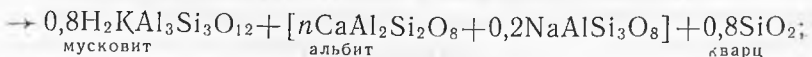
г) реакции в условиях гранулитовой и эклогитовой фаций:

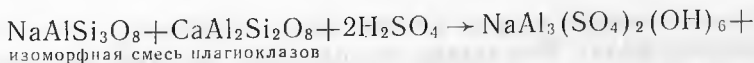


д) реакции диафтореза:

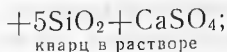


е) реакции разнообразных метасоматических процессов преобразования пород:



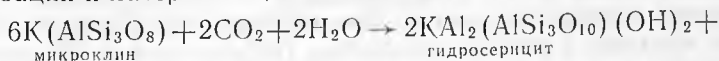


изоморфная смесь плагиоклазов



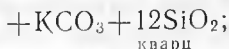
кварц в растворе

ж) реакции, происходящие при экзогенных процессах гидродизации и латеритизации:



микрочлин

гидросерцит



кварц



каолинит

диаспор

халцедон

Особенности и масштабы процессов выщелачивания кремнезема из вмещающих пород самого различного состава, а также из ранних кварцевых жил и отложение его во вновь образованных хрусталеносных полостях и минерализованных трещинах в результате воздействия наложенных поздних гидротермально-метасоматических изменений, приводящих к хрусталеобразованию, наглядно проиллюстрированы А. Е. Карякиным, В. А. Смирновой и Л. М. Петрухой, А. А. Евстроповым. По их данным, вынос кремнезема из пород основного и среднего состава колеблется от 171 до 972 кг на 1 м³ горной породы, составляя в среднем 419 кг (9 определений). При изменении кислых пород из околосредового пространства мигрирует от 184 до 994 кг на 1 м³ породы при среднем количестве 408 кг ($n=17$). Эти данные позволяют высказать мнение, что интенсивность выщелачивания кремнезема при околосредовом метасоматозе практически не зависит от состава исходной породы. Масштабы высвобождения кремнезема при минералогических преобразованиях регионального метаморфизма, естественно, еще более значительны. Подсчет баланса SiO₂ при переходе от пренит-пумпеллитовой к зеленосланцевой фации при метаморфизме базальтовых порфиритов произведен В. Б. Болтыровым, показавшим, что из 1 км³ пород высвобождается 66 млн. т SiO₂, достаточного для образования более 200 кварцевых жил с параметрами 100×10×100 м.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ КВАРЦЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Формируясь в различной геологической обстановке, природные кварцевые образования, естественно, должны иметь отличия в свойствах (структуре, составе и количестве минеральных, газово-жидких и структурных примесей кварца), отражающих их генетические особенности. Для расшифровки этих особенностей нами систематизированы имеющиеся материалы и получены дополнительные данные по определению давлений, состава растворов и темпе-

ратур образования кварца в пегматитах, силекситах, силектитах и кварцевых жилах. Результаты исследований частично отражены на рис. 50, 51, где показаны соотношения температур и давлений образования кварца из различных пегматитовых и гидротермальных месторождений.

Составленная диаграмма оказалась весьма сходной с диаграммой, полученной А. И. Тугариновым и Г. Б. Наумовым [43], на основании обобщения данных термодинамических условий образования жильных и рудных минералов 160 месторождений мира. По отношению к диаграмме этих авторов наша диаграмма, при сохранении внешнего подобия, несколько сдвинута в область более высоких температур и давлений. Это объясняется тем, что нами использовались начальные (максимальные) параметры образования жильного кварца. При построении диаграммы преимущественно применялись термобарогеохимические характеристики кварца различных месторождений, полученные изучением законсервированных в нем первичных газовой-жидких включений. И только в редких случаях (например, при определении *PT*-условий формирования пегматитов) дополнительно учитывались и данные, полученные по другим слагающим их минералам (полевым шпатам, гранатам, биотитам). И еще одно отличие от диаграммы упомянутых авторов — нами использовались данные только по месторождениям «кварцевого парагенезиса», где кварц создает существенные мономинеральные скопления.

На диаграмме (см. рис. 50) фигуративные точки образуют две отчетливые ветви, сливающиеся с понижением температур и давлений в одно широкое поле в области образования гидротермальных месторождений.

Ветвь I объединяет месторождения, образовавшиеся в интервале давлений 0—200 МПа, т. е. являющиеся близповерхностными магматогенными образованиями. Месторождения в этой ветви по мере снижения температур образуют последовательный ряд: хрусталеносные пегматиты (поле I^a), редкометалльные пегматиты и магматогенные силекситы среднеуральского типа (поле I^b), смешанное поле жильных кварцев золоторудных, полиметаллических, редкометалльных, ртутно-сурьмяных и других месторождений, часть из которых (низкотемпературных гидротермальных) попадает в область слияния двух ветвей (поле I^b). Кварц ядерных частей хрусталеносных и флюоритоносных пегматитов образуется выше прямой α — β -перехода и при резком снижении температуры может переходить в зернистый агрегат, так называемый «сотовый» кварц.

Ветвь II представляет метаморфогенные месторождения слюдоносных пегматитов и силектитов слюдоносной формации, образующихся при очень высоких давлениях от 500 до 900 МПа и температурах от 500 до 700 °С (поле II^a), месторождения редкоземельных пегматитов (поле II^b), месторождения гранулированного (поле II^a), гетерозернистого молочно-белого (поле II^r) и хрусталеносного (поле II^a) кварца. Все перечисленные группы месторождений образуются ниже прямой α — β -трансформации кварца. Од-

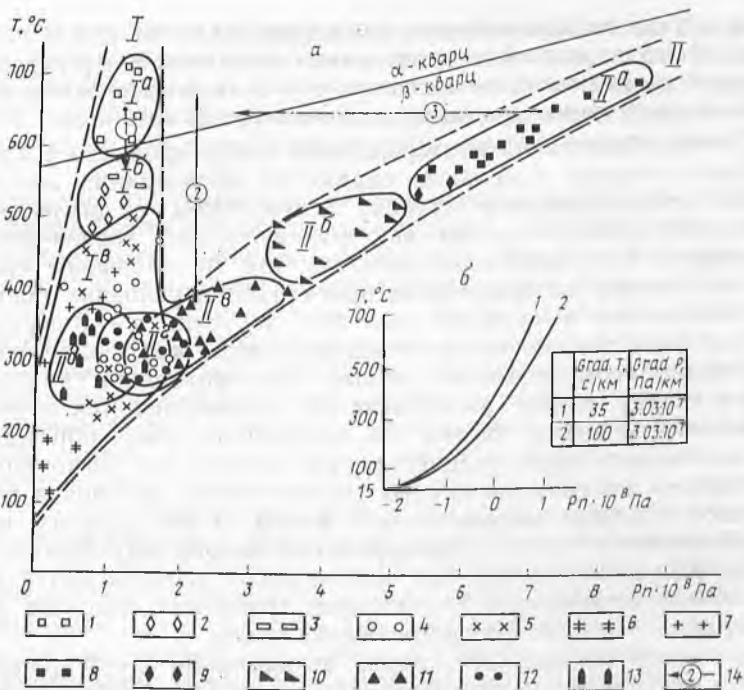


Рис. 50. *PT*-условия формирования природных кварцевых образований различного генезиса.

a — термодинамические условия формирования природных кварцевых образований. I — ветвь магматогенных образований; 1 — хрусталеносные пегматиты; 2 — редкометалльные пегматиты; 3 — силекситы; 4 — кварц-редкометалльные; 5 — кварц-золоторудные; 6 — кварц-ртутно-сурьмяные; 7 — кварц-полнметаллические образования; II — ветвь метаморфогенных образований; 8 — слюдоносные пегматиты; 9 — силектиты; 10 — редкоземельные пегматиты; 11 — гранулированные кварцевые жилы; 12 — негранулированные кварцевые жилы; 13 — хрусталеносные кварцевые жилы; 14 — принципиальные варианты грануляции кварца при изменении термодинамических условий с участием α - β -трансформации: 1 — при снижении температуры (охлаждении), 2 — при повышении температуры (высокотемпературном отжиге), 3 — при спаде давления (разгерметизации). б — растворимость кварца в воде по двум геотермобарам

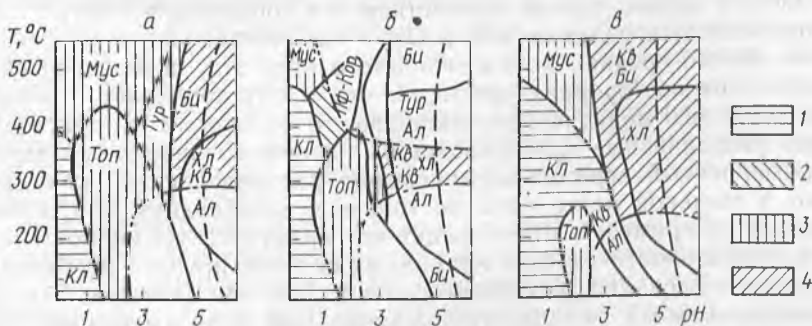


Рис. 51. Поля устойчивости минеральных парагенезисов кварцосодержащих метасоматитов.

Стадии кислотного выщелачивания при давлении: *a* — $0.5 \cdot 10^8$ Па, *б* — $1 \cdot 10^8$ Па, *в* — $1.5 \cdot 10^8$ Па и активности компонентов 3,1 т (натрий, калий) и 0,01 т (все остальные); 1 — аргиллизиты; 2 — вторичные кварциты; 3 — грейзены; 4 — прожилиты

нако в случае изотермического снижения давления кварц слюдосодержащих пегматитов и силектитов может испытать α — β -переход с образованием гранулированных структур, а кварцевые жилы могут испытать грануляцию при высокотемпературном «отжиге».

РТ-поле образования месторождений гранулированного кварца фиксирует, видимо, начальные параметры образования жил первичного гетерозернистого кварца. Температуры и давления их образования определены по внутригранулярным газовой-жидким включениям. Есть основание полагать, что метаморфизм кварца этих жил вплоть до грануляции происходил в условиях повышения температуры и частично давления, до точки α — β -перехода. В пользу этого предположения свидетельствуют как геологические, так и термобарометрические данные. Месторождения гранулированного кварца обычно располагаются в наиболее тектонически напряженных ядерных частях или внутренних зонах обрамлений гнейсово-мигматитовых комплексов, или в пределах региональных «зон смятия» метаморфизованных соответственно до уровня амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций. В тех случаях, когда жилы вторичного микро-, тонкозернистого кварца встречаются среди зеленосланцевых пород, они, как правило, располагаются в узкой экзоконтактной зоне аллохтонных гранитных массивов и содержат лишь частично гранулированный кварц.

Бластогранулированный кварц, испытавший α — β -трансформацию и последующую тектоническую переработку с регенерацией индивидов, способствующей его очищению от минеральных и газовой-жидких примесей в условиях повышенного давления, образуется в условиях эклогитовой, гранулитовой и амфиболитовой фаций. На уровне эпидот-амфиболитовой фации формируется катаклазгранулированный кварц. Подвергшийся тектонической переработке по узким локальным зонам в РТ-условиях не выше зеленосланцевой фации без участия α — β -перехода, кварц мы предлагаем именовать фрагментарногранулированным, или рекристаллизационногранулированным.

Если в первом случае осуществляется «объемная» грануляция, захватывающая целиком всю жилу и заканчивающаяся образованием обычно среднего-, крупнозернистого агрегата, интенсивно очищенного от посторонних примесей, что и обуславливает в конечном итоге его практическое значение, то во втором — происходят лишь узколинейные преобразования первичного кварца в микро-, тонкозернистый агрегат, неравномерно распределенный, как правило, в жильной массе (обычно только у зальбандов), слабо очищенный от примесей, что снижает его практическую ценность из-за нестабильности свойств кварца, даже если процесс рекристаллизации и проявлен достаточно сильно. Другими словами, бластогранулированный, катаклазгранулированный и фрагментарно гранулированный кварц имеют не только различное происхождение, но и различное промышленное значение.

Рассмотрим процесс жилообразования в участке тепловой аномалии, создаваемой гранитной интрузией или метаморфогенным

тепловым потоком на стадии разогрева боковых пород. Кварцевые жилы, образующиеся на стадии разогрева боковых пород, на некотором оптимальном удалении, зависящем от мощности теплового потока и теплофизических свойств вмещающих пород, в последующие моменты времени подвергаются высокотемпературному отжигу.

Известно, что нагревание кварцев сопровождается увеличением их коэффициента объемного расширения, скачкообразно возрастающего вблизи точки α — β -перехода. Возникающие при этом термоупругие напряжения разрешаются путем появления в кварцах различных деформационных структур (сотовых трещин), в предельном случае его грануляции. Подобный механизм возможен при разогреве жил в условиях прогрессивного метаморфизма. На факт разогрева первично крупно- и гигантозернистого более низкотемпературного кварца и последующей его грануляции указывают замеры *PT*-параметров гранулированного кварца в межгранулярном пространстве. Нередко они на 150—250 °С выше температур образования первичного кварца. Но в принципе возможен и обратный вариант — грануляция первично высокотемпературного кварца при спаде температуры. В области слияния двух ветвей располагаются образования, видимо, смешанного генезиса: метаморфогенные хрусталеносные и магматогенные золоторудные, редкометалльные, ртутные, сурьмяные, полиметаллические.

Общая закономерность, выявляемая на *PT*-диаграмме: для месторождений всех без исключения формаций при фиксированной температуре их образования существуют предельные значения давлений, выше которых эти месторождения не образуются. Такая эмпирическая закономерность предположительно может быть объяснена в гидротермальной области критическими состояниями в системе $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. Подавляющее число точек находится в области субкритических, т. е. двухфазовых состояний. В области более высоких температур и давлений, в частности для пегматитов, установленная закономерность объясняется, видимо, коррелятивной связью между давлением и оптимальными температурами их образования. В *PT*-области слияния ветвей I и II устойчивость минеральных парагенезисов, в том числе и кварцосодержащих, определяется не только температурой и давлением, но в значительной мере и рН рудообразующих растворов. По этой причине мы видим слияние (отсутствие четкого разграничения) *PT*-полей образования кварца различных формаций: золоторудных, редкометалльных, хрусталеносных и др.

Для иллюстрации существенного влияния рН на формирование минеральных парагенезисов кварцосодержащих метасоматитов воспользуемся диаграммами И. Н. Говорова, составленными в координатах рН — *T* как раз для *PT*-области образования гидротермально-метасоматических месторождений. Из приведенных диаграмм видно, что для фиксированных значений температуры и давления в зависимости от значения рН мы можем иметь устойчивые парагенезисы кварцосодержащих аргиллизитов, вторичных

кварцитов, грейзенов и пропилитов. Определяющее значение рН минерализующих растворов, видимо, характерно лишь для близ-поверхностных месторождений. С увеличением глубины их образования интервалы изменения значений рН сужаются, и *PT*-параметры становятся единственно определяющими устойчивость кварцосодержащих минеральных парагенезисов.

В близповерхностных условиях с температурами до 450—500 °С и давлениями до 150 МПа, т. е. в смешанной области образования месторождений различных формаций, встречаются широко проявленные различные метасоматиты, что объясняется широкими вариациями в этих условиях значений рН. С увеличением глубины, т. е. с повышением давлений, интенсивность проявления метасоматических изменений снижается, наряду с этим уменьшается и их количество, исчезают аргиллизиты, вторичные кварциты, частично грейзены. Кварцосодержащие месторождения, формирующиеся при высоких *PT*-параметрах, уже, как правило, изофациальны с вмещающими породами и не сопровождаются картируемыми метасоматическими изменениями.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КВАРЦА МАГМАТОГЕННОГО И МЕТАМОРФОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

С целью уточнения генезиса термодинамических условий формирования кварцевых образований выделенных формаций и установления свойств слагающего их кварца были отобраны серии контрольных проб (от 16 до 30) на генотипах месторождений каждой формации (всего опробовано 137 месторождений в 15 регионах). Систематизированы аналитические данные по объектам кварцевого сырья специализированных лабораторий производственного объединения «Уралкварцсамоцветы» (спектроскопия на 12 элементов — Cu, Ni, Co, Cr, Pb, Al, Ti, Fe, Ca, Mg, Li, Ge, определение щелочей Na, K методом фотометрии иламени, определение коэффициента светопропускания кварца), Свердловского горного института (ИК-спектроскопия, нейтронно-активационные исследования, анализ летучих компонентов — «влага — газ», прецизионные определения параметров элементарной ячейки кварца, электронная микроскопия), МГУ (масс-спектрометрия), института геологии Башкирского филиала АН СССР (декрепитация, криометрия, дериватография), ВНИИСИМСа (гомогенизация, спектрохимия). Всего в работе использовано более 4000 анализов. Статистическая обработка результатов анализов (определение средних значений, стандартных отклонений, дисперсии, коэффициентов вариации, гистограмм распределения) проведена нами по программе «Status» с использованием ЭВМ ЕС-1022 информационно-вычислительного центра объединения «Уралгеология».

Анализ полученных статистических величин показывает следующее. В качестве типоморфных формационных критериев могут использоваться такие известные физико-химические параметры

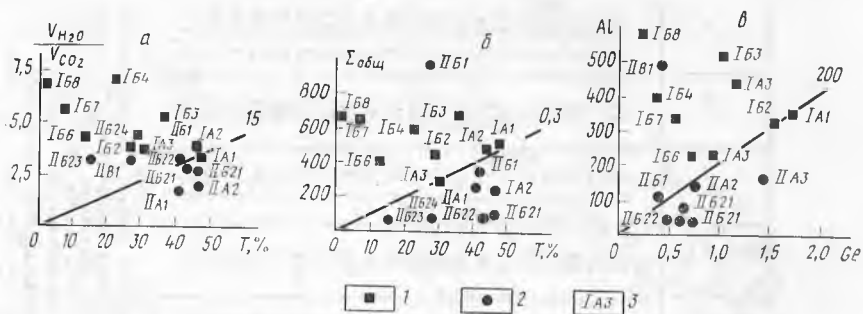


Рис. 52. Диаграммы физико-химических параметров эндогенного кварца.

1 — кварц магматогенных формаций; 2 — кварц метаморфогенных формаций; 3 — индексы формаций и средние значения (\bar{X}) параметров кварца соответствуют данным табл. 7. Ниже разделительных линий — кварц, пригодный для производства прозрачного кварцевого и многокомпонентного оптического стекла

кварца как водный показатель (отношение V_{H_2O} / V_{CO_2}), коэффициент светопропускания и предлагаемые геохимические коэффициенты — содержание в кварце алюминия, германия, рудных (Cu, Ni, Gr, Pb), щелочных (Na, Li, K) компонентов, общей суммы элементов-примесей, коэффициенты титанистости ($K_T = \frac{Ti}{\sum \text{общ. эл.}} \times 100\%$), алюминивости ($K_{Al} = \frac{Al}{\sum \text{общ. эл.}} \cdot 100\%$), щелочности ($K_{щ} = \frac{Na + Li + K}{\sum \text{общ. эл.}} \cdot 100\%$) и натриевости ($K_{Na} = \frac{Na}{K}$), приведенные в табл. 7 и на рис. 52. Наиболее контрастными из них являются водный показатель, коэффициенты титанистости, натриевости, алюминивости, общая сумма элементов-примесей. Следует отметить, что все эти характеристики должны рассматриваться как среднестатистические величины. По перечисленным физико-химическим параметрам и геохимическим коэффициентам в совокупности с геологическими наблюдениями достаточно надежно устанавливаются генетическая, формационная принадлежность кварцевых образований и, как следствие, свойства слагающего их кварца.

Коэффициент светопропускания (T) кварца формаций постмагматического класса изменяется (табл. 7) от 47% в редкометалльных пегматитах до 1—2% в джаспероидах, в среднем составляя для образований магматогенной группы 25%. Для кварца формаций ортометаморфического класса он колеблется также от 47% слудоносных пегматитах, но уже только до 15% в кварцевых пегматитовых жилах, в целом для образований метаморфогенной группы составляя 37% и значительно превышая подобный показатель предыдущей группы. Аналогичная тенденция поведения количественных показателей устанавливается для коэффициента титанистости (K_T), изменяющегося от 2,7 (хрусталоносные пегматиты) до 1,0 (джаспероиды) в первой группе образований и от 3,0 (слудоносные пегматиты) до 1,8 (хрусталоносные кварцевые жи-

Средние значения (\bar{X}) основных физико-химических параметров и геохимических коэффициентов эндогенного кварца различных формаций

Индекс формационных рядов	Объем выборок, кг	T, %	VH ₂ O		V _{общ}	VH ₂ O/VCO ₂	Al	Ge	$\pi \cdot 10^{-1}$ %				K _а	K _т	K _щ	K _н
			сд ³ на 100 г кварца	V _{CO₂}					Σ руд. эл.	Σ окр. эл.	Σ щел. эл.	Σ общ. эл.				
I.A.1	26	47	15	9	24	3,1	350	1,70	1,00	29	76	510	79	2,6	14	1,18
I.A.2	31	45	32	9	41	3,5	435	1,15	1,07	20	90	499	75	2,7	9	1,70
I.A.3	503	30	11	4	15	2,9	233	0,91	0,63	7	47	292	72	2,2	21	1,03
I.B.2	17	28	36	12	47	3,1	330	1,55	0,36	10	174	461	71	1,7	26	1,28
I.B.3	17	36	42	8	50	3,3	315	1,02	1,25	40	142	680	70	2,7	10	0,22
I.B.4	16	22	71	10	81	7,1	398	0,36	1,08	33	183	533	67	1,5	31	0,10
I.B.5	45	13	48	11	59	4,3	231	0,7	1,07	18	179	400	54	1,1	34	0,67
I.B.7	20	7	53	10	63	5,6	340	0,55	1,69	29	218	634	59	1,0	37	0,27
I.B.8	17	1	69	8	78	6,7	582	0,24	1,79	34	220	650	67	1,0	33	0,40
Среднее	165	41	5	3	8	4,6	379	0,91	1,10	24	148	530	67	1,8	25	0,76
II.A.1	284	47	8	4	12	1,7	157	1,44	1,38	15	46	228	56	3,0	28	3,38
II.A.2	611	46	11	4	15	2,6	138	0,76	0,98	12	41	225	53	2,8	30	3,08
II.B.2	35	44	16	6	22	2,8	58	0,60	0,60	8	31	107	46	3,3	33	3,04
II.B.3	295	15	18	7	25	3,2	49	0,58	0,48	6	24	85	43	2,5	37	2,82
II.B.4	305	28	58	16	74	3,6	42	0,53	0,45	8	35	78	41	1,8	40	2,84
II.B.5	1246	33	22	11	32	2,7	38	0,71	0,39	4	50	73	40	1,8	47	2,64
Среднее	48	42	26	7	26	2,6	48	0,59	0,51	7	28	90	45	2,6	38	2,99
II.B.1	72	27	32	10	34	3,2	110	0,41	4,47	25	257	346	48	4,5	36	3,00
II.B.1					42	3,2	492	0,40	4,01	99	505	970	40	3,2	52	2,20

Примечание. T (коэффициент светопропускания) = I_0/I ; 100 %, где I_0 — интенсивность падающего светового потока, I — интенсивность выходящего светового потока. Сумма рудных элементов-примесей в кварце (Σ руд. эл.) = Cu+Ni+Cr+Pb; сумма элементов-примесей в кварце, создающих окрашивающие включения в наплавленном стекле (Σ окр. эл.) = Cu+Ni+Cr+Pb+Ti+Fe+Mn; сумма щелочных элементов-примесей в кварце (Σ щел. эл.) = Na+Li+K; общая сумма элементов-примесей в кварце (Σ общ. эл.) = Cu+Ni+Cr+Pb+Ti+Fe+Mn+Ca+Mg+Al+Ge+Na+Li+K, определяемых химико-спектральным анализом по методике ГИРЕДМЕТА; коэффициент алюминивости кварца $K_a = \frac{Al}{\Sigma}$ общ. эл.; 100 %; коэффициент титанности кварца $K_t = \frac{Ti}{\Sigma}$ общ. эл.; 100 %; коэффициент щелочности кварца $K_{щ} = \frac{Na+Li+K}{\Sigma}$ общ. эл.; $\times 100$ %; коэффициент натриевости кварца $K_n = \frac{Na}{K}$.

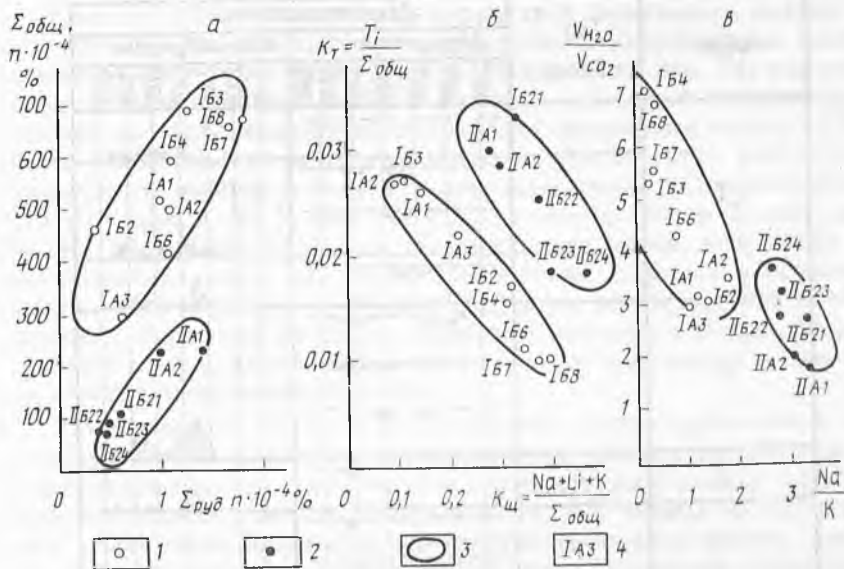


Рис. 53. Диаграммы геохимических параметров кварца магматогенного и метаморфогенного генезиса.

1 — кварц магматогенных формаций; 2 — кварц метаморфогенных формаций; 3 — поля средних значений (\bar{X}) параметров кварца различного генезиса; 4 — индексы формаций и значения параметров кварца соответствуют данным табл. 7

лы) — во второй, в среднем составляя соответственно 1,8 и 2,5, для коэффициента натриевости (K_n) с интервалом колебаний от 1,18 (редкометалльные пегматиты) до 0,10 (вторичные кварциты) для магматогенной и от 3,38 (слюдоносные пегматиты) до 2,64 (хрусталеносные кварцевые жилы) для метаморфогенной групп, в среднем составляя 0,76 и 3,0 соответственно, а также для коэффициента щелочности ($K_{щ}$ со средними значениями 25 для первой группы и 36 для второй).

Обратная тенденция изменения количественных показателей наблюдается для таких параметров как отношение «влага — газ», содержание алюминия, сумма рудных компонентов, щелочей, общая сумма элементов-примесей и других. Наиболее значительная разница в средних числовых характеристиках отмечается для содержания Al (379 — I группа и 80 — II группа), суммы щелочей (соответственно 148 и 38), общей суммы примесей (530 и 133) и отношения V_{H_2O}/V_{CO_2} (4,6 и 2,6). На рис. 53 приведены диаграммы геохимических параметров кварца постмагматического и оргоморфического происхождения, выполненные в координатах Σ общ. эл. — Σ руд. эл., Σ общ. эл. — окр. эл., Σ общ. эл. — щел., K_T — K_a , K_T — $K_{щ}$, V_{H_2O}/V_{CO_2} — K_n . На всех диаграммах фигуративные точки показателей кварца выделенных формаций образуют самостоятельные изолированные поля, демонстрируя различия генезиса и свойств кварца магматогенной и метаморфогенной групп.

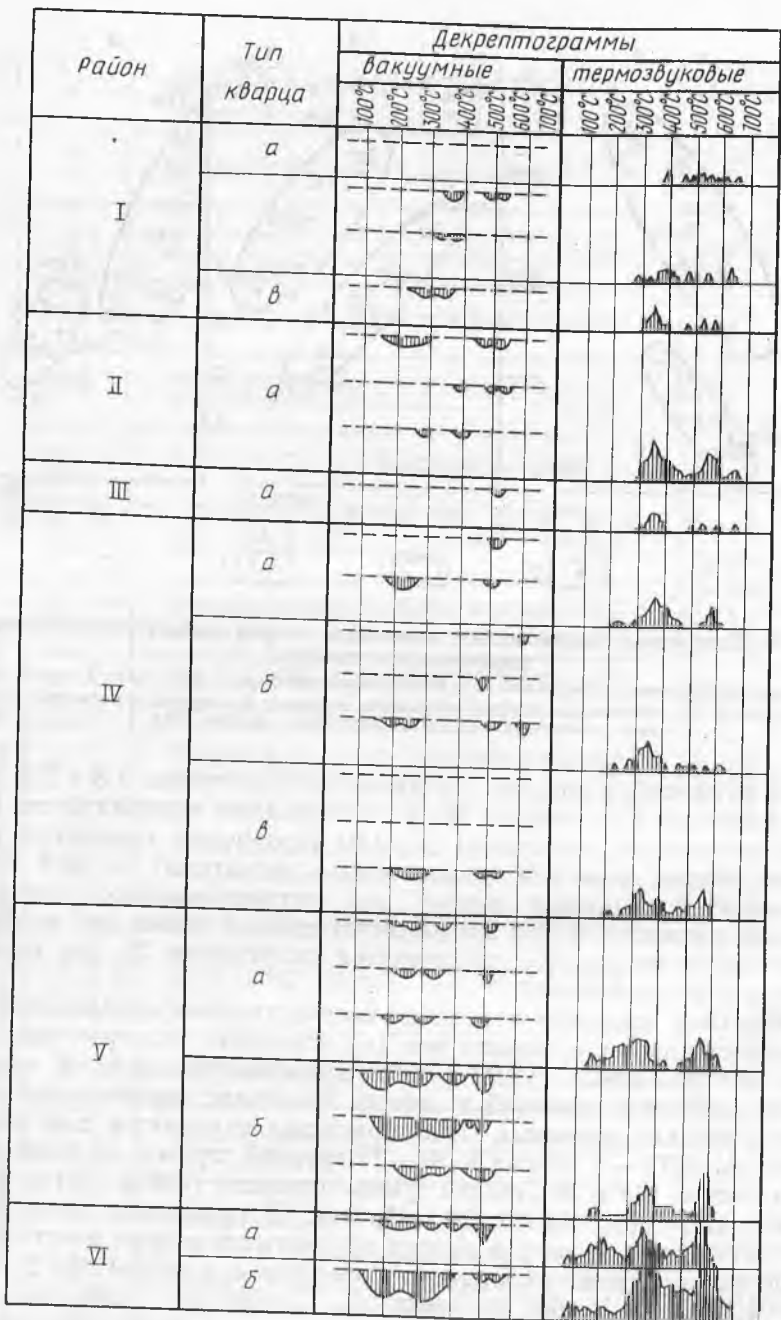


Рис. 54. Вакуумные и термозвуковые декрептограммы формационных типов кварца месторождений Урала.

Кварц: I — ядерный гранулированный из пегматитов; II — силекситовый; III — силектитовый; IV — жильный гранулированный; V — жильный молочно-белый; VI — жильный хрусталоносный. Ia, Ib, IIa, IIб, IVa, IVб — Средний Урал; Iб, IVв, Va, Vб, VIa — Южный Урал; VIб — Северный Урал

Влияние физико-химических параметров эндогенного кварца на его пригодность для получения прозрачного кварцевого и многокомпонентного оптического стекла показано на рис. 54, где приведены характеристика кварца согласно табл. 7 и эмпирические данные по эксплуатации месторождений кварцевого сырья СССР и его использования в промышленности. Анализ этих материалов приводит к выводу о том, что при отношении светопропускания (T) к $V_{\text{общ}} < 2$, $T: \Sigma$ общ. эл. $< 0,3$, а $Al:Ge$ 200 и Σ щел. эл.: $Na/K < 60$ — кварц пригоден для указанных целей. Как видно из приведенных диаграмм, таким требованиям отвечает в основном кварц метаморфогенных формаций. Кварц некоторых постмагматических формаций по своим свойствам находится вблизи от разграничительных линий, большинство же его непригодно для плавки и оптического стекловарения.

Установленные зависимости изменения физико-химических параметров и геохимических коэффициентов кварца магматогенной и метаморфогенной групп, вместе с ранее приведенными термобарометрическими данными, свидетельствуют в общем об образовании выделенных формаций ортометаморфического класса, кварц которых пригоден для плавки прозрачного кварцевого стекла при более высоких температурах и в особенности давлениях по сравнению с кварцем большинства постмагматических формаций. Это, в частности, подтверждается величиной отношения V_{H_2O} / V_{CO_2} , отвечающего обычно условиям амфиболитовой, гранулитовой и эпидот-амфиболитовой фаций, а также повышенным коэффициентом щелочности и высоким содержанием титана [30]. Одновременно значениями коэффициента натриевости наглядно иллюстрируется закономерность, выявленная А. А. Маракушевым и заключающаяся в преобладании в метаморфогенно-гидротермальных растворах на ранних стадиях геосинклинального развития натрия, а на поздних — калия. Действительно, в метаморфогенных кварцевых образованиях, в целом формирующихся ранее магматогенных в пределах одного тектономагмато-метаморфического цикла, содержание Na в составе щелочей в 2—3 раза превышает его содержание в постмагматическом кварце. Причем, если для редкометалльных, хрусталеносных, пегматитов, силекситов и грейзено-кварцевых тел магматогенной группы наблюдается приблизительное равенство во флюиде содержаний Na и K или незначительное преобладание K, то для полевошпат-кварцевых, березито-кварцевых, аргиллизито-кварцевых и джаспероидных тел, формирующихся на заключительных этапах развития складчатых поясов или в периоды тектономагматической и метаморфической активизации, характерно резкое преобладание K в растворах (см. табл. 7).

Генезис кварцевых тел постмагматического происхождения, сложенных гетерозернистым стекловидным и молочно-белым кварцем не вызывает особых разногласий среди исследователей. В зависимости от конкретной геологической обстановки это или несомненные метасоматиты, или типичные жилы конкреционного типа с шестоватыми агрегатами первого и второго рода в особенности в

центральных частях. В отношении же метаморфогенных жил и, в частности, гранулированного кварца, существуют различные точки зрения, поэтому этим образованиям было уделено при изучении большее внимание. Для них было определено наибольшее количество T и P гомогенизации и состава газовой-жидких включений (ГЖВ), PT -параметров $\alpha - \beta$ -перехода кварца, нейтронно-активационных и ИК-спектроскопических исследований.

В результате выяснилось, что ГЖВ первично кристаллизованного и гранулированного кварца и силектиты имеют углекисловодный тип растворов, жилы кристаллизованного кварца — хлоридный, а хрусталеносные жилы — бикарбонатно-хлоридный. Жилы первично кристаллизованного кварца хлоридного типа растворов довольно отчетливо разделяются на высоко- и низкотемпературные. К первым относятся березито-кварцевые, редкометалльно-пегматитовые жилы и жилы молочно-белого кварца формации П.Б.4 ($T_{\text{гом}} = 200 - 360^\circ\text{C}$, $P = 20 - 50$ МПа). Жилы гранулированного кварца формации П.Б.2 и силектиты занимают промежуточное положение между названными группами по температуре образования ($T_{\text{гом}} \text{ ГЖВ} = 280 - 405^\circ\text{C}$), но отличаются повышенным давлением ($P = 150 - 240$ МПа). Однако это результаты не полной, а лишь второй частичной гомогенизации. Суть ее, согласно экспериментальным исследованиям С. Такеночи и Дж. Кеннеди, состоит в том, что природные гидротермальные растворы с углекислотой, поднимающиеся к земной поверхности, остаются гомогенными до температур более низких, чем критическая температура воды, независимо от содержания CO_2 . Большинство полученных нами данных не превышают значения $370 - 380^\circ\text{C}$, но в грануле кварца одного из месторождений зафиксировано более высокое значение температуры гомогенизации двух жидкостей (в системе $\text{МС} + \text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Ж}_{\text{CO}_2} + \text{Г}$), равное 405°C .

Вывод о том, что полученные по водно-углекислым включениям в гранулах температуры гомогенизации (см. табл. 7) являются не полными, а частичными, подтверждается и другими данными: а) наличием в гранулах сопутствующих многофазовых включений вида $\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Ж}_{\text{CO}_2} + \text{К} + \text{Г}$ (см. рис. 38), содержащих одну или несколько кристаллических фаз, не растворяющихся после гомогенизации жидких фаз и при перегреве их до $370 - 400^\circ\text{C}$, выше которой включения взрываются; б) наличием в межгранулярном пространстве более высокотемпературных ($438 - 525^\circ\text{C}$) газовой-жидких включений группы В, заключающих менее плотные ГЖВ, чем включения в гранулах; в) наличие в декрептограммах обогащенной крупки из гранулированного кварца высокотемпературных пиков в интервале температур от $480 - 620^\circ\text{C}$. Таким образом, прямое определение температур захвата водно-углекислых включений в гранулах осуществить не удастся. Однако эта задача решается графически, с использованием данных криометрии, диаграммы для CO_2 , предложенной Ю. А. Долговым, и нашим дополнением к ней (рис. 55), а также способа, применяющегося для определения T и P -захвата ГЖВ при $\alpha - \beta$ -инверсии кварца.

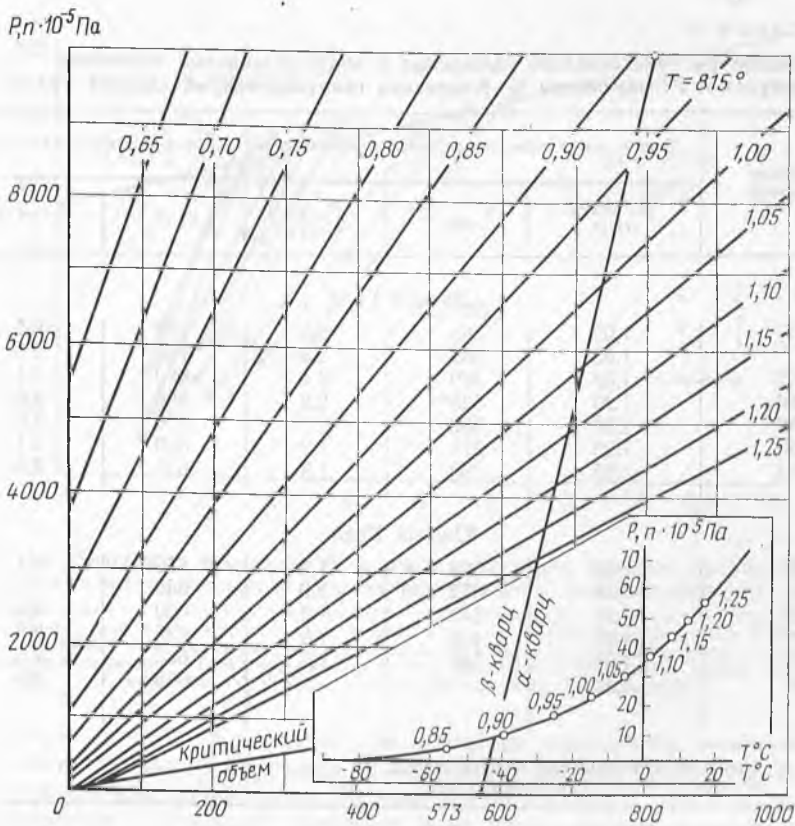


Рис. 55. P - T -диаграмма состояния CO_2 . Дополнена линией равновесия α - β -кварца по экспериментальным данным У. Гибсона и Г. С. Йодера, согласно табл. 9 [46]

В гранулированных кварцах Урала такие определения температур и давлений проведены из разных месторождений по 13 образцам и результаты показаны в табл. 8. Эти данные получены в несколько приемов [46]. Сначала криометрированием жидких углекислых и водно-углекислых включений, адсорбированных на МС, устанавливались температуры генерогенизации и гомогенизации жидкой и газовой фаз углекислоты, средние значения которых для разных проб колеблются от $+28$ до -12 °C. Затем по ним на диаграмме для CO_2 (см. рис. 55, врезка) получены удельные объемы CO_2 , которые колеблются, соответственно от 1,38 до 1,02 см³/г. Давление для полученных температур гомогенизации двух жидкостей находилось по указанной диаграмме. Для различных проб гранулированных кварцев с температурой гомогенизации от 275 до 405 °C получены давления от 1,2 до $3,5 \cdot 10^8$ Па. Диаграмма Ю. А. Долгова дополнена нанесением линии фазового α - β -перехода кварца при повышенных T и P , согласно табл. 9. Значения

Таблица 8

PT-параметры гомогенизации углекислых и водно-углекислых включений в гранулах и *PT*-параметры α - β -перехода гранулированных кварцев Урала

Номер пробы	Данные по углекислым двужидким включениям			Условия α - β -перехода кварца	
	уд. объем, см ³ /г	$T_{\text{гом.}}, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{гом.}}, 10^8 \text{ Па}$	$T, ^\circ\text{C}$	$P, 10^8 \text{ Па}$
Средний Урал					
Ж-17	1,02	398	3,5	720	6,2
Ж-17	1,05	365	2,8	700	5,6
Ж-175	1,08	309	2,1	690	5,1
Ж-201	1,20	525**	2,8	660	3,6
Ж-201	1,20	380	2,1	660	3,6
Ж-201	1,25	275	1,2	650	3,1
Ж-201	1,35	280	1,3	635	2,6
Южный Урал					
58/15	1,15	330	1,9	670	4,1
58/15	1,22	372	2,0	650	3,5
58/15	1,37	340	1,2	630	2,4
18/6	1,35	405	1,4	635	2,6
6-4*	1,38	340	1,4	635	2,6
6-4	1,17			665	3,8

* Кварц гигантозернистый молочно-белый.

** Включение в межгранулярной зоне.

температур и давлений захвата водно-углекислых включений при α - β -переходе кварца по изученным пробам соответствуют точкам пересечения найденных изохор (уд. объемов) и линии фазового перехода. Они колеблются в пределах $T=630-720^\circ\text{C}$ и $P=2,4-6,2 \cdot 10^8 \text{ Па}$.

Индивидуальные значения температур и давлений растворов во включениях в момент гомогенизации и *PT*-параметры захвата их при полиморфном превращении кварца показаны на рис. 56. При-

Таблица 9

Температуры инверсии кварца при различном давлении

Минерал	Давление (гидростатическое), 10^8 Па	Температура инверсии, $^\circ\text{C}$	Авторы
Кварц	1	573	Сосман, 1927 г.
	1 000	599	Йодер, 1950 г.
	3 000	644	Гибсон, 1928 г.
	10 000	815	Йодер, 1950 г.

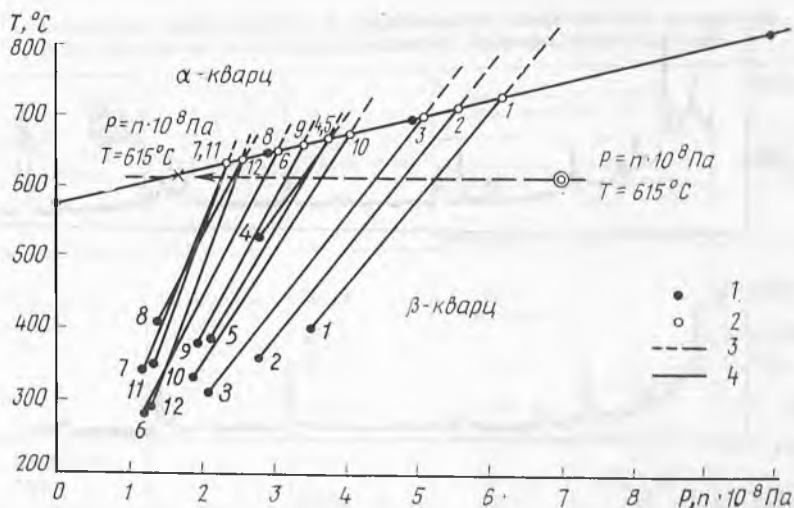


Рис. 56. Диаграмма изменения PT -условий грануляции жильного кварца уральских месторождений в процессе регионального метаморфизма [46]:

1 — измеренные PT -параметры гомогенизации водно-углекислого включения в грануле; 2 — полученные графически (см. рис. 55) PT -точки перехода кварцев из α -области в β -области; 3 — кратчайшие пути перехода гомогенного водно-углекислого раствора к точке гетерогенизации при снижении PT -параметров; 4 — граница фазового α - β -перехода кварца (по данным табл. 8). Цифры у фигуративных точек — номера проб

веденные в табл. 9 и на рис. 56 значения температур и давлений на линии фазового перехода не являются, однако, максимальными для самих кварцевых жил. Но они очень близки к тем значениям температур и давлений, которые дает метод термобарометрии на основе минеральных равновесий, как по минералам-спутникам в кварцах, так и по минеральным ассоциациям во вмещающих кварцевые жилы породах [30].

Для установления различия в образцах различных типов жильного кварца — гранулированного, кристаллического, молочно-белого и хрусталеносного по распространенности некоторых химических элементов использовался нейтронный активационный анализ. Гамма-спектры проб гранулированного кварца (рис. 57) содержат в своем составе 22 фотопика, принадлежащих к восьми искусственно-радиоактивным изотопам. Спектр молочно-белого кварца насчитывает 31 фотопик (двенадцать изотопов). Наибольшее количество фотопиков (35) отмечается в гамма-спектре хрусталеносного кварца, в составе которого идентифицировано 15 микроэлементов. В отличие от хрусталеносного кварца в молочно-белом отсутствуют хром, а в гранулированном кроме того — мышьяк, сурьма, теллур и золото. Это позволяет говорить о гранулированном кварце как о наиболее чистой в отношении микропримесей разновидности жильного кварца.

Термобарогеохимические, рентгено-спектроскопические и нейтронно-активационные исследования, проведенные с целью полу-

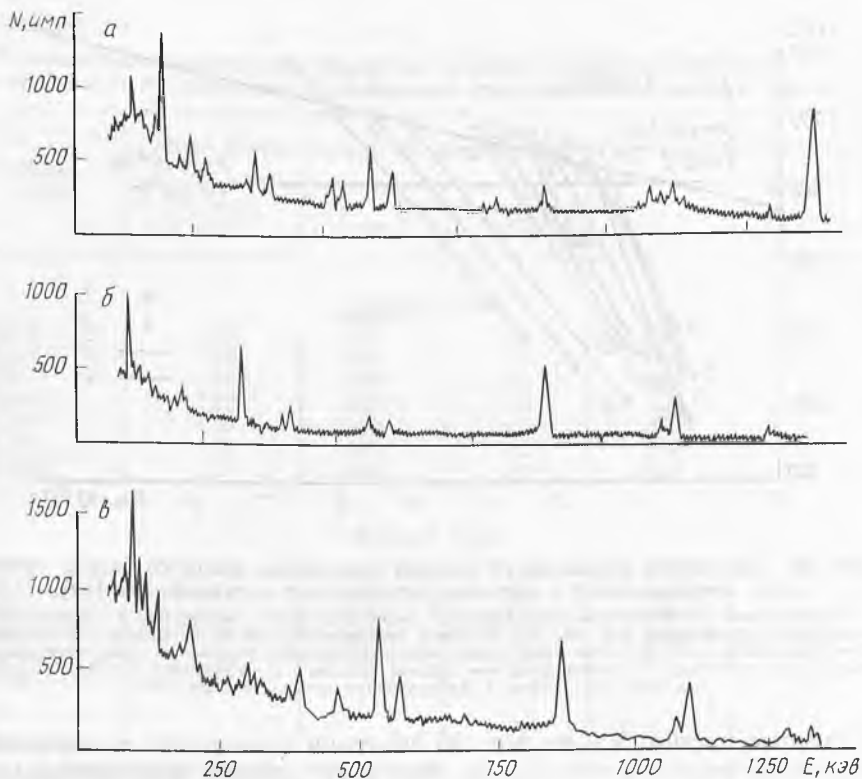


Рис. 57. Спектры гамма-излучения активированных проб.
 Кварц: *а* — гранулированный (Урал); *б* — молоко-белый (Казахстан); *в* — хрусталеносный (Урал) [38]

чения диагностических параметров кварца выделенных неметаллоносных кварцевых формаций в дополнение к установленным геологическим признакам их различия, показали, что каждая конкретная формация имеет свои достаточно четко выраженные отличительные особенности (табл. 10). Формации гранулированного кварца и силектитов имеют высокую температуру ($500\text{--}600^\circ\text{C}$) и давление ($2\text{--}5 \cdot 10^{-5}$ Па) образования кварца, а отсюда и высокие коэффициенты ($0,60\text{--}0,65$) поглощения (α) полосы с максимумов 3385 см^{-1} ИК-спектров, обусловленную наличием ОН-алюминиевых дефектов, когда ОН-группы присутствуют в тетраэдрах, где Al^{3+} замещает Si^{4+} и минимальные на фоне значений по другим формациям скандий-сурьмяные отношения ($0,05\text{--}0,11$). Напротив, формации хрусталеносного кварца (П.Б.4 и П.Б.5) относительно низкотемпературные, температура их образования обычно не превышает $400\text{--}505^\circ\text{C}$, давление $0,4\text{--}1,0 \cdot 10^{-5}$ Па, а поэтому — низкие коэффициенты поглощения (α) ИК-спектров из-за меньшего количества изоморфного алюминия в кварце и высокие ($0,3\text{--}1,3$)

Таблица 10

Температуры гомогенизации и декрепитации газовой-жидких включений в гранулированных и негранулированных жильных кварцах Урала

Местоположение	Тип кварца	Номер пробы	Интервалы температур гомогенизации ГЖВ, °С		Температура массовой декрепитации ГЖВ, °С
			водно-углекислых включений в гранулах	ГЖВ в межгранулярных зонах, трещинах и др.	
Средний Урал	Гранулированный	Ж-17	355— 398 (6)*		510
То же	—	Ж-М			170, 480
”	—	Ж-175	309 (1)	60— 245 (39)	510
”	—	Ж-201/3, 4, 6	224— 371 (60)	60— 525 (176)	210, 460, 600
Южный Урал	—	18/4, 5, 6	212— 405 (8)	113— 496 (120)	200, 480, 520
То же	—	58/13, 14, 15	244— 334 (9)	136— 400 (52)	325, 350, 460, 480, 500
Средний Урал	—	94	234— 282 (8)	85— 390 (40)	240, 320, 455
То же	Гигантозернистый	6—1, 3, 4		164— 340 (56)	160, 260, 280, 450, 500
Южный Урал	Молочно-белый	1/14, 17, 2/11		109— 427 (22)	125, 150, 210, 330, 370, 470
То же	—	111/1, 4, 5		104— 316 (43)	190, 220, 300, 330, 460, 490
”	—	1589		240— 412 (23)	170, 320, 390, 480
”	Кристалл дымчатого кварца			196— 438 (12)	260, 350, 400, 550
Северный Урал	Кристалл прозрачного кварца	0—2		144— 276 (22)	140, 250, 470

* В скобках — число воспроизводимых замеров.

отношения Sc/Sb . Последнее считать важным характеристическим формационным параметром кварца хрусталоносной формации (табл. 11).

По нашим данным, с учетом материалов Г. Н. Вертушкова и А. И. Белковского, гранулированный кварц из метаморфогенных пегматитов и кварцевых жил отличается наименьшими среднестатистическими параметрами и объемом элементарной ячейки. Для пегматитов и силектитов изученных площадей средние параметры a , c и v соответственно равны 0,491248; 0,540437; 11,29476 нм (объем выборки — 28). В реликтах негранулированного исходного кварца пегматитов названных месторождений те же параметры составляют: $a=0,491257$, $c=0,540443$, $v=11,29538$ нм ($n=$

Таблица 11

Коэффициент поглощения (α) полосы с максимумом 3385 см^{-1} ИК-спектров и отношение Sc/Sb в кварце неметаллоносных кварцевых формаций Урала

Формация	Коэффициент поглощения (α)	Отношение Sc/Sb
Силекситовая (I.A.3)	0,60	0,11
Силектитовая (II.A.2)	0,65	0,08
Кварцевая blastsгранулированная (II.B.2)	0,64	0,05
Кварцевая фрагментарногранулированная (II.B.3)	0,59	0,30
Кристаллизованно-кварцевая (II.B.4)	0,40	0,60
Хрусталеносно-кварцевая (II.B.5)	0,53	1,30

=7), что отражает очищение структуры кварца от микропримесей в процессе его грануляции и одновременно более высокую стерильность кварца блоковых и ядерных обособлений метаморфогенных пегматитов по сравнению с пегматитами постмагматического происхождения, для которых $a=0,491268$, $c=0,540445$, $v=11,29558 \text{ нм}$ ($n=52$).

Гранулированный кварц метаморфогенно-гидротермальных кварцевых жил и месторождений Среднего Урала характеризуется следующими статистическими параметрами элементарной ячейки: $a=0,491238$, $c=0,540435$, $v=11,29409 \text{ нм}$ ($n=127$), которые также меньше параметров элементарной ячейки кварца из негранулированных реликтов, встречающихся среди общей массы гранулированного кварца ($a=0,491243$, $c=0,540440$, $v=11,29461 \text{ нм}$ при объеме выборки — 19) и значительно отличаются от аналогичных параметров постмагматически-гидротермальных кварцевых жил ($a=0,491290$, $c=0,540468$, $v=11,29682 \text{ нм}$, объем выборки — 143). Следовательно, рентгенографическое изучение кварца метаморфогенных жил подтверждает наименьшее содержание в них структурных примесей по сравнению с кварцем жил постмагматического генезиса в процессе природного очищения кварца при его грануляции.

Приведем некоторые дополнительные геологические и экспериментальные данные и суммируем имеющиеся факты о генезисе гранулированного кварца.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ГРАНУЛЯЦИИ ПЕГМАТИТОВ, СИЛЕКТИТОВ И МЕТАМОРФОГЕННЫХ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ

Термодинамические факторы, обуславливающие главные типоморфные особенности минералов, исследователями жильного кварца, в частности при объяснении генезиса гранулированного квар-

ца, ранее учитывались в недостаточной степени. Жилы гранулированного кварца уральских месторождений, несмотря на существование геологически четких зонально-пространственных связей [30] с гранито-гнейсовыми комплексами и наличия прямых переходов между кварцевыми жилами и пегматитами в месторождениях Среднего Урала, рассматривались в недостаточной связи с ними. Результаты подобного подхода обнаруживаются и на примере типичного пегматоидного (силектитового) тела на Среднем Урале с хорошо выраженными блоками полевых шпатов и слюд среди крупноблокового кварца, которое отнеслось ранее к жильному кварцу. И только в работах последних лет обосновано его пегматитовое (силектитовое) происхождение. В отличие от этого, гранулированные кварцевые жилы Н. П. Ермаков относит к высокотемпературным силекситовым образованиям. К силекситам слюдоносной формации справедливо отнесены В. Б. Лекухом и В. М. Смертенко [22] и гранулированные жилы Мугоджар, находящиеся в геологической обстановке, сходной с типичной для части жил Среднего и Южного Урала (силектитов в нашем понимании). Силектиты являются также аналогичные уральским гранулированные жилы в другом регионе — среди слюдоносных и керамических пегматитов в Прииртышье.

Целый ряд признаков свидетельствует о том, что часть жил гранулированного кварца Урала имеет пегматитовое происхождение, что они являются силектитовыми телами. Прежде всего, наблюдается не только тесная пространственная ассоциация слюдоносных пегматитов и жил гранулированного кварца, но и закономерные переходы их друг в друга (Средний, Южный Урал, Мугоджары), а также нередко зональное строение жил гранулированного кварца с развитием у зальбандов полевошпатовой зоны, наличие блоков полевого шпата и пачек слюды с образованием пегматоидных (ортотектитовых) структур и т. д. Причем разориентированные идиоморфные кристаллы и агрегаты калиевого полевого шпата (КПШ) и мусковита (до $3 \times 4 \times 5$ см) «свободно» располагаются в основной массе гранулированного кварца и, за исключением маломощных зонек перекристаллизации с краев у некоторых кристалликов калиевого полевого шпата и слюды, аналогично регенерационной камерке у собственно гранул кварца не несут следов деформации.

Высокотемпературные жилы (тела) гранулированного кварца Урала представляют собой силекситы метаморфогенного происхождения, т. е. являются силектитами. Об этом свидетельствуют: наличие в гранулах кварца высокотемпературных инверсионных включений, в том числе с высокой концентрацией растворов (расплав-растворов), наличие целого ряда слабо «оплавленных» высокотемпературных (калишпат, корунд, рутил) и так называемых «стресс-минералов» (кианит, силлиманит) и другие факторы. В соответствии с палеогеотермическим градиентом, с удалением от гнейсового ядра к сланцевому обрамлению силектиты сменяются обычными среднетемпературными кварцевыми жилами метамор-

фогенного происхождения. Таким образом, в гнейсовых куполах Урала прослеживается метаморфогенный ряд образований: пегматиты (с гранулированным кварцем) — силектиты с гранулированным кварцем — жилы гранулированного кварца.

Факт грануляции кварца хорошо известен в камерных пегматитах Украины и Казахстана, где он обнаруживается по «сотовым» и «сотовидным» текстурам. Генезис последних исчерпывающе объяснен в связи с многократной инверсией высокотемпературного α -кварца в низкотемпературный α -кварц и обратно и влияние здесь механических деформаций, связанных с тектоникой, незначительно.

Исследование полированных препаратов гранулированного кварца с различных месторождений Урала показывает, что содержание минеральных примесей в зернах кварца при их формировании и при последующем преобразовании в процессе грануляции уменьшается. В распределении газовой-жидких включений (ГЖВ) наблюдается четкая зависимость — количество ГЖВ в межгранулярном пространстве на порядок выше по сравнению с их содержанием в гранулах, что является признаком их очищения при грануляции, и тем самым определяет отличие гранулированного кварца от других типов и его промышленную значимость.

Накопилось много материалов по исследованию газовой-жидких включений в пегматитовых и жильных кварцах Урала и других районов СССР, а также геологических и экспериментальных данных, не согласующихся с представлениями о грануляции кварца только путем рекристаллизации и свидетельствующих о различии механизма образования вторичных зернистых кварцевых агрегатов в различных фациальных условиях регионального метаморфизма. Результаты исследования газовой-жидких включений в гранулированных кварцах Урала приводят к выводу о том, что объяснение механизма грануляции жильного кварца более правильно обосновывать в первую очередь путем учета взаимосвязанных главных геологических и термодинамических факторов, таких как региональный метаморфизм (динамометаморфизм) вмещающих пород и РТ-условия эволюции минералообразующей среды.

Как известно, напряжения в кристалле (индивиде) кварца возникают вследствие механической деформации или термического воздействия. В первом случае напряжения вызваны воздействием внешних сил на кристалл; во втором случае (при методах температурного градиента, в том числе и α — β -превращения кварца) причиной являются внутренние напряжения самого кристалла. Последние обусловлены перестройкой структуры из гексагональной в тригональную с сильным объемным сжатием (на 0,86 %) в интервале температур от 573 до 550° С. Общее же понижение температуры от 600 до 20° С вызывает сокращение объема кварца на 4,5—5 %. В случае фазовой инверсии кварца на конечный результат (грануляцию) существенное влияние оказывает величина температурного градиента. Здесь имеется две вероятности: наличие большого температурного градиента, создав значительные внутрен-

ние напряжения в кристалле, приводит к сокращению объема с растрескиванием; при медленном охлаждении, как показывают эксперименты, трещины не образуются. Если внутренняя напряженность в кварце осложнена условиями внешними, а остывание вмещающих пород идет очень медленно, то в геологически малом отрезке времени температуру можно считать величиной постоянной. Тогда причиной, способной эффективно реализовать накопление в минерале напряжения, может быть только резкое изменение (снижение) внешнего давления.

Так, например, любая кварцевая жила, находившаяся в условиях амфиболитовой и гранулитовой фаций регионального метаморфизма (для уфалейского гнейсового комплекса фоновые интервалы $T=650-900^{\circ}\text{C}$ и более, $P=500-800$ МПа) могла испытать эпизодически резкие изменения обоих знаков внешнего давления, обусловленные тектонической обстановкой, особенно в случаях разрыва сплошности и отслаивания пород, сопровождающихся адиабатическим расширением. В том случае если даже кварц находился (см. рис. 56) ниже кривой фазового равновесия (допустим в точке с давлением $P=700$ МПа и $T=615^{\circ}\text{C}$), то при резком снижении давления вектор P непременно пересечет на том же уровне температуры ($T=615^{\circ}\text{C}$) линию фазового перехода (при $P=175$ МПа). Это хорошо видно из фазовой диаграммы (см. рис. 55), построенной по экспериментальным данным (см. табл. 9).

Таким образом, в индивидах кварца снимается напряжение с резким сокращением объема и образованием характерной инверсионной трещиноватости, более интенсивной на тех участках жилы, которые испытывали максимальные напряжения. Этим последним удовлетворительно объясняется также неравномерность распределения гранулированного и негранулированного участков в пределах отдельных жил и геологических (метаморфических) комплексов. Следует отметить, что в случае отсутствия высокого градиента температуры, а также избыточных тектонических напряжений, объемная грануляция кварца, характерная для формаций П.А.2 и П.Б.2, может и не проявиться, как, например, в кварце месторождений силекситов свердловской группы на Среднем Урале, где, несмотря на наличие реликтовой (завуалированной поздними трещинами) сотовой трещиноватости, последующего развития грануляции не происходило, за исключением редких наиболее напряженных участков в зальбандах и на выклинивании тел.

Формы гранул. Как известно, высокотемпературный кварц кристаллизуется в виде гексагональной бипирамиды, а для низкотемпературного β -кварца характерны удлинённые по главной оси кристаллы с развитыми гранями призмы. Но зерна гранулированного кварца, легко дезинтегрируемые при дроблении, представляют собой не первичные индивиды, а образованы за счет крупных монокристаллов при их метаморфическом преобразовании. Поэтому кажется, что форма гранул не может служить критерием для определения фазовой природы кварца. Однако микроскопические исследования полированных пластин различной (0,2—5 мм) тол-

щины, а также изучения дробленой крупки различных фракций показывают, что гранулы кварца, особенно мелко- и микрогранулированного (0,5—2 мм) кварца месторождений Среднего Урала на многих участках препаратов (до 30 % объема) имеют изометричные формы, представленные ограненными и полуограненными моно- и бипирамидальными индивидами с равновеликими шероховатыми гранями ромбоэдров. Благодаря распределению газожидких включений в межгранулярном пространстве, индукционные грани отдельных индивидов в полированных препаратах просматриваются четко.

Эти формы огранки гранул, характерные для α -кварца, образуются путем регенерации округлых гранул за счет минералообразующего раствора и межгранулярного пространства, контракционно развивающегося максимально в начале α — β -инверсии (0,86 % усадки в интервале 600—550 °С) и возвратах в α -область. Об этом свидетельствует также присутствие в пригранных и приреберных зонах отдельных гранул водно-углекислых и существенно газовых включений, которые имеют форму слабо округленных отрицательных бипирамид и взрываются свыше 320—450 °С, не достигнув температуры гомогенизации. Таким образом, внешние формы α -кварцев у гранул сохранились как реликтовые благодаря регенерационному залечиванию в инверсионный период некоторой части межзерновых трещин усадки, тогда как гранулированный кварц во всем объеме фактически представлен низкотемпературной модификацией.

Формы газожидких включений. Нередко одиночные первичные и глобулярные двужидкие включения в гранулах, а также и первично-вторичные двужидкие включения в межгранулярных и секущих гранулы трещинах имеют форму пегативных высокотемпературных бипирамидальных кристаллов, иногда со слабо развитыми гранями призмы. Такие формы газожидких включений, согласно исследованиям, характерны только для кварцев, испытавших фазовое α — β -превращение.

Морфология трещин. Этому признаку с целью оценки условий образования гранулированных кварцев до сих пор особого внимания не уделялось. Хорошая изученность вопроса по другим типам кварца и полученный нами фактический материал по кварцам Урала, позволяет несколько восполнить данный пробел путем сопоставления особенностей систем трещин в кварцах, сформировавшихся в различных геологических и физико-химических условиях: в «сотовых» (в хрусталеносных пегматитах), гранулированных, обычных жильных, а также в искусственных.

Изучению трещиноватости природного кварца посвящено много работ, и относятся они главным образом к монокристаллам и воспроизведению в них трещин термического происхождения. Благодаря этому по форме проявления трещин стало возможным приблизительно оценить температуру их образования. Например, критерием фазового перехода кварца из α — β -область является характерный рисунок, который складывается из кривых линий (сотовая

текстура); трещины, образованные при охлаждении тонких (1—3 мм) кварцевых пластинок, нагретых до 200 °С, имеют зигзагообразные формы и состоят из прямолинейных отрезков, параллельных гралям ромбоэдра, а трещины, образованные охлаждением после нагрева пластинок до 400 °С, имеют промежуточные формы — слегка изогнутые линии, усложненные зигзагообразными выступами. Во всех опытах с пластинками трещины в кварце возникают только при резком охлаждении. Причем увеличение температурного градиента приводит к сгущению сети трещин. Если охлаждение проводится медленно, со скоростью менее 15 °С/мин, то пластинки кварца, особенно бездефектные, неоднократно претерпевают полиморфное превращение без видимого растрескивания.

По данным Г. М. Гигашвили, в некоторых пегматитах Украины встречены кристаллы кварца с двумя зонами «сотовых» трещин. Г. М. Гигашвили считает, что среда минералообразования в этом случае дважды проходила точку инверсии кварца с понижением температуры гомогенизации газовой-жидких включений — первый раз до 470 °С и второй раз до 430 °С.

В жильных высокотемпературных кварцах Урала отчетливо устанавливается многократность полиморфного превращения. Так, например, в гранулированном кварце месторождения Южного Урала нами встречен прожилок более позднего, тоже гранулированного кварца. Это хорошо видно в полированной пластинке толщиной 3 мм (рис. 58), где на фоне густой сети «сотовых» трещин среди основной массы полупрозрачного кварца резко выделяется трещина разрыва мощностью от 2 до 3 см с неровными контурами, залеченная прозрачным кварцем, отличающимся более тонкой сетью «сотовых» трещин и меньшей насыщенностью их газовой-жидкими включениями. Наличие хорошо сохранившихся в условиях динамометаморфизма прожилков позднегранулированного кварца и прожилков с высокотемпературной ассоциацией минералов свидетельствует, с одной стороны, о длительном формировании жил гранулированного кварца в условиях высоких температур, с повторными возвратами в α -область и, с другой — косвенно говорит об определяющем значении РТ-условий (градиента температур) и контракционного трещинообразования на процесс грануляции, наряду с влиянием процессов тектоники.

В гранулированных кварцах Урала, формирующихся в условиях эклогитовой, гранулитовой, амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций, выделяются три основные системы трещин: межгранулярная, внутрigrанулярная и стрессовая. Первая система имеет термическое (инверсионное) заложение, контракционный механизм развития и сотовую (см. рис. 58) или мостовидную текстуру. Но вследствие формирования в неспокойной тектонической обстановке она несколько отличается от типичного «сотового» (камерно-пегматитового) кварца слабой разориентированностью большинства гранул (присходящую параллельно с усадочным разъединением) и регенерацией их до равновесных зерен (кристаллов) за счет использования расширяющегося межгранулярного пространства,

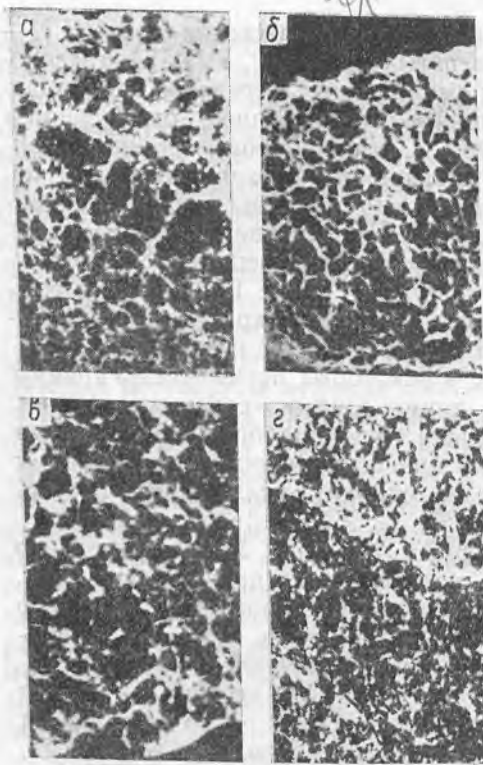


Рис. 58. Формы инверсионных трещин в полированных пластинках кварца:

а — «сотовый» кварц из пегматитового тела (Казахстан); б — гранулированный кварц (Средний Урал); в — гранулированный кварц (Южный Урал). Увел. 2,5; г — прожилок гранулированного кварца в гранулированном кварце 1. Южный Урал. Нат. вел. [46]

остаточной минералообразующей среды и частичного перераспределения вещества на стыках зерен. Заложению в кварце межгранулярных трещин способствуют многие минералы-спутники как центры вещественной неоднородности и внутренней напряженности. Усадочное происхождение межгранулярных трещин подтверждается наличием в них большого количества пор и изолированных щелей размером до $3 \times 1 \times 0,5$ мм, наполненных газом и жидкостью и инкрустированных кристалликами горного хрусталя.

В табл. 12 приведены результаты лабораторных измерений плотности и пористости жильного кварца. Гранулированный кварц, в отличие от низкотемпературного жильного, имеет меньшие значения объемной массы и высокую пористость. Вторая система трещин blasto- и cataclastic granular quartz — внутрigrанулярная система контакционных трещин. Это собственно сингенетичные и субсингенетичные межгранулярные залеченные трещины двух типов: а) слепые трещины — «блестки» с кольцеобразным расположением глобулярных включений вокруг МС; б) плоские линейно-ориентированные трещины различных направлений, которые пересекают одну или несколько гранул, разновозрастные, и поэтому содержат газово-жидкие включения с различными значениями температур гомогенизации. Третья система трещин образовалась в результате направленного давления (динамометаморфизма)

Таблица 12

Плотность и пористость жильного кварца Урала

Местоположение	Кварц	Количество определений	Плотность, г/см ³	Пористость, %	Средняя пористость, %
Средний Урал	Гранулированный	4	2,44—2,58	2,6—7,9	5,2
Южный Урал	"	4	2,51—2,58	2,6—5,2	4,4
То же	Молочно-белый	2	2,58	2,6	2,6
Средний Урал	То же	2	2,58	2,6	2,6
Северный Урал	" "	2	2,60	1,9	1,9

и формировалась длительно, сопровождая и налагаясь на первую и вторую системы вплоть до выведения кварцевой жилы на поверхность. Об этом свидетельствуют наличие линейно ориентированных секущих трещинок, их слабая залеченность газово-жидкими включениями (большинство трещин «сухие»), а также изгибы чешуек слюд (например, биотита в гранулированном кварце пегматитовой жилы Среднего Урала). Поэтому она четко выделяется на фоне сотовой текстуры межгранулярных трещин.

Жилы молочно-белого и фрагментарногранулированного кварца, в отличие от blasto- и cataclastic гранулированных кварцев, размещаются преимущественно в породах зеленосланцевой фации регионального метаморфизма, вследствие чего (низкие P и T) инверсионные (сотовые) трещины в них отсутствуют. Все трещины, придающие кварцу молочно-белый цвет, содержат, с одной стороны, газово-жидкие включения, которые по морфологии, составу, концентрации растворов и PT -параметрам отвечают условиям формирования β -кварца (см. табл. 10), и, с другой — в полном соответствии с экспериментальными исследованиями — имеют протяженные линейные зигзагообразные формы. В некоторых жилах трещины в кварце приобретают слабую изогнутость, по-видимому, отражающую влияние синхронно проявившихся дислокаций во вмещающих породах. В участках наибольших механических напряжений и, вероятно, некоторого повышения температуры до уровня высших субфаций зеленосланцевой фации в первично гетерозернистом жильном кварце возникали полосы деформации, сопровождающиеся образованием микро-тонкозернистых агрегатов рекристаллизованного кварца и приводящие к формированию так называемого фрагментарного кварца.

Минералы-спутники. Достоверную оценку PT -параметров формирования пород и минералов метаморфических серий можно получить сопоставлением данных термобарогеохимических и методов минеральных фаций и равновесий. В последнем случае в качестве индикаторов условий формирования гранулированного кварца можно использовать такие ассоциации минералов-спутников, заключенных в гранулах кварца, как дистей и силлиманит, кварц и мусковит, ортоклаз и мусковит, а также графит. Постоянное со-

вместное присутствие дистена и силлиманита в гранулах кварца, при отсутствии андалузита, несомненно, свидетельствует о кристаллизации первых двух минералов при более высоких температурах, чем температура тройной точки в диаграмме фазовых переходов в системе Al_2SiO_5 (оцениваемой разными исследователями в пределах от 530 до 620 °С, в среднем 573 °С), а также о формировании кварцеобразующих растворов в тесной связи с высокотемпературным (дистен-силлиманитовая серия амфиболитовой фации) метаморфизмом вмещающих пород [30]. Случаи мусковитизации дистена в межгранулярной зоне и малая встречаемость мусковита в гранулах по сравнению с полевыми шпатами и силлиманитом (при абсолютной свежести последних) свидетельствует, по всей вероятности, о том, что кристаллизация жильного кварца началась непосредственно после захвата этих минералов-спутников и совпала с началом выделения мусковита (650 °С), то-есть согласно схеме фаций метаморфизма, предложенной Н. Л. Добрецовым и другими, происходила в условиях температур, близких к линии равновесия мусковит+кварц.

Минералы-спутники несут и другую геохимическую информацию. Например, наблюдающаяся сглаженность огранки у кристалликов калишпата, плагноклаза, дистена, силлиманита, корунда и апатита в гранулах, по-видимому, связана с тем, что вскоре после выпадения из расплава-раствора кремнезема они испытали частичное растворение под воздействием летучих компонентов (H_2O , CO_2 , Cl и др.). Причем наряду с частичным растворением минералов-спутников и кристаллизацией основной массы кварца выделяется некоторое количество идиоморфных кристалликов мусковита, эпидота, ильменита и тонкоигльчатого рутила. Эти факты соответствуют ранее сделанным выводам о грануляции кварца на регрессивном этапе регионального метаморфизма [30]. Важным критерием формирования гранулированного кварца в изменяющихся условиях высоких температур являются многочисленные факты пересечения их жильными телами гранитоидов, например, на месторождении Среднего Урала при отсутствии таковых и в других типах жил. Из этого следует, что в процессе формирования гранулированный кварц испытывал перегревы (в связи с анатектическим плавлением пород и инъекциями гранитоидов), значительно превышающие точку полиморфного перехода (573 °С) кварца, особенно если учесть условия высоких давлений.

Состояние углекислоты. Важным оценочным критерием *PT*-условий образования минералов в породах метаморфических серий служит состояние углекислоты во включениях. Исследования включений в минералах метаморфических пород в Мамском, Саянском, Алданском районах Сибири, проводимые под руководством Ю. А. Долгова, показывают, что в минералах (дистен, силлиманит, андалузит, кварц и др.) гранулитовой и амфиболитовой фаций регионального метаморфизма плотность углекислоты во включениях, по мере повышения температуры до 700—1000 °С и давления до 1100—1300 МПа, закономерно изменяется от 1,3—1,2 до 0,95—

0,89 см³/г. Установленные нами во включениях кварцевых гранул плотности углекислоты от 1,37 до 1,02 см³/г, а также оценки температуры в момент полиморфного превращения кварца находятся в полном соответствии как с упомянутыми данными по метаморфическим комплексам Сибири, так и с оценками *PT*-параметров метаморфизма пород на Урале, вмещающих жилы гранулированного кварца, проведенными на основе минеральных равновесий. Таким образом, данные геологического, структурно-минералогического, физико-химического и термобарометрического изучения гранулированного кварца Урала и других регионов позволяют констатировать следующее.

1. Гранулированный кварц представляет собой вторичный зернистый кварцевый агрегат, возникающий в результате метаморфизма или диафореза индивидов кварца первичных формаций пегматитов, силекситов, силектитов и кварцевых жил постмагматического и ортометаморфического класса.

2. Свойства вторичного гранулированного кварца определяются физико-химическими параметрами кварца исходных формаций и геолого-термодинамическими условиями его формирования.

3. В условиях гранулитовой эклогитовой и амфиболитовой фаций ($T=650-900^{\circ}\text{C}$, $P=5-15 \cdot 10^{-5}$ Па) ведущими процессами при формировании вторичных зернистых кварцевых агрегатов являются бластез, $\alpha - \beta$ -трансформация, рекристаллизация и регенерация с образованием в конечном итоге мелкозернистого бластогранулированного кварца, интенсивно очищенного от вредных примесей.

4. В условиях фаций дистепловых сланцев и эпидот-амфиболитовой ($T=500-650^{\circ}\text{C}$, $P=2-12 \cdot 10^{-5}$ Па) процессами, участвующими в грануляции, являются катаклаз и рекристаллизация, приводящие в общем к появлению средне-, крупнозернистого катаклаз-гранулированного кварца с частичным освобождением гранул от примесей.

5. В условиях зеленосланцевой и глаукофан-лавсонитовой фаций ($T=350-500^{\circ}\text{C}$, $P=10 \cdot 10^{-5}$ Па) главным процессом образования гранулированного кварца является рекристаллизация, способствующая появлению мелкозернистого агрегата в целом на фоне фрагментарного кварца со слабым природным очищением кварца от примесей вследствие спорадического проявления рекристаллизации.

6. По качественным показателям могут быть использованы в промышленности для производства прозрачного кварцевого стекла только бластогранулированный и катаклазгранулированный кварц формаций ортометаморфического класса.

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕЗИСА ПРИРОДНЫХ КВАРЦЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Суммируем кратко имеющиеся геологические и термобарогеохимические сведения о локализации, генезисе, временной последовательности образования, приуроченности к определенным этапам

геосинклинального развития складчатых поясов и периодам тектоно-метаморфической активизации, о структуре, вещественном составе и некоторых других свойствах природных кварцевых образований. Полевыми наблюдениями и лабораторными исследованиями были установлены определенные закономерности.

1. Хрусталеносные, редкометалльные пегматиты и силекситы имеют постмагматический генезис, что практически разделяется всеми исследователями, тогда как для слюдоносных пегматитов, с учетом приведенных материалов, наиболее обоснованным представляется их метаморфогенное происхождение.

2. Кварцево-рудные (золото-кварцевые, редкометалльно-кварцевые, полиметаллически-кварцевые и т. п.) жилы обнаруживают достаточно отчетливую связь с интрузивными комплексами и магматогенное происхождение большей их части обычно не вызывает возражений. Сложены они разнородным типичным кварцем молочно-белого или серовато-белого цвета, содержащим в массовом количестве равномерно рассеянные первичные и приуроченные к трещинам вторичные ГЖВ.

3. Гранулированные кварцевые жилы формации II.A.2 представляют собой силекситы метаморфогенного происхождения (т. е. силектиты), залегающие исключительно в пределах гнейсовых ядер и т. зоп. Это синкинематические пегматоидные выделения существенно кварцевого состава, занимающие в гнейсовых куполах Урала определенное место в метаморфогенном ряду образований: пегматиты — силектиты — кварцевые жилы.

4. Скопления неметаллоносных (так называемых безрудных) кварцевых жил фиксируются вне связи с конкретными интрузиями и концентрируются в регионально метаморфизованных комплексах. Они подразделяются на четыре самостоятельные формации, отвечающие по времени образования основным этапам тектоно-метаморфической эволюции складчатых поясов и обязанные своим происхождением проявлению конкретно установленных этапов регионального метаморфизма.

Первые две формации (II.B.2 и II.B.3) возникают на средних этапах развития геосинклиналей в период образования гнейсо-мигматитовых комплексов и интенсивного проявления регионального метаморфизма и сложены средне-, крупнозернистым кварцем, содержащим значительное количество прозрачных участков, практически лишенных первичных ГЖВ, не считая немногочисленных вторичных включений, залечивающих поздние трещины. Эти жилы могут содержать как первично кристаллизованные индивиды кварца, так и вторичный бласто- и катаклазгранулированный кварц.

Общегеологические данные и парагенезисы минералов-примесей кварца ранних формаций свидетельствуют об их образовании при различных температурах, но всегда при высоких давлениях, отвечающих глаукофановой, амфиболитовой (с реликтами гранулитовой и эклогитовой) и эпидот-амфиболитовой фациям дистен-силлиманитовой серии. Тип растворов, законсервированных ГЖВ, углекислородный с высоким содержанием газовой фазы (от 30 до

История - II.B.3
Август 1953 года
Л.Б.-2

90 %). Электронномикроскопическими, нейтронно-активационными, ИК- и масспектроскопическими исследованиями устанавливается наименьшая «загрязненность» индивидов кварца ранних формаций элементными, структурными, газово-жидкими и минеральными примесями.

Две поздние формации жильного кварца (II.Б.4 и II.Б.5) появляются на заключительных этапах эволюции геосинклинальных систем в период преобладающего развития дизъюнктивных нарушений и проявления низкотемпературного регионального метаморфизма или диафтореза и представлены крупно- и гигантозернистым первично кристаллизованным молочно-белым кварцем с большим количеством газово-жидких (первичных и вторичных) включений. Эти формации, кроме первичного кварца, могут содержать в том или ином количестве рекристаллизованный-гранулированный (так называемый фрагментарный) и палоченный перекристаллизованный (хрусталеносный) кварц. Геологическая позиция и парагенезисы минералов, изофациальных с кварцем характеризуемых формаций, позволяют определить условия их образования в общем на термодинамическом уровне эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фации. Тип растворов, содержащихся в ГЖВ кварца характеризуемых формаций, хлоридный, иногда с высокой концентрацией солей (до 40 %) или хлоридно-бикарбонатный в случаях развития хрусталеносного перекристаллизованного кварца. По данным электронной микроскопии, нейтронной активации, ИК- и масс-спектрографии образцов неметаллоносного кварца поздних формаций в них содержится повышенное количество минеральных, газово-жидких и элементных структурных примесей.

Из четырех основных метаморфогенных кварцево-жильных формаций две ранние (II.Б.2 и II.Б.3) в общем изофациальны и сингенетичны с вмещающими их породами. Поэтому они не несут следов околожильных метасоматических изменений или иногда сопровождаются слабо выраженными метасоматитами этапа диафтореза. Две поздние кварцево-жильные формации (II.Б.4 и II.Б.5) эпигенетичны и неизофациальны с окружающими породами. Жилы этих формаций сопровождаются околожильными метасоматическими преобразованиями. Особенно характерны сопутствующие и палоченные метасоматические изменения для наиболее поздней и низкотемпературной хрусталеносной формации II.Б.5.

5. По первичным водно-углекислым включениям, законсервированным в гранулах кварца формаций II.А.2 и II.Б.2, установлены температуры инверсии в интервале 630—720 °С и давления от 240 до 620 МПа, полученные на линии фазового перехода и поэтому являющиеся минимальными. По температуре эти значения, по-видимому, приближаются к истинным (для периода кристаллизации α -кварца), так как находятся в хорошем соответствии с оценками ($T=620-720$ °С) по равновесиям ассоциирующих минералов-спутников (дистен-силлиманит, ортоклаз-мусковит, кварц-мусковит, плагиоклаз основной и др.) в гранулах, но заметно занижены по давлению (по Добрецову и другим, давления, соответствующие

щие этой фации и температурам, оцениваются в 500—900 МПа). Последнее, безусловно, связано с самими условиями консервации минералообразующих сред, в частности, с понижениями давления и плотности растворов из-за усадки в процессе полиморфного превращения кварца. В общем грануляция кварца происходила на регрессивном этапе регионального метаморфизма или в процессе диафореза. Гомогенизация первично-вторичных и вторичных ГЖВ, локализованных в регенерационных (краевых) зонах гранул, межгранулярных и секущих залеченных трещинах, осуществляется в интервале температур от 60 до 525 °С; давления соответственно колеблются до 280 МПа.

6. Грануляция кварца в метаморфических комплексах, метаморфизованных в условиях амфиболитовой, гранулитовой и эклогитовой фаций, обусловлена наличием градиента температуры, избыточного тектонического напряжения и инициирована его полиморфным α — β -превращением с образованием полигональной системы усадочных трещин, аналогичной «сотовому» кварцу камерных пегматитов. Инверсия сопровождалась многократными возвратами в α -область и происходила в беспокойной тектонической обстановке (одностороннем давлении), что способствовало расчленению гигантозерен кварца по полигональным трещинам на гранулы, некоторой их разориентации и многократному залечиванию (регенерации). Для жильного кварца формации П.Б.4 и П.Б.5, кристаллизующегося в условиях относительно низких температур (зеленосланцевая и низшие субфации эпидот-амфиболитовой фации), при проявлении динамометаморфизма вместо бласто- и катаклазгранулированного кварца, развивается локальная рекристаллизация с образованием микротонкозернистых (0,05—1 мм) кварцевых агрегатов с конечным формированием гетерозернистого, так называемого фрагментарного кварца.

Таким образом, бластогрануляция и регенерация кварца возникают только в области высоких *PT*-параметров, соответствующих амфиболитовой, гранулитовой и эклогитовой фациям, и ниже температуры фазового перехода (573 °С) не происходит, сменяясь рекристаллизацией. Гранулированный и рекристаллизованный (блокованный, фрагментарный) кварц представляет собой вторичный агрегат катакластической, дислокационной или зернистой структуры, возникающей на основе первичного кварца в различной термодинамической обстановке с преобладанием деформационной составляющей, а перекристаллизованный (хрусталеносный) кварц — результат наложенных преобразований раннего кварца в обстановке при ведущей роли температуры и состава растворов.

7. Гигантозернистый молочно-белый и полупрозрачный кварц силекситовых месторождений Среднего Урала по ряду характеристик имеет как отличия, так и сходство с гранулированными кварцами. Геологические условия залегания, содержание калишпата и биотита в виде блоков в жильном теле и в качестве минералов-спутников, наличие «сотовых» текстур, формы и состав комбина-

рованных и ГЖВ в кварце, при отсутствии «стресс-минералов» (дистена, силлиманита и др.), свидетельствуют о типично силекситовом (пегматитовом) его происхождении. Однако отсутствие грануляции и слабое проявление «сотовой» трещиноватости говорят о том, что полиморфное превращение кварца происходило в более спокойных тектонических условиях и умеренных давлениях ($P=240$ МПа), что не способствовало развитию трещин грануляции.

8. В жильных негранулированных молочно-белых кварцах по сравнению с гранулированными отсутствуют высокотемпературные минералы-спутники, комбинированные и глобулярные включения, но широко развиты обычные ГЖВ, температуры гомогенизации которых находятся в пределах от 104 до 438 °С. Все это свидетельствует о формировании их в умеренных и низкотемпературных условиях, соответствующих зеленосланцевой фации метаморфизма.

Зоны тектоно-метаморфической активизации включают обычно или только раннюю, или только позднюю группы кварцевых жил, что объясняется одновременностью их образования, различным уровнем эрозионного среза или различными стадиями развития. Зоны с напряженным тектоническим режимом содержат большей частью кварцевые жилы первой группы, а с относительно стабильным в особенности на заключительных этапах — второй. Полный набор выделенных формаций наблюдается только в зонах с завершённой историей геосинклинального развития. Метаморфогенное происхождение всех формаций неметаллоносных кварцевых жил хотя и признается не всеми исследователями, но представляется достаточно очевидным в свете имевшихся ранее данных и приведенных доказательств.

9. Эмпирически установлено, что первичный прозрачный (полупрозрачный, слабо замутненный или так называемый стекловидный) кварц содержится в высокотемпературных моно- или существеннокварцевых образованиях (редкометалльных, слюдоносных и хрусталеносных пегматитах, силекситах, силектитах, высокотемпературных кварцевых жилах, грейзенах и т. п.). Но выявлена и другая эмпирическая закономерность, заключающаяся в том, что прозрачный кварц с малым числом ГЖВ (кристаллы горного хрусталя, перекристаллизованный околонедровый кварц) содержится также и в самых низкотемпературных кварцевых неметаллоносных (хрусталеносных) жилах или является наложенным на более высокотемпературные кварцевые образования. Что же касается подавляющего большинства среднетемпературных и части низкотемпературных неметаллоносных и всех средне-, низкотемпературных рудно-кварцевых (пропилито-кварцевых, березито-кварцевых, джаспероидных) тел, то они сложены молочно-белым кварцем с массой ГЖВ.

10. Очевидно, причины появления прозрачного ядерного или жильного кварца близки к причинам, приводящим к росту прозрачных кристаллов горного хрусталя. В том и другом случаях необходимы очень низкие концентрации гидротермальных растворов

(недосыщенные SiO_2 растворы), медленная, спокойная кристаллизация в гидродинамически относительно замкнутой системе, что и наблюдается при формировании пегматитов, силекситов, грейзенов и высокотемпературных метаморфогенных кварцевых жил. Большая часть перечисленных условий выполняется и при образовании «альпийских» (метаморфогенных.— Е. М.) кварцевых жил, содержащих прозрачные участки жильного кварца и низкотемпературные кристаллы горного хрусталя. Подобная обстановка создается на заключительных этапах эволюции пегматитов (редкометалльных, слюдоносных, хрусталоносных), силекситов, грейзенов при наложении низкотемпературного хрусталообразования по локальным зонам или в регионально глубоко метаморфизованных комплексах дистен-силлиманитовых серий с высокотемпературными метаморфогенными кварцевыми жилами, содержащими значительное количество прозрачных участков (формация II.Б.3).

В противоположность этому, при формировании среднетемпературных метаморфогенных и рудно-кварцевых постмагматических жил происходило быстрое отложение кварца с высоким содержанием газовой-жидких включений из пересыщенных кремнеземом растворов. Этим же можно объяснить и преимущественную локализацию кварцевых жил с прозрачными участками среди метаморфических комплексов, а не среди ореола кварцевых жил, окружающих некоторые гранитоидные массивы. Если растворы имеют метаморфогенную природу, то они, мигрируя вверх среди относительно пористых метаморфических пород, прогревают их, метаморфизуют, производя при благоприятных условиях кислотное выщелачивание, и медленно отлагают в полостях отслоения, скола и растворения при несколько изменившихся PT -условиях SiO_2 , формируя при этом прозрачные индивиды кварца. В случае внедрения гранитоидного массива вокруг него относительно быстро создается плотный ореол роговиков, препятствующих отделению флюидов. И только при возрастании давления до определенного предела в результате автоклавных или тектонических усилий происходит их разрыв и образование из уже насыщенных солями двухфазных или жидких растворов кварцевых жил, сложенных молочно-белым кварцем.

В общем проведенные исследования не только позволили выделить конкретные формации метаморфогенных кварцевых образований, подтвердили наличие тесной генетической связи жильного кварца с термодинамическими условиями и этапами регионального метаморфизма вмещающих пород на Урале, но и дали возможность четко установить особенности механизма грануляции в различных PT -условиях и ряд признаков метаморфогенного происхождения и формационной принадлежности кварца по геологическим, структурно-минералогическим и термобарогеохимическим признакам, что необходимо использовать при дальнейших поисках и оценке выходящих на поверхность и скрытых месторождений эндогенного кварца.

МИНЕРАГЕНИЯ МЕТАМОРФОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ

В связи с возросшей ролью в развитии народного хозяйства долгосрочного перспективного планирования в геологии особое значение приобретают прогнозно-металлогенические исследования, от результатов которых зависят эффективность поисковых работ, рациональность выбора объектов разведки, создание новых рудных районов и в конечном итоге обеспеченность промышленности минерально-сырьевыми ресурсами. В развитии теории, принципов и методов металлогенического анализа и прогнозирования наметились два основных направления — «региональное» комплексное и «специальное» отраслевое. Рассмотрим особенности специальной (отраслевой) минерагении месторождений традиционных и новых видов высококремнеземистого сырья и, по мере необходимости, — вопросы общей и региональной минерагении эндогенного кварца.

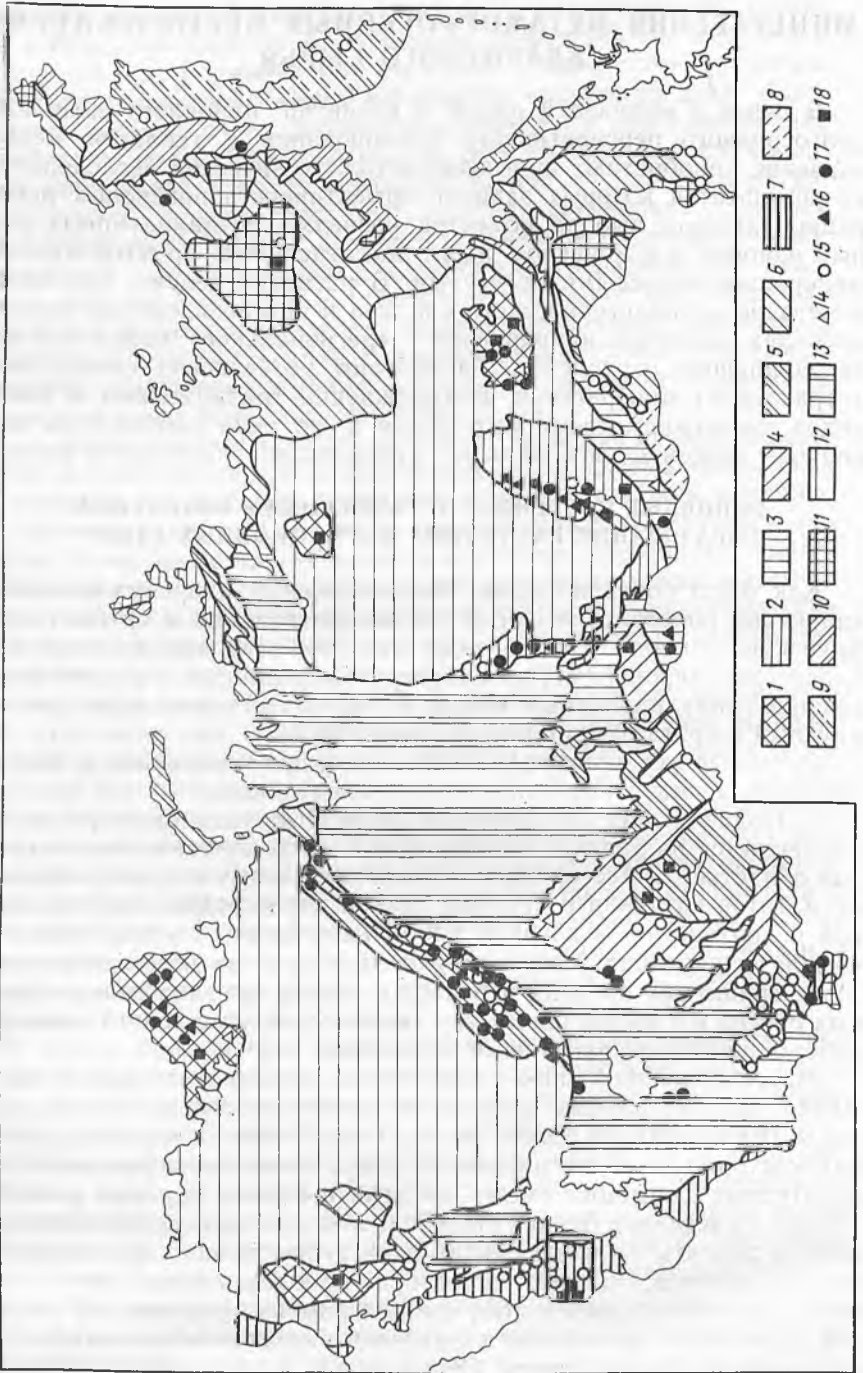
ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ КВАРЦЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМАЦИОННЫХ ТИПОВ

Как было показано выше, монокварцевые и преимущественно кварцевые обособления имеют постмагматическую и ортометаморфическую природу. Новые виды минерального сырья, такие как бластогранулированный, катаклазгранулированный и рекристаллизовано-гранулированный кварц, в последнее время приобретают научный и практический интерес (рис. 59, 60).

Основные особенности размещения редкометалльных и хрусталеносных пегматитов заключаются в следующем.

1. Подавляющее большинство пегматитов указанных формаций размещается на древних платформах и микроконтинентах складчатых областей. 2. Месторождения редкометалльных и хрусталеносных пегматитов возникли в периоды резкой перестройки структур земной поверхности — в главные глобальные циклы тектоно-магматической активизации и ассоциируют пространственно с гранодиоритами, гранитами средних и больших глубин древних зеленокаменных поясов и с постскладчатыми гипабиссальными гранитными или габбро-анортозит-гранитными плутонами.

Месторождения ранних и обычно высокотемпературных субформаций редкометалльных пегматитов имеют мелкие и средние размеры (Биннет-Квори, Эвои, Эсмеральдо, Тамелла, Финибо), тогда как месторождения пегматитов поздних и относительно низкотемпературных формаций имеют крупные и весьма крупные размеры (Моно, Сенсекуру, Берник-Лейк). Формации метаморфизованного кварца развиты практически во всех субформациях редкометалльных пегматитов, причем отчетливо прослеживается закономерность, заключающаяся в том, что для ранних субформаций наиболее характерно проявление наложенного хрусталеобразования (месторождения Биннет-Квори, Серидозинью и др.) и незначительное развитие гранулированного кварца и, наоборот, среди поздних



субформаций слабое развитие имеет хрусталеносность и более типично образование гранулированного кварца (месторождение Лас-Тапиас и др.).

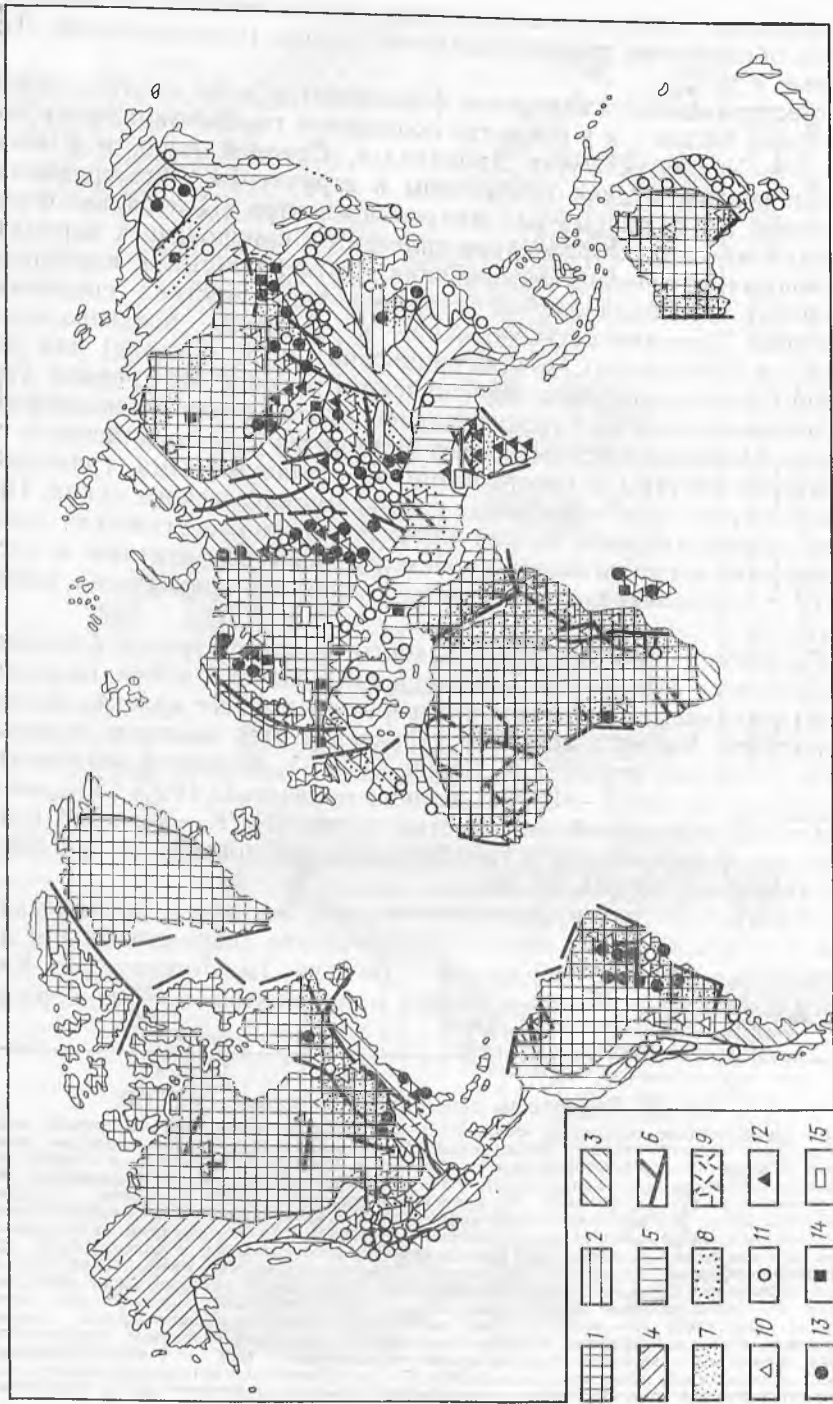
Месторождения силекситов формируются и на платформах (в Нигерии, Анголе), и в пределах подвижных геосинклипальных поясов (на Урале, Алтае, в Забайкалье, Средней Азии, в Южных Кордильерах), будучи приурочены к структурам типа средних массивов (Мугоджары) или микроконтинентов (Центрально-Французский массив). Образование силекситов приурочено к периодам тектоно-магматической активизации платформенных и консолидированных геосинклипальных структур типа жестких средних массивов (позднепротерозойский — в Африке, позднекаледонский — в Мугоджарах, позднегерцинский — в Казахстане) или эволюции гранитоидов типа варисийского массива на Среднем Урале, внедряющихся на заключительных этапах развития складчатых поясов. Основные месторождения силекситов пространственно и генетически связаны с биотитовыми или аляскитовыми гранитами малых глубин заключительных стадий магматического цикла. При этом устанавливается четкая пространственно-генетическая связь силекситов магматогенного происхождения с пегматитами, в частности с хрусталеносными, а также с едиными гранитными массивами.

По времени образования силекситы кристаллизуются близкоодновременно с генетически родственными им пегматитами, но всегда четко устанавливается, что они завершают процесс кристаллизации пегматитов. Кварц силекситов характеризуется высоким содержанием флюидных включений (П.п.п. 0,59%), средними величинами светопропускания (T — 30%), водного показателя (V_{H_2O} / V_{CO_2} — 3,6) и высокой химической активностью калия (Na/K — 0,3), что отражает его формирование в гипабиссальных условиях, но при высоких температурах [31, 32, 36].

Масштабы силекситообразования, так же как и редкометалльных и хрусталеносных пегматитов, наиболее значительны для активизированных платформенных структур (месторождение Касонги в Анголе с запасами кварца в силекситовых телах порядка

Рис. 59. Размещение типов кварцевого сырья в СССР.

1, 2 — докембрийские складчатые области: 1 — архейские и протерозойские древние щиты; 2 — протерозойско-кембрийские (байкалиды). Протерозойско-палеозойские молодые складчатые области: 3 — протерозойско-раннепалеозойские (ранние каледониды); 4 — ранне-среднепалеозойские (поздние каледониды); 5 — средне-позднепалеозойские (герциниды); 6 — позднепалеозойские (мезозонды); 7 — раннемезозойско-кайнозойские (альпиды — Средиземноморский пояс); 8 — средне-мезозойско-кайнозойские (Тихоокеанский пояс — внешняя зона); 9 — позднемезозойско-кайнозойские (Тихоокеанский пояс); 10 — пограничный вулканогенный пояс. 11 — основные срединные массивы (архейские, протерозойские и палеозойские); 12 — древние платформы (Русская и Сибирская); 13 — эпипалеозойские плиты (Скифская, Запдно-Сибирская, Туранская, Баренцево-Карская). Эндегенные месторождения кварцевого сырья: 14 — магматогенные пегматитового класса (редкометалльные, хрусталеносные пегматиты и силекситы); 15 — магматогенные пневматолито-гидротермального класса (скарно-кварцевые, грейзено-кварцевые, вторично-кварцитовые, пропилито-кварцевые, березито-кварцевые, аргиллизито-кварцевые джаспероидные образования и т. п.); 16 — метанегматитового класса (слодоносные пегматиты, силектиты); 17 — метанневматолито-гидротермального класса метасоматиты и монокварцевые метаморфиты; 18 — метасадочного класса (кварциты и песчаники)



50—60 млн. тонн), но представляют практический интерес и в пределах складчатых поясов.

В отношении рудно-кварцевых объектов устанавливается двойная связь кварцевых жил и хрусталеносных полостей со скарнами — генетическая и парагенетическая. В первом случае в геосинклинальных областях (Приморье, Кавказ) кварце- и хрусталеобразование представляется непосредственным продолжением процесса скарнирования в результате внедрения разновозрастных гранитоидов, т. е. эти процессы близкоодновременны, но всегда кварцевые жилы и хрусталеносные полости более поздние по времени формирования и обычно отделены от скарнов тектоническими подвижками. Протекание гидротермально-метасоматических процессов на месторождениях подобного типа останавливается примерно на термодинамическом уровне березитовой формации образованием сульфидно-кварц-карбонатных, серицит-турмалиновых, карбонат-калишпат-сульфидных парагенезисов. Во втором случае на активизированных в альпийскую эпоху древних платформах (месторождения Янзюлин, Пинканлин) и срединных массивах (месторождения Дальнего Востока) скарны служат только благоприятной средой для развития кварце- и хрусталеобразования, залегая в виде компетентных линз в толщах древних пород, подвергшихся значительно более поздней метасоматической переработке, завершившейся образованием парагенезисов аргиллизитовой формации. Эти явления наиболее характерны для Восточно-Азиатской ветви Тихоокеанского подвижного пояса.

Масштабы кварце- и хрусталеобразования, связанного со скарнами, более значительны на активизированных участках платформ, тогда как в геосинклинальных областях известны только их проявления. В целом по запасам жильного кварца, пригодного для плавки прозрачного кварцевого стекла и оптического стекловарения, скарново-кварцевые тела малоперспективны из-за их ограниченных размеров. Качество сырья обычно низкое, обусловленное высоким содержанием газовой-жидких и твердых минеральных (рудных и нерудных) включений. Может рассматриваться, очевидно, только как попутный компонент добычи.

Олово-вольфрамовые и вольфрам-молибденовые месторождения, относимые к формации кварцево-грейзеновых, встречаются в различных тектонических структурах, но наиболее общей закономерностью их локализации является пространственная и генетическая связь с однотипными лейкократовыми киммерийскими и раннеальпийскими гранитами, формировавшимися в условиях активизации

Рис. 60. Размещение типов месторождений кварцевого сырья мира.

Области складчатости: 1 — докембрийской, 2 — нижнепалеозойской, 3 — верхнепалеозойской, 4 — мезозойской, 5 — каноэозойской; 6 — рифтовые и палеорифтовые системы; размещение областей активизации: 7 — активизированные участки цитов — платформ, 8 — активизированные срединные массивы, 9 — активизированные области с завершённой складчатостью; месторождения кварцевого сырья: 10 — постмагматические пегматитового класса, 11 — постмагматические пневматолито-гидротермального класса, 12 — метанегматитового класса, 13 — метаневматолито-гидротермального класса, 14 — метаосадочного класса, 15 — экзогенные остаточного класса

зации тектоно-магматических процессов на платформах и в областях завершённой складчатости. На месторождениях рассматриваемого типа устанавливается развитие в результате наложенных метаморфических изменений рекристаллизованно-гранулированного (фрагментарного) кварца (проявления Северо-Востока, Средней Азии) и хрусталеобразования (месторождения Кингсгейт, Плаймер-Ривер, Вольфрам-Кэмп, Петфорд). На австралийских месторождениях хрусталеносность имеет промышленное значение, но к настоящему времени большинство их отработано.

Кварц грейзено-кварцевых тел обладает достаточно высокими качественными характеристиками: содержит невысокое количество минеральных и газовой-жидких включений. Поэтому на некоторых объектах жильный кварц грейзено-кварцевых тел может служить сопутствующим компонентом при их эксплуатации на редкие металлы, повышая комплексность и рентабельность обработки месторождений.

Кварц-полевошпатовые и полевошпат-кварцевые обособления представляют собой тела метасоматитов по генезису и *PT*-условиям близкие к грейзено-скарновым образованиям. Достоверно пока такие тела установлены только в пределах геосинклинальных поясов и связаны со становлением поздневарисских гранитоидов. По ранним минеральным парагенезисам кварц-полевошпатовых метасоматитов развиваются поздние наложенные процессы фрагментарно проявленной грануляции и особенно флюорито-хрусталеобразования, захватывающие, кроме самих жил, боковые породы и приводящие к образованию эпигенетических хрусталеносных полостей. Кварц полевошпат-кварцевых метасоматитов содержит 5—8 % минералов-примесей, значительное количество газовой-жидких включений (коэффициент светопропускания не превышает 20 %, отношение «влага — газ» равно 6—8); запасы кварца невелики, как в отдельных жилах, так и в целом в пределах месторождений.

Большинство месторождений вторичных кварцитов сосредоточено в геосинклинальных областях (Казахстан, Алтай, Средняя Азия, Камчатка, Кавказ), а проявления и связанные с ними месторождения известны и на платформах (Болиден и другие месторождения района Шеллефтео в Швеции), и в пределах древних «зеленокаменных поясов», наложенных на кристаллические щиты. Очевидно, вторичные кварциты являются полигенными образованиями.

Многочисленные проявления вторичных кварцитов Урала, Казахстана, Камчатки, Курильских островов, Японии формировались под влиянием гидротермальной деятельности древних и современных вулканов. Другая часть вторично-кварцитовых и связанных с ними образований (в древних метаморфических комплексах, в линейных структурах) с андалузитом, корундом и особенно дистеном, фиксирующим высокотемпературные термодинамические условия повышенных давлений (месторождения района Шеллефтео в Швеции и др.), представляется глубинными метаморфогенными метасоматитами. На рудные тела, заключенные во вторичных кварцитах, накладываются более поздние процессы аргиллизации с одно-

временным образованием друз и кристаллов горного хрусталя и пирита в мелких полостях растворения, представляющих только минералогический и генетический интерес (Уральские колчеданные месторождения).

Месторождения кварцево-пропилитовой формации генетически связаны с комплексами и центрами субаэральных вулканитов, входят в состав близповерхностной группы образований (от 1 до 1,5 км) и фиксируют различные типы областей тектоно-магматической активизации древних щитов и молодых платформ. Рудные поля и зоны представлены минерализованными линейными жильно-прожилковыми, радиальными и более сложными системами, штокверками и метасоматическими залежами неправильной формы значительных размеров. Главные минералы продуктивных тел — кварц, карбонаты, хлорит, адуляр, гидрослюда и др. Специфической особенностью месторождений является широкое развитие предрудной пропилизации и пострудной аргиллизации с образованием кристаллов и друз горного хрусталя, кальцита и амethysta в остаточных пустотах и полостях растворения (месторождения Потоси, Льяльягуа — Боливия), обилие марганцовистых карбонатов и отчетливое телескопирование минеральных ассоциаций.

Скопления кварцевого материала сосредоточены на месторождениях золото-кварц-березитовой субформации, развивающейся в зеленокаменных трогах древних щитов, связанных с вулканоплутоническими натровыми комплексами. Не менее крупные массы жильного кварца имеются и в тектонических зонах, вмещающих фанерозойские аналоги золото-кварц-березитовой субформации. В разновозрастных складчатых областях фанерозоя образования этой формации связаны с синклиническими структурами и ассоциируют с инверсионным или раннеорогенным гранитоидным натровым магматизмом. Для инверсионной и раннеорогенной субформаций характерен своеобразный тип гидротермально-метасоматических изменений — березитизация, а также фрагментарная непромышленная грануляция рекристаллизационного типа и хрустальность. Грануляция зафиксирована на месторождениях гипсеприт-сульфидно-кварц-березитовой и золото-антимонит-кварц-березитовой субформаций. Хрусталеобразование известно на месторождениях Урала.

Кварцевые, халцедоновые, агатовые, аметистовые и т. п. образования, сопровождающиеся метасоматитами типа аргиллизитов и формирующие основную массу продуктивных тел некоторых рудных месторождений или самостоятельные месторождения нерудных полезных ископаемых (аметиста, агата и др.), являются гетерогенными. Одни из них связаны с громадными излияниями траппов (Рио-Форкентина, Каразинью — Бразилия; Ххакра, Буранта — Индия) в периоды активизации древних платформ (Бразильской, Русской, Сибирской, Индостанской) и обязаны своим происхождением поствулканической низкотемпературной гидротермальной деятельности вдоль тектонически ослабленных зон с возникновением

кварц-аметист-агатовых, агат-халцедоновых и т. п. тел с березит-аргиллизитовыми ореолами. Другие образования возникали в условиях геосинклинального режима и локализовались не в основных, а в средних и кислых вулканитах также с интенсивным развитием аргиллизитов вблизи халцедон-агатовых с кварцем и аметистом миндалинов, прожилков и жил (Уохтевское, Памачское, Иджеванское, Магнитогорское месторождения агата — СССР). Самостоятельную группу составляют постмагматические плутогенные нерудные месторождения агата и аметиста Урала (Шайтанское, Озерное, Ватиха, Тальян, Сарапулка), образовавшиеся в заключительную стадию орогенного этапа или в период активизации консолидированных герцинских структур. Пространственно и генетически они тесно связаны с позднепалеозойскими гранитоидами, точнее, с сопровождающими их постмагматическими процессами. И, наконец, рудные месторождения киновари, антимонита с метасоматитами аргиллизитового типа (Хиллгров, Австралия; Йеллоу-Пайн, США) относятся обычно к телетермальным, не обнаруживающим четкой связи с какими-либо интрузиями или этапами вулканизма. Общей чертой всех перечисленных месторождений является их образование в приповерхностных низкотемпературных условиях в позднеостороженный период развития геосинклиналий или в период тектоно-магматической активизации платформы.

Месторождения джаспероидной формации имеют свои генетические, структурно-минералогические и минерагенетические особенности. Важную роль в их формировании играют крупные надвиги, создающие в целом благоприятную региональную структурно-тектоническую обстановку размещения месторождений и, что не менее важно, мощные экранирующие покровы глинистых сланцев. Общим для всех месторождений является метасоматическое окварцевание брекчированных пород (джаспероидизация) с развитием субмикроскопического кварца в парагенезисе с тонкодисперсными глинисто-гидрослюдистыми агрегатами и «битумами», преобладанием текстур замещения — пятнистых, брекчиевых, массивных и выполнения — гребенчатых, друзовых, кокардовых и т. п. Близкий минеральный состав руд: на месторождениях киноварь-флюорит-антимонит-джаспероидной субформации устанавливаются золото и мышьяк, а в золото-реальгар-джаспероидной — наряду с золотом находится ртуть, сурьма и мышьяк. Что касается нерудных минералов (кварца, флюорита, кальцита, гидрослюды, серицита) и сопутствующих метасоматических изменений окружающих пород (джаспероидизации, серицитизации, аргиллизации), то они практически аналогичны в названных субформациях, отличаясь только количественными соотношениями или интенсивностью проявления. Структуры месторождений, минеральный состав рудных тел, развитие колломорфных структур и другие особенности свидетельствуют об их формировании в приповерхностной зоне и зоне умеренных глубин и принадлежности к молодым (преимущественно альпийским) низкотемпературным телетермальным образованиям, связанным с тектоно-магматической активизацией.

Закономерности размещения кварцевых образований типовых формаций постмагматического класса позволяют установить главную особенность их локализации — генетическую и пространственную связь с плутоническими и вулканоплутоническими комплексами. Размещение кварцевых тел постмагматического класса определяется положением ореолов пегматитов и гидротермалитов вокруг конкретных вулканических или плутонических комплексов, а кварц содержит большое количество газово-жидких и минеральных примесей (от 10 до 40 и более), в том числе рудных, создающих неудаляемые окрашивающие включения в стекле. Все эти особенности обусловлены генезисом охарактеризованных формаций.

По Ю. М. Соколову, пегматиты различной металлогенической специализации локализуются в метаморфических поясах определенного геодинамического режима. Устанавливается строгое термодинамическое соответствие в формировании и рудогенезе редкоземельных пегматитов в гранулитах, мусковитовых пегматитов — в поясах умеренных (дистен-силлиманитовая серия), редкометалльных — в поясах низких (андалузит-силлиманитовая серия), а мусковит-редкометалльных — в поясах промежуточных (дистен-андалузит-силлиманитовая серия) давлений и тектоно-метаморфической цикличности метаморфических поясов. Связь процессов пегматизации и регионального метаморфизма не ограничивается только перечисленными закономерностями, а является гораздо более глубокой.

Для мусковитовых пегматитов с большей убедительностью доказывается их метаморфогенное происхождение и отсутствие связи с конкретными гранитными массивами. Ядерный кварц мусковитовых метаморфогенных пегматитов обладает достаточно высоким качеством, нередко крупными запасами в пределах жильных зон или месторождений, должен извлекаться как попутный компонент и поэтому рассматривается как возможный перспективный источник тико- и хонэкварца. В слюдоносных и редкометалльно-мусковитовых пегматитах устанавливается развитие наложенных процессов, приводящих к грануляции ядерного и блокового кварца и образованию хрусталеосных полостей. Грануляция развивается после образования крупнопластинчатого промышленного мусковита (месторождения Кольского п-ова, Урала), поэтому по возрасту является более поздней. Завершаются процессы диафореза формированием немногочисленных полостей растворения с кристаллами горного хрусталя и сопровождающими его минералами (альбит, серицит, хлорит, карбонаты). Грануляция может приводить к образованию промышленных концентраций вторичного зернистого кварца (месторождения на Урале), тогда как хрусталеобразование обычно является редуцированным и непромышленным (месторождения Конкуиста и Говернадор-Валадарис в Бразилии).

Силектиты приурочены исключительно к гнейсовым ядрам мигматитовых комплексов и зон, образовавшихся в средние стадии развития геосинклиналей в условиях дистен-силлиманитовой метаморфической серии при К — Na геохимическом режиме и представ-

ленных плагиогнейсами и амфиболитами, уровень метаморфизма которых отвечает амфиболитовой и гранулитовой фациям. Кварц формации П.А.2 типичен для зон наибольшей глубинности с высоким P_{CO_2} , низким $P_{\text{H}_2\text{O}}$ и $\mu_{\text{Na}} \approx \mu_{\text{K}}$ и характеризуется отношениями Na/K и $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ соответственно 3,08 и 1,9, максимальным коэффициентом светопропускания (45—90 %) и минимальным содержанием флюидов включений. Для формации П.А.2 характерно наличие месторождений гранулированного кварца уфалейского типа, пригодного для производства плавящего кремнезема. Силектиты, так же как и генетически родственные им слюдоносные пегматиты, встречаются во внутренних (Индия, Карелия в СССР) и краевых (Бразилия) активизированных участках древних платформ, в их складчатых обрамлениях, возникших в результате поздней тектоно-магматической и метаморфической активизации (Северо-Байкальское нагорье, Северо-Западное Прибайкалье, Саяно-Енисейская складчатая область) и в геосинклинальных поясах, где локализуются в пределах структур типа срединных массивов, микроконтинентов (Мугоджары) или гнейсово-мигматитовых комплексов (Средний Урал, Аппалачи). Абсолютный возраст неизмененных силектитов примерно соответствует возрасту кварц-полевошпатовой массы, составляющей основу слюдоносных пегматитов и охватывает значительный промежуток геологической истории (среднепротерозойско-каледонский). Но относительный их возраст разный. В отличие от силектитов, относящихся к образованиям магматогенной группы, тесно пространственно связанных с редкометалльными и особенно хрусталоносными пегматитами, формирующихся в заключительные периоды развития геосинклиналией и завершающих процесс кристаллизации генетически родственных пегматитов, силектиты, составляющие единый генетический ряд с метаморфогенными мусковитовыми пегматитами, образуются в средние стадии развития геосинклиналией и предшествуют ранним синкинематическим слюдоносным пегматитам.

Диафторез силектитов представлен чрезвычайно широким развитием процессов грануляции с отчетливыми признаками их проявления в высокотемпературных условиях с участием бластеза, α — β -трансформации, равномерной ориентации и регенерации индивидов с образованием равновесных гранобластовых структур и характерного вторичного тонко-мелкозернистого blastогранулированного кварца. Наложенное хрусталообразование проявлено очень слабо и не имеет существенного значения. Относительный возраст грануляции одновременен или близок ко времени наложенного мусковитообразования в слюдоносных пегматитах и охватывает верхнепротерозойско-позднегерцинский отрезок геологической истории, проявляясь в различных провинциях в разное время. Наиболее интенсивным периодом грануляции следует признать среднепозднегерцинский.

Структурно-минералогические и физико-химические особенности первичных и диафторированных силектитов удивительно постоянны независимо от региона и времени их образования. Это находит

отражение в наличии в неизменных силектитах участков стекло-видного кварца, ортоклаза, микроклина, биотита, апатита, сфена, граната, турмалина; в тонко-мелкозернистой гранобластовой структуре, в присутствии мусковита, рутила, парагонита — в их гранулированных аналогах. В целом гранулированный кварц силектитов отличается повышенным содержанием минералов-примесей, но в то же время лучшими физико-химическими характеристиками самого кварца (см. табл. 7 и рис. 52) и является промышленно освоенным типом месторождений кварцевого сырья для плавки.

Монокварцевые и существенно кварцевые метасоматиты метаморфогенного происхождения связаны с регрессивным этапом регионального метаморфизма и образуются в достаточно широком термодинамическом интервале. Наибольшее практическое значение в смысле концентрации кварцевых метасоматитов имеет среднетемпературная дистен-мусковит-кварцевая формация, приводящая к образованию линзовых, шпировых и пластовых обособлений промышленной мощности.

Принципиально на основе лабораторных исследований установлена возможность получения из существенно кварцевых метасоматитов концентратов, приближающихся по качеству к сырью из жил гранулированного кварца, используемому в настоящее время промышленностью. Следовательно, в будущем при увеличении промышленной потребности метаморфогенные кварцевые метасоматиты могут рассматриваться как возможные источники получения кварцевой крупки для плавки и варки кварцевых стекол при условии применения их глубокого обогащения.

Изучение закономерностей пространственного распределения кварцевых жил в связи с уровнем и типом регионального метаморфизма и общей эволюцией Уральской геосинклинали позволило выделить четыре крупных метаморфогенных формации жильного кварца, занимающих определенную геологическую позицию и отвечающих отдельным этапам геосинклинального развития [28].

Жилы дистен(эклогит)-сланцевой кварцево-жильной формации П.Б.2 концентрируются в сланцевых обрамлениях гнейсово-мigmatитовых комплексов в пределах липейных «зон смятия» (рис. 61, 62). Для этих зон характерен высокоградиентный метаморфизм амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций в условиях повышающегося химического потенциала калия. Довольно высокий коэффициент светопропускания ($T=40=75\%$), низкое содержание летучих компонентов, отношение H_2/CO_2 в кварце равно 2,6, а также величина параметра $Na/K=3,04$ указывают на его формирование в условиях средних глубин при умеренных T и P , высоких и средних P_{H_2O} и несколько большей, но ограниченной химической активности калия. Кварцевые жилы формации образуют месторождения средне-крупнозернистого гранулированного тикокварца кыштымского типа с характерной неравновесной катакlastической или зубчатой структурой (так называемый катакlast-гранулированный кварц). Менее характерны для формации П.Б.2 диафорические преобразования с фрагментарным развитием рекристал-

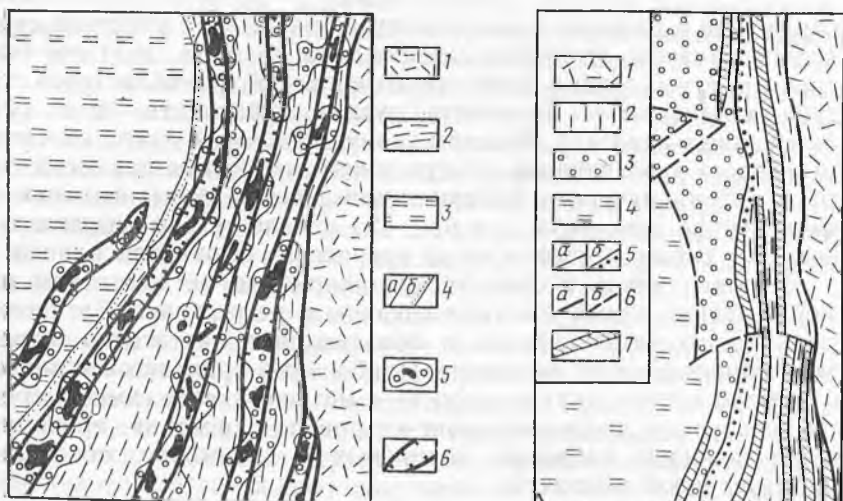
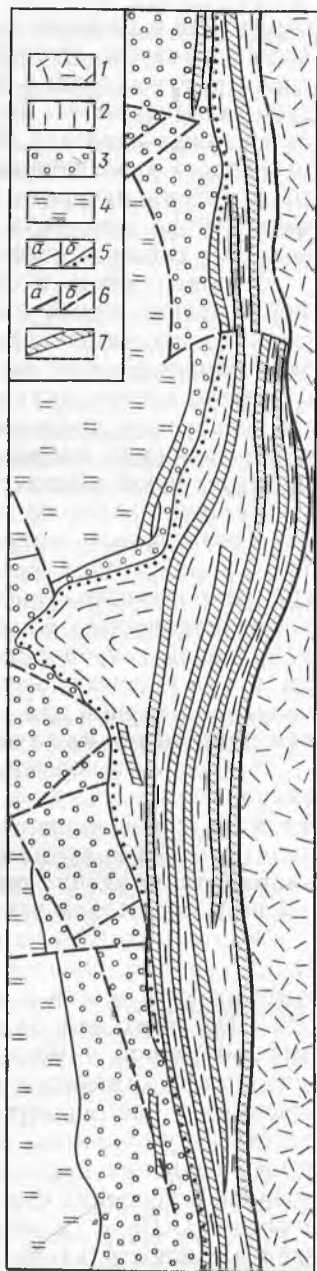


Рис. 61. Кварцево-жильные зоны одного из участков месторождения на Среднем Урале.

1 — девонская система: эйфельский и живетский ярусы (улутауская свита); 2 — ордовикская система (куртинская, шайтанская, билимбаевская свиты); 3 — верхний протерозой (уфалейская свита); 4 — стратиграфические границы: *a* — нормальные, *b* — несогласные; 5 — максимумы суммированной площади кварцевых проявлений; 6 — кварцево-жильные зоны

Рис. 62. Схема размещения кварцево-жильных зон на месторождении гранулированного кварца (Средний Урал):

1 — девонская система: эйфельский и живетский ярусы (улутауская свита); 2 — ордовикская система (куртинская, шайтанская, билимбаевская свиты); 3 — верхний протерозой (уфалейская свита, слюдяногорская подсвита, теплогорская толща); 4 — верхний протерозой (уфалейская свита, слюдяногорская подсвита, беркутинская толща); 5 — стратиграфические границы: *a* — нормальные, *b* — несогласные; 6 — тектонические нарушения: *a* — установленные, *b* — предполагаемые; 7 — кварцево-жильные зоны



лизованно-гранулированного кварца, распространенные, например, на Мугоджарских месторождениях.

Глаукофан-зеленосланцевая кварцево-жильная формация П.Б.3 объединяет жилы, сложенные крупнозернистым кварцем и возникшие в результате проявления регионального низкотемпературного глаукофан-зеленосланцевого метаморфизма, проявившегося преимущественно в вулканогенных и кремнисто-вулканогенных натровых сериях синклинорных и, в меньшей мере, антиклинорных зон Урала.

Характерной особенностью кварцевых жил данной формации является их исключительная приуроченность к зонам региональных разломов, сопровождающимся глаукофан-зеленосланцевым метаморфизмом (например, к Главному Уральскому глубинному разлому на участках проявлений «приразломного» метаморфизма вулканогенных толщ Тагильско-Магнитогорского прогиба на Среднем Урале и вулканогенно-осадочных образований Максютовского комплекса на Южном Урале).

Жилы формации отличаются наличием индивидов с индукционными гранями, имеющими молочно-белый цвет иногда с прозрачными участками, переменным коэффициентом светопропускания (17—81 %), пониженным отношением $Na/K=2,82$ и довольно высоким $V_{H_2O}/V_{CO_2}=2,8$. Такие параметры жильного кварца указывают на низкотемпературность его формирования в условиях высоких давлений дислокационного метаморфизма, при высоком парциальном давлении углекислоты (P_{CO_2}), повышенном химическом потенциале $Na(\mu_{Na})$ в минералообразующих растворах. Для данной формации характерно наличие месторождений тико- и хонэ кварца.

Зеленосланцевая кварцево-жильная формация П.Б.4 представлена жилами средне-, крупнозернистого молочно-белого кварца, сосредоточенными главным образом в региональных антиклинорных поднятиях, но иногда встречающимися и в прогибах. Они составляют основной фон нехрусталеносных кварцевых жил со слабо проявленными процессами рекристаллизации и наложенного хрусталеобразования (южноуральские месторождения). Форма жил четковидная, линзо- и плитообразная; размеры, как правило, незначительные (10—20 м по простиранию при мощности 1—3 м). Параметры жильного кварца сильно варьируют: $T=5-40\%$, водный показатель от 2 до 18, в среднем 3,2 отношение $V_{H_2O}/V_{CO_2} 2,84$, что свидетельствует об его образовании в условиях малых глубин при высоких P_{H_2O} и химическом потенциале калия в минералообразующих растворах.

Минеральные парагенезисы жильного кварца формаций П.Б.4, его физико-химические параметры и данные термобарогеохимических исследований свидетельствуют об образовании данной формации в PT -условиях зеленосланцевой фации. Кварцевые жилы формации локализируются в зонах разломов, в наложенных мульдах и на периклиналях положительных структур третьего-четвертого порядка. В связи с этим они могут быть как изофациальными с вме-

цающими их породами (в пределах восточного бора Тагильско-Магнитогорского прогиба на Южном Урале), так и неизофациальными, более поздними по отношению к древним глубокометаморфизованным комплексам и синхронным с ними формациям кварцевых жил (на месторождениях Среднего Урала, где геологическое положение и взаимные пересечения кварцевых жил подтверждают низкотемпературный уровень образования и более молодой возраст жил формации).

Диафторез-зеленосланцевая кварцево-жильная хрусталеносная формация П.Б.5, представленная жилами крупно-, гигантозернистого кварца, связана с завершающим этапом метаморфизма в эволюции Уральской геосинклинали, развивавшимся в условиях возрастающего калиевого геохимического режима. Поднимающиеся в верхние горизонты земной коры разогретые гнейсовые ядра рассматриваются как основные энергетические источники активизации гидротермально-метасоматических процессов в их обрамлении. Пространственно процессы жилообразования по отношению к активизированному гнейсовому ядру смещены в сторону его внешнего обрамления. Устанавливается закономерное повышение температуры образования кварцевых жил по мере приближения к гнейсовому ядру при горизонтальном градиенте температур 12—15 град/км [29].

Жильный кварц формации характеризуется средним отношением H_2O/CO_2 равным 3,6, но имеющим значительный интервал колебаний (от 2,7 до 18,0), и Na/K, равным 2,64, что указывает на гипабиссальные условия его образования в пределах поздних зон метаморфической и метасоматической переработки пород. С формацией П.Б.5 связаны месторождения горного хрусталя и пьезокварца.

Кварцевые безрудные образования являются сквозными для всех геологических эпох развития Уральского подвижного пояса. Однако в генетическом и промышленном отношении они далеко неоднозначны, что объясняется различными свойствами кварца, формирующегося в определенных термобарогеохимических условиях и масштабностью кварценосности различных геологических комплексов и структурных зон. Неметаллоносные кварцевые жилы данного формационного ряда имеют метаморфогенное происхождение, что доказывается их тесной связью с комплексами пород, метаморфизованных в определенных термодинамических условиях, парагенезисами минералов-спутников, свойствами самого жильного кварца. И, напротив, попытки связать их образование с какими-либо магматическими породами выглядят обычно неубедительно. В общем уровень метаморфизма, которому безрудные кварцевые жилы обязаны своим происхождением, понижается в ряду от формации П.Б.2 к формации П.Б.5 — от амфиболитовой и гранулитовой фаций до зеленосланцевой. Кварцевые жилы П.Б.2 и П.Б.3 формаций известны только в складчатых поясах, а формаций П.Б.4 и П.Б.5 и на платформах, и в геосинклиналях. При этом жилы первой формации отвечают наиболее глубинным уровням эро-

зионного среза метаморфических комплексов, второй формации — промежуточным, а двух последних — наименьшим уровням эрозии геологических структур. Эти две группы кварцевых жил являются и разновозрастными образованиями: первые формируются на средних, а последние на заключительных этапах развития геосинклиналей или в период тектоно-метаморфической и магматической активизации платформ и ранее консолидированных областей.

Метаморфогенные кварцевые жилы формации П.Б.2, обычно в той или иной степени гранулированные (средне-крупнозернистый кварц кыштымского типа катакластической структуры), приурочены к конформно окружающим древние глубокометаморфизованные гнейсовые ядра сланцевым обрамлениям мигматитовых комплексов или линейным протяженным зонам, претерпевшим неоднократный метаморфизм в условиях амфиболитовой, эпидот-амфиболитовой фаций и фации дистеновых сланцев.

Обязательным условием образования жил гранулированного кварца является также широкое проявление во вмещающих породах субсинметаморфических дислокаций. Зафиксировано, что жилы этой формации встречаются обычно там, где высокометаморфизованные дистен (эклогит)-сланцевые комплексы пересекаются, сопровождаются или срезаются глубинными тектоническими разломами и протяженными «зонами смятия» (рис. 63, 64) шириной от нескольких до десятков километров («зоны смятия» Главного Уральского разлома, Давапская «зона смятия» в Прибайкалье, Татарская «зона смятия» Енисейского кряжа, Джагдинская «зона смятия» Монголо-Охотского складчатого пояса и др.), где интенсивно проявлялись процессы дезинтеграции («грануляции») гигантозерен и очищения от вредных примесей первичного высокотемпературного крупно-, гигантозернистого жильного кварца.

Следовательно, гранулированный кварц является вторичным метаморфогенным полезным ископаемым, обязанным своим происхождением: а) полиэтапному проявлению регионального метаморфизма дистен-силлиманитового типа в зональных гнейсово-мигматитовых комплексах и «зонах смятия»; б) локальному развитию складчатых и разрывных деформаций, отвечающих понятию «зоны смятия», обладающей динамометаморфическим и ультраметаморфическим структурными парагенезисами, способствующими рафинированию жильного кварца — освобождению его от минеральных и газовой-жидких включений. Ранние метаморфические процессы являются причиной образования кварцевых жил, а поздние регрессивные играют в этом случае роль своеобразного природного технологического обогащительного процесса.

Грануляция кварца возникает только в области высоких P - T -параметров, обусловлена наличием высокого градиента температуры, избыточным тектоническим напряжением, резким изменением термодинамической обстановки и инициирована его полиморфным α — β -превращением (573 °С) с образованием полигональной системы трещин, расчленением гигантозерен кварца на гранулы, их некоторой разориентацией и многократной регенерацией с формирова-

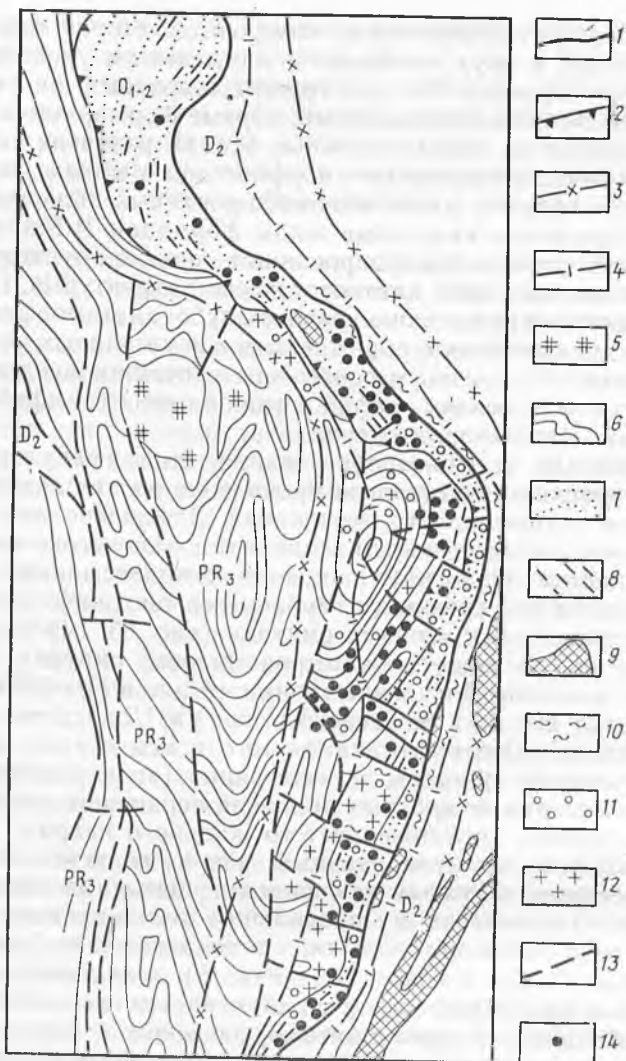


Рис. 63. Жилы гранулированного кварца в структуре Центрально-Уральского гнейсо-мигматитового комплекса:

1 — глубинные разломы; 2 — границы гнейсовых ядер и сланцевых обрамлений комплексов; 3 — границы зон смятия, сопряженных с глубинными разломами; 4 — границы интенсивной дислоцированности пород, бластомилонитизации и грануляции; 5 — гранитонды; 6 — породы гнейсовых ядер; 7 — породы сланцевых обрамлений; 8 — эклогиты, апоэклогитовые и гранат-цоизитовые амфиболиты; 9 — гипербазиты, серпентиниты; 10 — милониты; 11 — зоны кислотного выщелачивания; 12 — зоны интенсивной мигматизации; 13 — тектонические нарушения; 14 — жилы гранулированного кварца

нием в итоге типичных структур *B*-тектонитов. Причем бластогранулированный кварц силектитов может возникнуть только в «зонах смятия», где обязательно присутствует ультраметаморфический структурный парагенезис, т. е. степень метаморфизма в общем от-

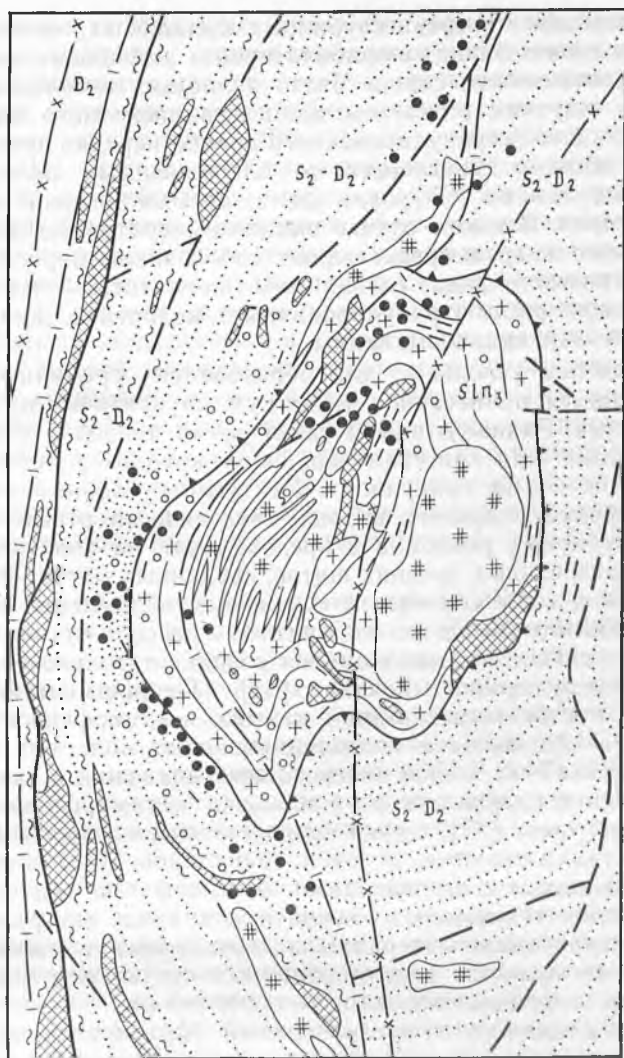


Рис. 64. Жилы гранулированного кварца в структуре Восточно-Уральского гнейсо-мигматитового комплекса. Условные обозначения см. рис. 63

вечает условиям амфиболитовой и гранулитовой фаций, а для образования катаклазгранулированного кварца по первичным неметаллоносным метаморфогенным кварцевым жилам достаточно только динамометаморфического структурного парагенезиса.

Термобарические параметры, благоприятные для образования бласто- и катаклазгранулированного кварца, характеризуются следующими величинами: средние температуры (570—800 °С), средние (200—500 МПа) или высокие давления (500—1200 МПа), в связи

с чем он возникает в среднеглубинных комплексах, метаморфизованных в условиях эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций дистен-силлиманитовой серии. Часто подобные комплексы сопровождаются широким развитием процессов кислотного выщелачивания. Жилы бластогранулированного кварца нередко ассоциируют пространственно и генетически со слюдоносными пегматитами, формирующимися на *PT*-уровне дистен-силлиманитовой метаморфической серии. В таком случае высокотемпературные жилы гранулированного кварца представляют собой закономерное среднее звено генетического ряда: слюдоносные пегматиты — силектиты — высокотемпературные (гранулированные) кварцевые жилы — низкотемпературные кварцевые жилы.

Необходимым условием для образования гранулированного кварца является полиэтапное (минимум двукратное) проявление метаморфизма. Ранние этапы метаморфизма приводят к зарождению первичных жил кристаллизованного крупнозернистого кварца, а поздние — к их грануляции. Указанным условиям, оптимальным для гранулированного кварца, геологически отвечают «зона смятия» глубинных разломов в пределах или на контакте глубокометаморфизованных древних щитов, срединных массивов, микроконтинентов и зоны сочленения сланцевых обрамлений метаморфических комплексов с их «горячими» гнейсово-мигматитовыми ядрами. В «холодных» зонах смятия возникает только рекристаллизованно-гранулированный кварц [31]. Геодинамически такая обстановка соответствует этапам тектоно-метаморфической активизации древних щитов и консолидированных областей, а также режимам начальных этапов инверсионных движений в складчатых поясах, сопровождающихся региональным метаморфизмом II типа, по Маракушеву [25], с ярко проявленным диафорезом. И первично кристаллизованные, и затем гранулированные жилы в общем изофациальны с вмещающими метаморфическими породами, что и позволяет установить их первичную природу (по реликтовым высокотемпературным минералам и структурам) и последующий диафорез по наличию гранулированных структур и минералов, отвечающих регрессивному этапу метаморфизма.

Рекристаллизованно-гранулированный (фрагментарный) кварц возникает при наложении на любые ранее образованные кварцевые жилы линейных динамометаморфических изменений в условиях, в общем отвечающих зеленосланцевой фации, когда α - β -трансформации кварца не происходит и формируются микро-, тонкозернистые агрегаты (0,001—1 мм) вдоль нескольких систем пересекающихся полос деформации с ориентировкой оптических осей зерен соответствующей знаку полосы. Последний зависит от направления и характера действующих напряжений (сжатие и растяжение) и приводит в первом случае к ориентировке зерен по нормали к границе полосы, а во втором — параллельно к границе полосы [14].

Для реализации процессов хрусталеобразования обязательно проявление трех групп факторов [1, 2]. Одна из них способствует

ет стабилизации оптимальных для роста горного хрусталя термобарических параметров, другая определяет образование пространства для свободного роста кристаллов, третья обеспечивает питающую среду. Оптимальные термобарические параметры — умеренные и низкие температуры (100—350 °С), невысокие давления (30—150 МПа). В связи с этим месторождения горного хрусталя формируются на небольших глубинах. Образование свободного пространства для роста кристаллов обусловлено тектоническими, значительно реже иными причинами и вызывается местными условиями. Питающей средой являются окружающие полость породы обычно с повышенным содержанием свободного кремнезема, выщелачивающиеся под действием эндогенных растворов, а рост кристаллов кварца происходит благодаря перераспределению кремнезема преимущественно латераль-секреционным путем.

Для хрусталеобразования благоприятен ряд режимов тектономагматической и тектоно-метаморфической активизации платформ и режимы отдельных этапов геосинклинального развития областей. Ю. Н. Ануфриевым [1] выделяются три класса хрусталоносных и хрусталесодержащих объектов: магматогенный, метаморфогенный и телетермальный.

Непромышленные проявления телетермального класса немногочисленны и связаны с разломами на периферии областей тектонической активизации. Минерализация в них низкотемпературная, кристаллы горного хрусталя всегда мелкие, но отличаются высокой прозрачностью, сильным блеском, в связи с чем имеют обычно местные названия — «мармарошские диаманты», «херкиммерские алмазы», «суттронские кварцы» (СССР, СРР, ФРГ, Швейцария). Близкие по типу кристаллы горного хрусталя содержатся в телетермальных ртутных и сурьмяно-ртутных месторождениях (Закарпатье, КНР).

Непромышленные, или мелкие, месторождения магматогенного класса возникают при тектоно-магматической активизации различных типов ранее консолидированных геосинклинальных областей или платформ. Тепло- и массоперенос — кондуктивный очаговый с относительно быстрым истощением запасов вынесенной тепловой энергии. Представлены, как правило, редкометалльными скарново-кварцевыми, грейзено-кварцевыми и полевошпато-кварцевыми жилами с гнездами горного хрусталя, в которых с глубиной повышается до промышленного содержание таких металлов, как вольфрам, олово, висмут, молибден и другие (Австралия, КНР, МНР, Боливия, США). И только с метаморфогенной хрусталоносной формацией связаны промышленные и все наиболее крупные месторождения горного хрусталя в мире (Бразилия, Мадагаскар).

Геодинамический режим формирования этой формации обусловлен усилением регионального теплового потока и образованием положительных структур. Тепло- и массоперенос ареальный или ареально-зональный, длительный, природа теплоносителей конвективная флюидно-газовая.

К благоприятным для хрусталеобразования относится также режим инверсионных движений в геосинклинальных складчатых областях, сопровождающийся региональным метаморфизмом раннеорогенного и орогенного типов [25]. Важнейшими хрусталеносными объектами при этом являются формации неметаллоносных (безрудных) кварцевых жил и минерализованных трещин (жил «альпийского» типа).

Наиболее характерные особенности формаций следующие: а) широкое распространение хрусталеносных кварцевых жил на больших площадях, генетически или парагенетически связанных с метаморфической зональностью; б) необязательность пространственной и генетической связи с интрузивными массивами; в) отсутствие синхронных металлоносных рудообразований на тех же площадях, как и отсутствие рудной минерализации в хрусталеносных телах, обусловленные ареальным тепло- и массопереносом, ведущим к рассеянию, а не к концентрации металлогенных компонентов; г) приуроченность к участкам повышенной неоднородности геологического строения в сочленении разнородных по режиму развития структур; д) наличие постоянной генетической связи с зонами диафтореза зеленосланцевой фации и временная приуроченность к этапу рассланцевания деформационного цикла; е) наложенность хрусталеобразования, интенсивность которого зависит от степени проявления метаморфогенно-гидротермальных метасоматических процессов изменения вмещающих пород и ранних кварцевых жил с развитием кварц-карбонат (гематит)-альбитовых, кварц-серицитовых и гидрослюдисто-каолинитовых (монтмориллонитовых) парагенезисов.

ГЕОЛОГО-ПРОМЫШЛЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ

Геолого-промышленная классификация месторождений отражает все многообразие источников кварцевого сырья на современном этапе и призвана служить основой стратегии планирования и проведения геологоразведочных работ на конкретные виды минерального сырья для соответствующих кварцпотребляющих отраслей.

При определении геолого-промышленного типа месторождения кварца учитывались геологические и генетические особенности, условия локализации, морфология тел, структура и минеральный состав кварцевых обособлений, тип слагающего кварца, качественные и некоторые другие показатели. Решающими факторами при промышленной группировке месторождений были приняты природный (генетический) тип кварца и его качественные (технологические) параметры, а геологические особенности, морфология и размеры тел, объем монокварцевых обособлений, степень концентрации запасов, экономические и горно-технические условия их эксплуатации при характеристике выделенных типов кварцевого сырья отнесены к вспомогательным.

Анализ с этих позиций всех имеющихся материалов позволил предложить новый вариант геолого-промышленной систематики месторождений кварцевого сырья (табл. 13). В классификации выделено 16 природных геолого-промышленных типов кварца: 14 — в эндогенной серии и 2 — в экзогенной (рис. 65). В эндогенной серии 4 типа относятся к магматогенной группе, остальные — к метаморфогенной. В отличие от известных, предложенная классификация более полная, учитывающая известные в настоящее время типы природного кварцевого сырья, используемого промышленностью. Систематика разработана на новой генетической основе и отражает один из важнейших аспектов — ведущую роль месторождений ортометаморфического класса в обеспечении промышленности сырьем тико- и хонэ кварца по отношению к месторождениям осадочного и постмагматического классов. В ней последовательно осуществлен формационный принцип классификации объектов, учитывающий их структурно-минералогические и эволюционно-генетические особенности — условия, необходимые для прогнозных и поисковых работ; классификация содержит данные о морфологии кварцевых тел, а также качественные показатели кварца каждого геолого-промышленного типа. Характеристика геолого-промышленных типов учитывает их геологические особенности и качественные параметры кварца, определяющие его технологические свойства и практическую значимость.

Редкометалльно-пегматитовый тип — кварц блоков, ядер и отдельных зон пегматитов. Издавна редкометалльные пегматиты берилл-кварц-микроклиновой субформации отрабатываются в Финляндии, Швеции, Норвегии, Португалии, ФРГ и других европейских странах не только на редкие металлы, но одновременно и на кварц (месторождения Тамелла — Финляндия, Хагендорф — ФРГ), на кварц и полевые шпаты (месторождения Эрьярви, Виитаннеми, Хаппалусма, Каатила — Финляндия и др.). Так, с месторождений Арндорф, Хагендорф в ФРГ, из месторождений редкометалльных пегматитов южных провинций Финляндии, Норвегии и Швеции поступает в последнее время [47] высококачественное кварцевое сырье в промышленно развитые капиталистические страны (Великобританию, ФРГ, Францию и др.), вылавливающие значительное количество многокомпонентного оптического, прозрачного и непрозрачного кварцевого стекла.

В редкометалльных пегматитах сподумен-микроклин-кварц-альбитовой формации кварцевые ядра и зоны имеют постоянное развитие и значительные размеры (от 100 тыс. до 5 млн. т). Запасы ядерного кварца на типичных месторождениях формации (Бикита в Зимбабве, Берник-Лейк в Канаде) оцениваются по 20—25 млн. т. В кварце из редкометалльных минералов постоянно присутствуют амблигонит и лепидолит, что обеспечивает необходимость технологического передела материала кварцевых зон и позволяет попутно получать обогащенные кварцевые концентраты. При технологическом обогащении пегматитов сподумен-кварц-альбитовой формации (месторождения Книгс-Маунтин, Моно —

Геолого-промышленная классификация месторождений кварцевого сырья

Серия	Группа	Класс	Геолого-промышленный тип и индекс формации	Полезные компоненты кварцевого состава	Морфология кварцевых тел	Качественные показатели				Тип сырья	Месторождения
						T, %	K _a	У общ. эл.	У окр. эл.		
Эндегенная	Магматогенная	Постмагматический	I.A.1 Редкометалло-пегматитовый	Стекловидный, гранулированный и кристаллический кварц	Кварцевые ядра, оси	47	79	510	29	ХОНЭ-КВАРЦ ТИКО-КВАРЦ (?)	Тамелла, Кимито (Финляндия); Финнбо (Швеция); Хагендорф (ФРГ); Серидозинью (Бразилия); Биннет-Квора (США); Лас-Гапиас (Аргентина)
			I.A.2 Хрусталеносно-пегматитовый	Кристаллы и окологнездовой кристаллический кварц	Миаролы, гнезда	69	75	499	12	ПЬЕЗО-КВАРЦ ТИКО-КВАРЦ	Анцирабентаси (Мадагаскар); Эспирито-Санта (Бразилия)
			I.A.3 Силекситовый	Стекловидный кристаллический кварц	Крупные тела	34	72	292	21	ЭТЭРО-КВАРЦ ХОНЭ-КВАРЦ ТИКО-КВАРЦ (?)	Кассонги (Ангولا)
			I.B.6 Постмагматический кварцево-жильный	Молочно-белый кристаллический кварц	Жилы от мелких до гигантских	13	54	409	33	ЭТЭРО-КВАРЦ ХОНЭ-КВАРЦ (?)	Материнская жила, Джунго (США)

1) По данным В. Хрустального

Курман

Метаморфогенная	Ортометаморфический	II.A.1 Слодоносно-пегматитовый	Кристаллический стекловидный кварц	Ядра, блоки	41	65	228	15	ХОНЭ-КВАРЦ ТИКО-КВАРЦ (?)	Банкок, Нарайана, Шанкара (Индия)
		II.A.1 (Г) Слодоносно-пегматитовый метаморфизованный	Гранулированный кварц	Ядра, блоки	66	55	220	14	ТИКО-КВАРЦ	Средне- и южно-уральские месторождения (СССР)
		II.A.2 (Г) Силектитовый метаморфизованный	То же	Жилы силектитов	78	53	215	12	ТИКО-КВАРЦ	Месторождения Урала, Мугоджар, Прибайкалья (СССР)
		II.B.2 (Г) Кварцевожильный метаморфизованный <i>улицы, здания, скалы</i>	Гранулированный кварц	Кварцевые жилы	70	46	91	8	ТИКО-КВАРЦ	Месторождения Урала, Енисейского края (СССР)
		II.B.3 Кварцевожильный первично кристаллизованный	Прозрачный кристаллический кварц	Кварцевые жилы	72	30	42	3	ТИКО-КВАРЦ	Месторождения Урала, Башкирии (СССР)
		II.B.4 (X) Кварцевожильный первичный и перекристаллизованный <i>Зелен-свечи, кварцы, миски</i>	Кристаллический молочно-белый и перекристаллизованный прозрачный кварц	Кварцевые жилы	15	0,41	78	5	ХОНЭ-КВАРЦ ТИКО-КВАРЦ (?) ПЬЕЗО-КВАРЦ	Месторождения Центрального Казахстана, Урала (СССР)

*Зима, Кожинский
Кольцов, м. 178*

*Дорожкин
Кривин, Ларин и др. в долине
(Палео) Восток
(Урал)*

*Метаморфозы
г. Мураши - З. И. М. М. М. М. М. М.*

*Буранин
Мураши
А. Г. С.*

12*

Серия	Группа	Класс	Геолого-промышленный тип и индекс формаций	Полезные компоненты кварцевого состава	Морфология кварцевых тел	Качественные показатели				Тип сырья	Месторождения
						T, %	Ka	Σ общ. эл.			
								Σ окр. эл.	$n \cdot 10^{-1\%}$		
			II.Б.4 (Р) Кварцево-жильный перекристаллизованный	Рекристаллизованный кварц	Тела и жилы	32	42	75	5	ХОНЭ-КВАРЦ ТИКО-КВАРЦ (?)	Месторождения Урала, Забайкалья (СССР)
			II.Б.5 (Х) Кварцево-жильный перекристаллизованный	Горный хрусталь, перекристаллизованный прозрачный и молочно-белый кварц	Пластовые зоны, трубы, жилы	72	38	71	4	ПЬЕЗО-КВАРЦ	Мимозо, Шики-Шики, Сети-Лагоас, Кристаллина (Бразилия); Манакара, Итермо (Мадагаскар); Покариса (Ангولا); Урал (СССР)
			II.В.1 Кварцитамиорфический	Кварцит	Мощные пласты	12	40	970	117	ЭТЭРО-КВАРЦ	Бакальское, Антоновское, Тарановское, Обручевское, Гора Каулауная (СССР)

Экзогенная	Остаточная	II.В.1 Кварцитовый перекристаллизованный	Кварцит	Пласты, зоны	33	48	600	81	ТИКО-КВАРЦ (?)	Макбальское, Златоустовское, Джетыгаринское (СССР)
		II.В.2 Песчаниковый	Песчанник	Пласты	6	41	1	414	ЭТЭРО-КВАРЦ	Урское, Эртинское, Черемшанское (СССР); Клендова (ПНР); Вайсенфельд (ГДР); Бататейра (Бразилия)
		III.А.1 Прибрежно-морских песков	Песок	Пласты	3	43	1—3	693	ЭТЭРО-КВАРЦ ХОНЭ-КВАРЦ	Новоселовское, Люберецкое (СССР); Хоенбок (ГДР); Стрелеч (ЧССР); Бяла Гора (ПНР); Моль (Бельгия); Хальтерн (ФРГ); Фонтенбло (Франция)

Примечание. T (коэффициент светопропускания) = I_0/I , где I_0 — интенсивность падающего светового потока, I — интенсивность выходящего светового потока; K_3 (коэффициент алюминировости) = Al_2O_3 общ. эл. 100%, где Al — содержание алюминия в кварце по данным спектроскопического анализа. Σ общ. эл. — общая сумма элементов-примесей в кварце ($Ti+Fe+Mn+Si+Ni+Cr+Zn+Li+K+Ca+Ge+4Me=Al$); Σ окр. эл. — сумма окрашивающих элементов-примесей в кварце ($Cu+Ni+Cr+Pb+Mn+Fe+Ti$). Типы кварцевого сырья по областям применения: пьезокварц — сырье для изготовления пьезопластин; тикокварц — сырье для получения параллельного кремнезема; хонзкварц — сырье для многокомпонентного увиолевого стекла, хрусталя, синтеза монокристаллов; этерокварц — сырье для флюсов, динаса, фильтров и пр. Промышленные типы кварцевого сырья. Г — грануляция, Р — рекристаллизация, Х — хрусталеобразование.

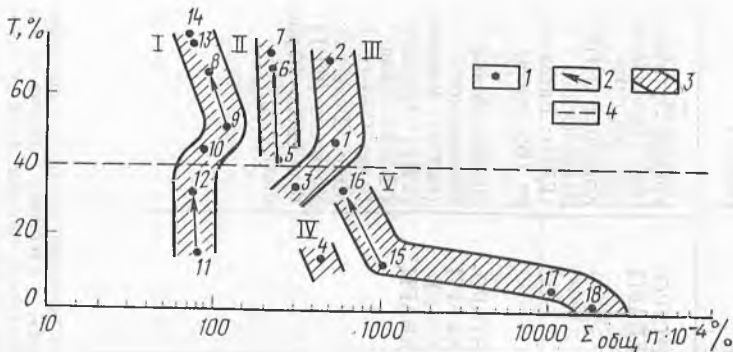


Рис. 65. Положение геолого-промышленных типов кварцевого сырья на диаграмме $T-\Sigma_{\text{общ}}$

1 — среднестатистические значения коэффициента светопропускания и общей суммы элементов-примесей выделенных типов; 2 — направление стрелок — изменения физико-химических параметров кварца в результате воздействия процессов диафореза; 3 — генетические серии геолого-промышленных типов: I — метанерудно-кварцево-жильная, II — пегматитовая, III — пегматитовая, IV — рудно-кварцево-жильная, V — песчано-кварцитовая; 4 — нижняя граница параметров пригодности сырья для производства прозрачного кварцевого стекла

США, Лакорн — Канада, Донкерхук — Намибия, Сенсекуру — Мали и др.), имеющих крупные и уникальные размеры тел (0,5—5,5 км по простиранию, мощность 100—400 м при глубине залегания более 2000 м), перерабатывается максимальное количество материала кварцевых зон. Это обстоятельство позволяет рассматривать их как крупные комплексные месторождения с попутным получением кондиционных кварцевых концентратов без существенных капитальных затрат при соответствующем совершенствовании технологии обогатительного процесса.

Объем блоковых и ядерных обосслонен увеличивается от 0,1—0,3 млн. т в берилл-кварц-микроклиновой и касситерит-кварц-альбит-ортотлазовой субформациях до 5—20 млн. — в сподумен-микроклин-кварц-альбитовой и сподумен-кварц-альбитовой субформациях редкометальных пегматитов. Ориентировочные запасы кварца имеют четкую тенденцию к увеличению на типичных зарубежных месторождениях от 1 млн. т в объектах первой субформации до 100 млн. т — в последней.

Кварц редкометальных пегматитов является освоенным типом сырья для оптического стекловарения, ферросплавов, динаса; широко применяется для этих и других целей за рубежом.

Хрусталеносно-пегматитовый тип — горный хрусталь и околонеозодовый кварц хрусталеносных пегматитов. Тип сырья для плавки прозрачного кварцевого стекла, составляющий один из попутных компонентов при обработке месторождений пьезокварца. Обладает высокими качественными показателями кварца и хорошей технологичностью вследствие низкого содержания твердых минеральных и газовой-жидких примесей. В связи с истощением ресурсов горного хрусталя пегматитового происхождения, удельный вес его в общем балансе сырья постоянно падает.

Таблица 14

Характер изменения физико-химических параметров кварца различных зон силексита Уральского месторождения

Зона	T*	ППП	Содержание элементов-примесей, $\mu \cdot 10^{-4} \%$						
			Cu	Ca	Mg	Mn	Fe	Al	Σ эл.-прим.
2	14—30	0,036	0,079	3,2	0,90	0,06	6,9	268	340,3
	23,2								
3	31—40	0,025	0,029	1,7	0,71	0,04	1,7	241	316,0
	34,5								
4	41—56	0,016	0,006	1,1	0,49	0,01	1,5	168	214,2
	48,4								

* В числителе — крайние, в знаменателе — средние значения коэффициента светопропускания (T).

Силекситовый тип — ядерный и блоковый кварц силекситов является относительно новым геолого-промышленным типом высококремнеземистого сырья [32, 36]. Силекситовый кварц Уральских месторождений имеет достаточно высокие средние качественные показатели: средний коэффициент светопропускания 34 % (максимальный до 58 %), общую сумму элементов-примесей $229 \times 10^{-4} \%$, почти вдвое меньшую по сравнению с кварцем редкометальных элементов-примесей. Кроме того, в процессе детальных геологоразведочных работ было выявлено, что силекситовые тела имеют грубозональное строение, наиболее отчетливо выражающееся в повышении коэффициента светопропускания к центральной части тел. Одновременно с увеличением к ядру силекситового тела коэффициента светопропускания уменьшается в кварце содержание элементов-примесей (табл. 14).

На основе геологической документации и лабораторных исследований выделяется четыре главных зоны в строении силекситовых тел (от периферии к центру): 1) мусковит-кварц-кальцинитовая зона пегматоидной или аплитовой структуры, развитая повсеместно и составляющая 1—5 % от общего объема тел; 2) внешняя зона крупно-, гигантозернистого молочно-белого кварца со светопропусканием до 30 %, являющаяся основной (60—80 % объема тела); 3) промежуточная зона крупно-, гигантозернистого (блокового, околядерного) кварца с прозрачными участками (светопропускание 30—40 %), занимающая 10—20 % объема тела; 4) центральная зона гигантозернистого кварца со светопропусканием от 40 до 58 %. Установлена возможность использования силекситового кварца в оптическом стекловарении, при получении

ферросплавов и для других целей (синтез, плавленный кремнезем) при совершенствовании обогащения.

Постмагматический кварцево-жильный тип — молочно-белый разномерный кварц рудно-кварцевых жил.

Он имеет молочно-белый, реже серовато-белый цвет из-за массы равномерно рассеянных мелких газовой-жидких включений, температуру кристаллизации порядка 400—550 °С, низкий коэффициент светопропускания (8—18 %), повышенное количество минеральных (до 5—7 кг/т) и элементных примесей (до 0,2 %). Но громадные запасы кварцевого сырья на зарубежных (Материнская жила, Джунго — США, Голден Майл, Норсмен — Австралия, Кем-Мотор — Зимбабве) и некоторых советских месторождениях от 20—30 млн. до 30—40 млрд. т заставляют принимать их во внимание как возможный реальный источник кварцевых концентратов (особенно в будущем) для областей промышленности с менее жесткими техническими требованиями по сравнению с кварцем для плавки и оптического стекловарения. Геолого-лабораторными исследованиями и пробной эксплуатацией установлена пригодность кварца данного типа в качестве сырья для тонкой керамики, ультрафиолетового стекла, хрусталя, флюсов, динаса и др.

Слюдоносно-пегматитовый тип — блоковый кварц слюдоносных пегматитов [11]. Кварцевые ядра и блоки слюдоносных (Бихар в Индии и Минас-Жерайс в Бразилии) и редкометалло-мусковитовых (Неллору и Майсур в Индии, Байя и Паранба в Бразилии) пегматитов имеют объем от сотен до 100 тыс. м³ и составляют часто от четверти до половины объема тел. До 30 % объема ядер представлены стекловидным кварцем. Средний коэффициент светопропускания кварца составляет 41 %, возрастая иногда до 60—70 %. Запасы пегматитового кварца некоторых месторождений Индии исчисляются 2—3 млн. т. В целом по оценке специалистов геологической службы Индии страна располагает крупными запасами «чистого» кварца пегматитов.

Месторождения слюдоносных пегматитов (Санкрамине, провинция Неллору, Махесмунда, провинция Бихар, Нинья, провинция Майсур в Индии) служат объектами попутной или специальной добычи ядерного и блокового кварца. Кварц используется промышленностью для изготовления многокомпонентных оптических стекол и принципиально может быть пригоден для получения определенных типов прозрачного кварцевого стекла.

Слюдоносно-пегматитовый метаморфизованный тип — гранулированный блоковый кварц слюдоносных пегматитов. Гранулированный пегматитовый кварц известен пока только на Урале [29]. Гранулированный кварц ядер и блоков слюдоносных пегматитов Уфалейского, Джабык-Карагайского и некоторых других гнейсомигматитовых комплексов Урала представляет собой равномернозернистый (1—2 мм) агрегат гранобластовой, сотовой или мозаичной структуры. Грануляция сопровождается тенденцией к обособлению чистых фаз, т. е. идет природный процесс очищения первичных зерен кварца под воздействием последующих тектоно-

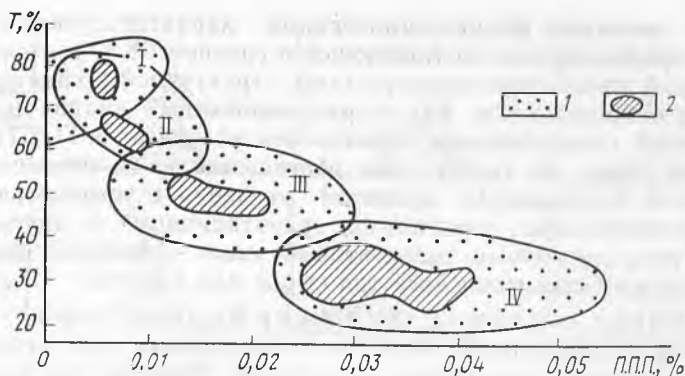


Рис. 66. Геолого-промышленные типы гранулированного кварца:

I — силектитовый; II — кварцево-жильный сильно метаморфизованный; III — то же, слабо метаморфизованный; IV — кварцево-жильный рекристаллизованный. 1 — поля параметров кварца определенного типа; 2 — поля максимальных значений параметров

метаморфических процессов. В частности, один из важных качественных и технологических параметров кварца — коэффициент светопропускания возрастает в бластогранулированном кварце пегматитов на 30—40 % по сравнению с первичным кристаллизованным блоковым кварцем (соответственно $T=66$ и 41 %), а минеральные и газово-жидкие примеси «отгоняются» в межзерновые пространства и легко удаляются при обогащении (фракционировании).

Методами бестехнологического опробования и единичными технологическими испытаниями установлена пригодность бластогранулированного кварца слюдоносных пегматитов для плавки прозрачного кварцевого стекла. В 1966—1976 гг. гранулированный кварц месторождений слюдоносных пегматитов Урала экспортировался в Японию.

Описываемый кварц является апробированным типом сырья для изготовления плавленого кремнезема.

Силектитовый метаморфизованный тип — гранулированный силектитовый жильный кварц (рис. 66). Первично кристаллизованные неметаморфизованные силектиты встречаются во многих слюдоносных провинциях мира: Индии (Майсурский пояс), США (Аппалачи), СССР (Мугуджары, Карелия), однако отрабатываются в настоящее время только некоторые тела месторождений Индии (Раламани, Деганиди, Сомехалли), они имеют пока второстепенное значение и не выделяются в самостоятельный геолого-промышленный тип. Метаморфизованные силектиты известны на Среднем Урале, в Прибайкалье, Мугуджарах. Слагающий их высококачественный бластогранулированный кварц с начала 70-х годов используется промышленностью и является освоением типом сырья для плавки прозрачного кварцевого стекла.

Основные объекты добычи в СССР гранулированного силектитового кварца в последнее время — жилы месторождения на Среднем Урале, залегающие в уфалейской свите верхнего протерозоя.

Обладая высокими физико-химическими характеристиками (например, прозрачностью, составляющей в среднем 68 % и несколько уступающей только горному хрусталу), структурной и гранулометрической однородностью, blastогранулированный кварц селективов отвечает существующим техническим условиям и ГОСТам на кварцевое сырье, но требует для обогащения из-за повышенного содержания минеральных примесей введения в технологические линии флотационных, химических, гравитационных и других методов. Гранулированный селективный кварц — важный перспективный геолого-промышленный тип сырья для плавки.

Кварцево-жильный метаморфизованный тип — катаклазгранулированный кварц неметаллоносных жил формации II.Б.2 — освоенный тип сырья для плавки. Впервые на Среднем Урале были открыты и разведаны месторождения гранулированного кварца острогорского типа, залегающие в кристаллических сланцах гнейсово-мigmatитового комплекса. С 1960 г. гранулированный кварц данного типа используется отечественной промышленностью. Структура кварца средне-крупнозернистая зубчатая или катакlastическая. Минеральные примеси представлены в основном мусковитом, графитом, рутилом. Коэффициент светопропускания высокий ($T=65\%$), но несколько уступающий селективному геолого-промышленному типу, однако количество минеральных примесей по сравнению с селективным типом в два раза ниже (см. рис. 65, 66). Сырье данного типа требует для обогащения применения воздушной, магнитной сепарации, химической и термической обработки; пригодно для получения плавленого кварцевого стекла электротермическими и газопламенными методами; наряду с горным хрусталем является важным видом сырья в отрасли (рис. 67).

Иногда снижение качественных параметров катаклазгранулированного кварца (по сравнению с охарактеризованными двумя предыдущими типами) вызвано меньшей интенсивностью тектонических деформаций и относительно низким термодинамическим уровнем диафореза (низкие ступени эпидот-амфиболитовой фации), что обусловило преобладание катакlastических структур вместо обычных гранобластовых и слабой перекристаллизации, т. е. меньшему очищению от минеральных и газовой-жидких примесей. Но в целом катаклазгранулированный кварц данного типа отвечает существующим требованиям к сырью для плавки кварцевого стекла, что установлено геолого-лабораторными методами и технологическими испытаниями в процессе проведения разведочных работ. Часть жил месторождений этого типа отрабатывается, обогащенное сырье поставляется заводам-потребителям.

Кварцево-жильный кристаллизованный кварц с прозрачными участками неметаллоносных кварцевых жил формации II.Б.3 — известный освоенный тип кварцевого сырья. Жилы данного типа хорошо известны среди вулканогенных образований синклинирных и вулканогенно-осадочных пород антиклинирных структур на Урале, отмечены среди кварцевых образований в Сред-

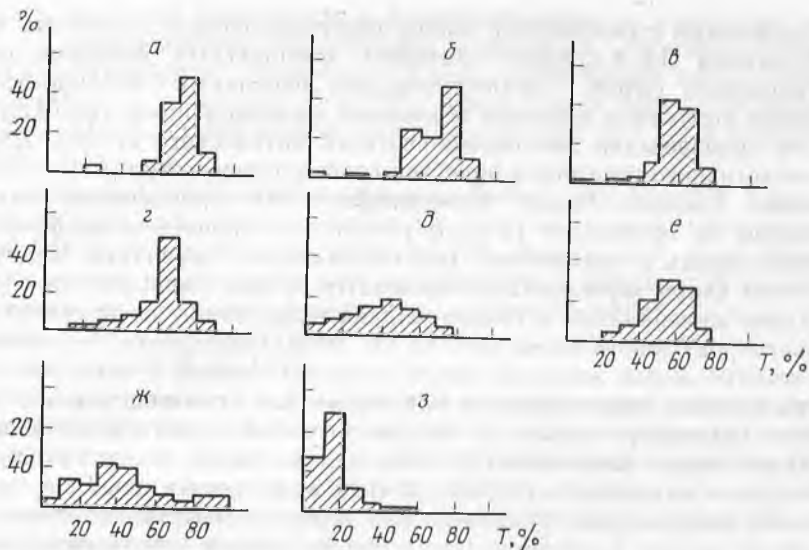


Рис. 67. Гистограммы светопропускания кварца основных месторождений СССР. а—е — гранулированный кварц; ж — силексит; з — хрусталеносный первично кристаллизованный кварц

ней Азии и на Северо-Востоке СССР. Они локализируются вдоль глубинных разломов, сопровождаемых глаукофан-зеленосланцевым метаморфизмом.

Характерными и наиболее изученными месторождениями данного типа являются месторождения на Урале. Кварцевые жилы здесь имеют простую линзовидную форму. Залегание жил с вмещающими породами согласное. Средний коэффициент светопропускания кварца 72 %. Количество прозрачных участков в общей жильной массе составляет 2—3 %, на некоторых месторождениях 9—10 %, а иногда 40—60 %. Низкий выход полезного компонента при добыче и обогащении затрудняет эксплуатацию месторождений данного типа, но месторождения с высоким содержанием прозрачных участков в общей жильной массе, залегающие в глубоко метаморфизованных комплексах Центрально-Уральского поднятия, успешно эксплуатируются в настоящее время, поставляя сырье для ряда отраслей промышленности. Обеспечение промышленности высококачественным кварцевым сырьем было значительно улучшено при внедрении в производство нового вида минерального сырья — гранулированного кварца. Однако с совершенствованием технологии обогащения кварца месторождения данного типа могут служить источником сырья для получения прозрачного кварцевого стекла, синтета монокристаллов и других целей.

Кварцево-жильный частично перекристаллизованный — кристаллизованный молочно-белый и перекристал-

лизованный стекловидный кварц неметаллоносных кварцевых жил формации П.Б.4 служит примером комплексных месторождений кварцевого сырья. Гигантозернистый первичный молочно-белый кварц этого типа является освоенным промышленным типом сырья для производства многокомпонентного оптического стекла. Кварц аналогичного генезиса и качества сосредоточен в жилах месторождений Южного Урала. Коэффициент светопропускания такого кварца не превышает 15 %. В результате процессов диафтореза, приводящих к наложенной хрусталеносности, первичный молочно-белый кварц перекристаллизовывается, в нем уменьшается содержание минеральных и газовой-жидких включений, коэффициент его светопропускания возрастает до 40—60 %. Перекристаллизованный околосредовой жильный кварц, сосредоточенный в пределах хрусталеносных зон, становится пригодным для производства прозрачного кварцевого стекла с предварительной кристобалитизацией. Кварц такого типа является сравнительно новым видом сырья для плавки и находится в стадии промышленного освоения. Вследствие слабо выраженных процессов наложенного хрусталеобразования общие запасы перекристаллизованного кварца характеризуемого типа невелики.

Кварцево-жильный рекристаллизованный — слабо метаморфизованный кварц неметаллоносных кварцевых жил формации П.Б.4. В общем по генезису, геологической позиции и свойствам близок к жильному кварцу предыдущего типа, но отличается от него отсутствием наложенных процессов хрусталеобразования и, наоборот, развитием процессов рекристаллизации в кварцевых жилах благодаря их положению в зонах глубинных разломов или вблизи них. Рекристаллизация приводит к возрастанию коэффициента светопропускания кварца с 15 до 32 % и концентрации части минеральных примесей в межзерновых пространствах, что облегчает их удаление при обогащении. Фрагментарный рекристаллизованный кварц характеризуемого типа слагает отдельные жилы месторождений Южного Урала, Западного Забайкалья. Он является освоенным типом сырья для синтеза монокристаллов, получения хрусталя и изделий электротехнической промышленности.

Кварцево-жильный перекристаллизованный — горный хрусталь и перекристаллизованный кварц минерализованных зон активизации древних щитов. Является традиционным типом сырья для производства не только изделий из пьезокварца (резонаторов, стабилизаторов частоты и т. п.), но и для получения плавленого кремнезема из отходов от обогащения кристаллов горного хрусталя и хрусталеносного жильного кварца минерализованных зон, широко используемых в зарубежных странах (США, Японии, Франции, Великобритании). В больших количествах кварцевое сырье данного типа поступает на мировой рынок с известных уникальных месторождений Бразилии (Шики-Шики, Сети Лагоас, Мимозо, Нортсентрал Гояс и др.), способных длительно удовлет-

ворять мировую потребность в плавочном сырье и, в меньшей мере, из месторождений Мадагаскара (Манакара, Антамболахибе), Анголы (Покариса), Мозамбика. Кварц бразильского типа отличается высоким качеством ($T=72\%$, общая сумма элементов-примесей $73 \cdot 10^{-4}\%$, сумма рудных компонентов $0,39 \cdot 10^{-4}\%$) и технологичностью.

Хрусталеносный кварц фанерозойских складчатых поясов, хотя и несколько отличающийся по качеству в различных регионах СССР и зарубежных стран (КНР, Австралия), но в целом отвечающий требованиям промышленности к кварцу для плавки и вполне заменяющий, а зачастую и превосходящий по качеству кварц бразильского типа ($T=75\%$, Σ общ. эл. $=69 \cdot 10^{-4}\%$, Σ рудн. эл. $=0,37 \cdot 10^{-4}\%$).

Следует отметить, что масштабы месторождений горного хрусталя так же как, впрочем, и других полезных ископаемых в подвижных поясах, ниже таковых на активизированных древних щитах. В нашей стране и за рубежом кварц данного типа служит источником кварцевого сырья для изготовления различных сортов прозрачного кварцевого стекла.

Кварцитовый тип — кварциты метасадочного происхождения. Залегают в виде мощных пластов среди глубокометаморфизованных древних толщ (Бакальское, Гора Караульная, Ицильское, Куштумгинское на Урале; Обручевское, Антоновское на Алтае; Тарасовское на Украине), обладают запасами на отдельных месторождениях до 50—200 млн. т, качество сырья относительно низкое. Средний коэффициент светопропускания равен только 12% , велики общая сумма — $970 \cdot 10^{-4}\%$ и сумма рудных элементов-примесей — $4,01 \cdot 10^{-4}\%$. Такие качественные показатели позволяют использовать кварцевое сырье бакальского типа только при получении ферросплавов, диоксида и флюсов. Обычно это сырье является одним из компонентов попутной и реже специальной добычи.

Кварцитовый перекристаллизованный тип — метасоматические и перекристаллизованные кварциты, представляющие собой гидротермально переработанные, осветленные по локальным тектоническим зонам кварциты предыдущего типа. Под воздействием гидротермально-метаморфогенных изменений затушевывается слоистая текстура породы, существенно улучшаются качественные показатели исходных кварцитов, и они превращаются в равномернозернистый массивный кварцевый агрегат, визуально с трудом отличимый от некоторых разновидностей жильного гранулированного кварца. Заметное изменение физико-химических свойств перекристаллизованных кварцитов по сравнению с неизмененными аналогами отражается, например, в повышении коэффициента светопропускания в 2—3 раза (соответственно $T=33$ и 12%), уменьшении примерно в 1,5 раза общей суммы рудных компонентов (соответственно $2,9 \cdot 10^{-4}\%$ и $4,0 \cdot 10^{-4}\%$).

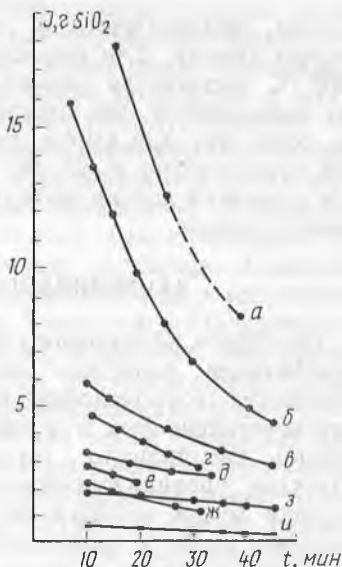
Перекристаллизованные кварциты этого типа выявлены на Урале (Джетыгаринское, Златоустовское месторождения), Тянь-Шане (Макбальское месторождение) и имеются в других регионах. Геологическими исследованиями, бестехнологическим опробованием кварцитов макбальского типа и технологическими испытаниями единичных проб устанавливается неуверенная возможность получения из сырья подобного типа прозрачного кварцевого стекла, когда одни пробы дают положительные результаты, а другие — отрицательные. Собственно об этом же свидетельствуют и данные бестехнологического опробования, занимающие промежуточное положение между показателями заведомо пригодного для плавки сырья (гранулированного, перекристаллизованного жильного кварца) и сырья, явно непригодного для этих целей (кристаллизованного молочно-белого кварца, исходных метаосадочных кварцитов). В то же время перекристаллизованные кварциты могут быть использованы для получения непрозрачного кварцевого стекла, высококачественных ферросплавов, тонкой керамики, фильтров. Таким образом, промышленное значение кварцитов метасоматического типа окончательно не установлено и для этого требуются дополнительные исследования.

Песчаниковый тип — песчаники. Типичным представителем данной группы месторождений является месторождение Вайсенфельд в ГДР [47]. Аналогичные месторождения известны в Армении (Урцкое, Эртическое), в ПНР (месторождение Клендова), ГДР (месторождения Глоссен, Гроскорбет и др.). Запасы кварцевого сырья на месторождениях вайсендельского типа практически неисчерпаемы и исчисляются миллионами и миллиардами тонн, но качество кварцевых концентратов, получаемых из них, отвечает требованиям только стекольной, керамической, химической и металлургической промышленности, использующих их для получения стеклотары, керамики, дшаса, флюсов и фильтров.

Тип морских песков — пески прибрежно-морских россыпей. Известный освоенный тип природного сырья для стекольной промышленности, производства многокомпонентного, увиолевого и непрозрачного кварцевого стекла и хрусталя. Месторождения данного типа обрабатываются в СССР (Новоселовское, Люберецкое), ГДР (Хоенбок), ЧССР (Стрелеч, Зриа), ПНР (Бяла Гора), Бельгии (Моль), ФРГ (Хальтерн), Франции (Фонтенбло) и других странах. Пески некоторых марок (сорт «0») с этих месторождений после неглубокого обогащения обладают достаточно высокими качественными показателями (например, содержание окиси железа — одной из главных вредных примесей — находится в пределах 0,005—0,008 %), но запасы их ограничены, залегание линз наиболее отсортированных песков крайне невыдержанное. Это приводит к их разубоживанию и затрудняет селективную добычу. Перспективы использования кварцевого сырья новоселовского типа для получения высококачественных кремнеземистых материалов невелики.

Рис. 68. Кинетика выделения воды при 1200° из образцов кварца различных месторождений и геолого-промышленных типов. По М. Н. Данчевской, В. А. Крейсбергу и др.

a — Болгария, *б* — Казахстан, *в* — Южный Урал, *г* — Приполярный Урал, *д* — Южный Урал, *е* — Средний Урал, *ж* — Южный Урал, *з* — Средний Урал, *и* — Бразилия



Обобщение изложенных материалов позволяет констатировать, что ведущим фактором, обуславливающим качество и промышленное значение кварцевого сырья, является генезис его месторождений. Генетические особенности природного кварцевого сырья выделенных геолого-промышленных типов определяют не только масштабы их месторождений, структуру и вещественный состав (количество минеральных и газовой-жидких включений, светопропускание, содержание структурных примесей) кварцевых образований, но и технологические параметры кварца: наличие, размеры и плотность распределения газовых пузырей, стекловидных и окрашивающих включений, температуру плавления, способность к кристобалитизации, газоотделению, содержание «низкотемпературной», «высокотемпературной» воды, углекислоты, углеводов, компонентов, находящихся в структурной решетке кварца, способность наплавления кварцевого стекла к кристаллизации, радиационной стойкости, светопропусканию в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра (рис. 68).

Как видно из результатов масс-спектрометрических исследований (по М. Н. Данчевской и др.), кварцевое сырье с содержанием «высокотемпературной» воды свыше 40 мгк/г SiO₂ не обеспечивает при экономически выгодных энергетических режимах плавления получение качественного кварцевого стекла в роторных электропечах. Среди исследованных образцов к кварцевому сырью с высоким содержанием структурной воды относятся: «рудный» кварц постмагматического типа из месторождений Болгарии и жильный частично перекристаллизованный кварц месторождений Казахстана. Кварцевое сырье с низким содержанием структурной воды представлено метаморфогенным перекристаллизованным хрустале-

носным, силектитовым и метаморфогенным кварцево-жильным типами кварца. Для последних типов уже за 30 мин отжига при 1200 °С достигается низкий уровень потока выделяющихся летучих компонентов, что обеспечивает наплав беспузырчатого стекла, тогда как для сырья южно- и центральноказахстанского типов недостаточно и 60—80 мин отжига при той же температуре для снижения потока выделяющихся летучих примесей до необходимого уровня.

ГЕОХРОНОЛОГИЯ КВАРЦЕОБРАЗОВАНИЯ

Проблемы абсолютного возраста кварцевой и хрустальной минерализации решались многими исследователями. Известные обобщения геохронологических и геологических данных выполнены для хрусталеносных и мусковитовых пегматитов достаточно надежно; как правило, устанавливается возраст руднокварцевых объектов, проанализировано проявление хрусталеобразования в истории Земли, имеются сведения о возрасте отдельных кварцево-жильных полей и провинций. Однако в целом анализа развития кварцеобразования в эволюции земной коры не проводилось. Систематизация имеющихся данных позволяет определить эпохи максимального проявления монокварцевой и преимущественно кварцевой минерализации.

Первый период формирования монокварцевых обособлений в виде кварцевых ядер и блоков в редкометалльных пегматитах фиксируется в раннем (более 3,0 млрд. лет) архее (месторождения Бикита, Шамва, Мотобо Южно-Родезийского щита, Сомерсет, Ошлек Трансваальского щита Африканской платформы, пегматитовые поля Йеллоунайф, Кэт-Лейк—Виннипег-Ривер Канадского щита, месторождения Воджина, Стрелли, Кулгарди, Кетлин-Крик в Йилгарнском и Пилбарском блоках Западной Австралии). Позднеархейская — раннепротерозойская (2,7—1,8 млрд. лет) эпоха представлена редкометалльными пегматитами блока Кимберли в Северной Австралии (месторождения Нейпур-Даунс, Маунт-Докрелл, Финнис-Ривер) и жилами «древней золото-кварц-березитовой формации» (месторождения Поркьюпайн, Керкенд-Лейк в Канаде, Бендиго, Норсмен, Голден-Майл в Австралии, Кем-Мотор в Зимбабве).

В раннем протерозое (2—1,8 млрд. лет) отмечается проявление существенно кварцевых метасоматитов в Удокано-Становой зоне СССР. Месторождения, часто имеющие промышленное значение, связаны со следующей среднепротерозойской (1,9—1,7 млрд. лет) эпохой образования кварцевой минерализации различных генетических групп. Они представлены магматогенными хрусталеносными пегматитами и силектитами (месторождения СССР и Неллурского пояса Индии) и хрусталеносными кварцевыми жилами (месторождения Алданского щита СССР).

Поздний протерозой — поздний палеозой (1,6—0,5 млрд. лет) представляет собой период мощного кварцеобразования. В это

время возникли крупные месторождения редкометалльных пегматитов с кварцевыми ядрами и зонами (месторождения Хилл-Сити, Кистоун, Кастер, Кварц-Крик, Гардинг, Хайег плато Колорадо и Передового хребта Северной Америки, плато Борборема и штата Минас-Жерайс в Бразилии, месторождения Лугулу, Бусанго, Маноло Западно-Конголезского пояса Африки), силекситами Нигерии и Анголы (месторождение Кассонги) и уникальными метаморфогенными месторождениями слюдоносных пегматитов (Бихарский, Раджастанский пояса Индии), силектитов (месторождения на Урале — СССР, месторождения Раламани, Деганиди, Сомехали Майсорского и Неллурского поясов Индии) безрудных высокотемпературных кварцевых жил Мугоджар, Татарской и Предивенской зон Енисейского кряжа и хрусталеносных кварцевых жил, трубок и минерализованных зон многочисленных месторождений Бразилии и Мадагаскара, пользующихся мировой известностью.

Верхнепалеозойская — раннемезозойская эпоха (400—200 млн. лет) отличается широким распространением месторождений кварцевого сырья. Они представлены хрусталеносными пегматитами и силекситами различных районов Казахстана и Урала, скарно-кварцевыми телами (месторождения Дальнего Востока и Кавказа), грейзенокварцевыми жилами (месторождения Забайкалья, Аргентины, Австралии), полевошпат-кварцевыми жилами (Северо-Западный Тянь-Шань, Центральный Казахстан), вторичнокварцитовыми массивами (Семиз-Бугу, Коуирад в Казахстане, Северо-Уральская группа), березито-кварцевыми жилами (месторождения на Урале, Енисейском кряже, в Восточном Забайкалье — СССР, Материнская жила в Западной Калифорнии, Айдахо-Спрингс, Централ-Сити, Батл-Маунтин в США), аргиллизито-кварцевыми рудными (сурьмяно-ртутные месторождения Забайкалья, Донбасса, КНР, Турции, Югославии) и нерудными (агатowymi, кварц-аметистовыми) жилами (месторождения Ватиха, Шайтанское на Урале), джаспероидами (месторождения Средней Азии) и метаморфогенными месторождениями слюдоносных пегматитов Северной Америки (Аппалачи), Бразилии (штат Минас-Жерайс), СССР (Мамско-Чуйская провинция, Урал), силекситами Прибайкалья, безрудными средне-, высокотемпературными кварцевыми жилами (месторождения гранулированного, стекловидного, рекристаллизованного кварца на Урале и в Казахстане) и, наконец, хрусталеносными кварцевыми жилами (месторождения Урала, Памира в СССР, парагеосинклипальной системы Уашиито в США). В поздне-мезозойско-кайнозойский период сформировались месторождения, представленные следующими типами и генетическими группами: скарно-кварцевыми телами (месторождения КНР, Хабаровского края), грейзено-кварцевыми жилами (КНР), вторичнокварцитовыми телами (Камчатка, Курильские острова, Япония), прожилито-кварцевыми телами (Кавалеровский рудный район Приморья), месторождениями Боливийского оловорудного пояса (Потоси, Льяль-ягуа, Оуро), месторождениями агата в Бразилии (синеклиза Парана), джаспероидами (Хайдарканское месторождение в СССР,

месторождения пегматитов типа в США — Кортец, Карлин, Гетчилл), проявлениями и мелкими месторождениями хрусталеносных пегматитов (Кордилеры) и хрусталеносных кварцевых жил в Альпах, на Кавказе и в Верхоянье.

Наибольшее значение в смысле кварценосности имеют: раннеархейская эпоха в связи с концентрацией больших масс кварцевого материала в редкометальных пегматитах Африки, Канады и Австралии, позднеархейская — раннепротерозойская эпоха из-за крупных скоплений кварца в месторождениях древней золото-кварцевой формации Канады, Австралии и Африки, среднепротерозойская с ее хрусталеносными пегматитами и кварцевыми жилами на Украинском и Алданском щитах, позднепротерозойская — раннепалеозойская, представленная крупнейшими редкометальными пегматитами Африки, Северной и Южной Америки, силекситами Анголы и Нигерии, слюдоносными пегматитами Индии. Бразилии, силекситами Урала, Прибайкалья, Мугоджар, Индии и хрусталеносными кварцевыми жилами Бразилии и Мадагаскара и позднепалеозойская с крупными месторождениями силекситов на Урале и в Казахстане, березито-кварцевых жил на Алтае, в Калифорнии, слюдоносных пегматитов кристаллизованных и гранулированных (Северо-Байкальское нагорье, Урал), жил гранулированного кварца на Среднем и Южном Урале и хрусталеносных кварцевых жил Урала.

ФАКТОРЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ МЕТАМОРФОГЕННОГО КВАРЦЕ- И ХРУСТАЛЕОБРАЗОВАНИЯ

Среди рудоконтролирующих (минерагенических) факторов, имеющих наибольшее значение, выделяются тектонический, магматический, структурно-стратиграфический, литологический и метаморфический. Одни из них (тектонический, метаморфический) оказывают влияние на региональное положение кварце- и хрусталеносных объектов, другие (магматический, литологический) — на локальное размещение кварцевой минерализации. Учитывая практическую значимость отдельных типов кварцевого сырья, рассмотрим минерагенические факторы только для гранулированного, рекристаллизованного и хрусталеносного кварца.

Бласто- и катаклизгранулированный кварц в геотектоническом плане встречается: а) в складчатых поясах (Урал, Памир, Казахстан — СССР), где проявились интенсивные и, главное, одновременные динамические и термические напряжения, характерные обычно для средних этапов эволюции подвижных областей, б) на щитах и платформах (Кольский полуостров — СССР, Пампийские горы — Аргентина, о. Мадагаскар) в пределах поясов геотектонометаморфической активизации, в) в складчатых обрамлениях средних массивов (массив Сангилен—Тува) и краевых частей платформ (Прибайкалье, Северо-Байкальское нагорье). В общем месторождения гранулированного кварца приурочены к зонам сочле-

нения областей ранней стабилизации с подвижными мобильными областями. Причем к таким зонам, которые на протяжении длительного отрезка геологической истории испытывали стабильные унаследованные динамические нагрузки [26].

Стратиграфический фактор нельзя анализировать в отрыве от структурного фактора и целесообразно рассматривать объединенный структурно-стратиграфический фактор. Это диктуется тем, что бластогранулированный кварц связан с положительными геологическими структурами (поднятиями, микроконтинентами, щитами, срединными массивами, гранито-гнейсовыми и гнейсо-мигматитовыми комплексами), испытывшими длительные восходящие движения. Поэтому в большинстве случаев в их пределах обнажаются наиболее древние горные породы. Месторождения и проявления бластогранулированного кварца зафиксированы в архейских, протерозойских и нижнепалеозойских комплексах. Локальными структурами, вмещающими месторождения являются «зоны смятия» глубинных разломов, сочленяющиеся с антиклинорными структурами или пересекающие их, и зоны сланцевых обрамлений гранито-гнейсовых куполов и гнейсо-мигматитовых комплексов, испытывавшие интенсивные тектонические напряжения в результате диапиродного «всплывания» гнейсовых ядер указанных структур.

Магматический фактор играет пассивную роль в образовании месторождений бластогранулированного кварца. Значение магматических комплексов состоит в их участии в строении «зон смятия» глубинных разломов (интрузивные породы прельского и чайского комплексов Прибайкалья, зейско-депского комплекса Южно-Туркунгурского глубинного разлома, таракского комплекса Енисейского кряжа и т. д.), подвижных зон в обрамлении гнейсо-мигматитовых комплексов (ортоамфиболиты и эклогиты уфалейского комплекса, гранитоиды сысертского комплекса на Урале) и срединных массивов (гипербазиты Южно-Тувинского пояса). Иногда интрузивные породы вмещают жилы бласто- и катаклазгранулированного кварца (ортоамфиболиты уфалейского комплекса на Урале, гипербазиты Тарлашкинского массива в Туве), в случаях, когда они затронуты позднейшими тектоническими подвижками. Это еще раз подтверждает пассивное участие магматических пород в образовании и размещении гранулированного кварца.

Влияние литологического фактора на формирование бласто-, катаклазгранулированного кварца должно рассматриваться в двух аспектах: в геохимическом и физико-механическом. Исследованиями на Урале и в других регионах Советского Союза установлено, что жилы бластогранулированного кварца концентрируются преимущественно среди гранато-(графито)-слюдяно-кварцевых кристаллических сланцев, слюдяных и графитовых кварцитов, бнотит-амфиболовых гранито-гнейсов, в мигматитах, диафторитах и некоторых других породах, в геохимическом плане содержащих часто повышенное количество свободного кремнезема. Как будет показано ниже, влияние литологии здесь хотя и отчетливое, но косвенное, детерминированное метаморфическими процессами. В то же

время весьма характерно для «зон смятия» и сланцевых обрамлений комплексов частое переслаивание и чередование метаморфических и магматических пород различного литолого-петрографического состава и физико-механических свойств предопределяли благоприятную обстановку для локализации жил бласто-, катаклазгранулированного кварца.

Метаморфический фактор является определяющим при формировании бласто-, катаклазгранулированного кварца в полиэтапных глубокометаморфизованных комплексах при температуре, превышающей приблизительно 550 °С. Это возможно в эпидот-амфиболитовой, амфиболитовой и гранулитовой фациях, а учитывая формирование бластогранулированного кварца в тектонических зонах повышенных давлений, — в фациях дистеновых сланцев, дистеновых гнейсов и эклогитовой, представляющих аналоги предыдущих фаций в условиях дистен-силлиманитовой метаморфической серии.

Проведенные исследования позволяют сделать заключение о ведущей роли регионального метаморфизма в образовании и размещении жил бласто-, катаклазгранулированного кварца, являющегося причиной мобилизации кремнезема и отложения его в виде многочисленных безрудных кварцевых жил. Об этом свидетельствует тесная связь различных структурных типов гранулированного кварца с определенными этапами регионального метаморфизма. Для формирования жил бласто-, катаклазгранулированного кварца необходимы минимум два этапа регионального метаморфизма. Раннеметаморфические процессы, протекавшие в условиях зеленосланцевой — амфиболитовой фаций, способствовали возникновению жил, сложенных стекловидным и молочно-белым кварцем. Региональный метаморфизм поздних этапов обусловил структурную перестройку (грануляцию) и очищение от примесей первичного кварца и образование вторичного зернистого (гранулированного) агрегата, вещественный состав, физические свойства и структурные особенности которого зависят от термодинамических условий метаморфизма. Итак, региональное размещение жил гранулированного кварца контролируется метаморфическим фактором, который является определяющим для месторождений подобного типа. Локальное распределение кварцевожильных зон на месторождениях находится в зависимости от конкретной структурно-тектонической обстановки.

Геотектоническая позиция месторождения рекристаллизованно-гранулированного кварца аналогична позиции объектов бласто-, катаклазгранулированного кварца. Магматический фактор занимает ту же пассивную позицию, что и в случае с жилами бластогранулированного кварца. Роль структурно-стратиграфического и литологического факторов менее определена, поскольку жилы рекристаллизованно-гранулированного кварца, будучи более поздними и низкотемпературными образованиями, естественно в меньшей степени зависят и от возраста, состава пород и косвенно от степени их метаморфического преобразования. Следовательно, главными факторами, определяющими появление жил

рекристаллизованно-гранулированного кварца, являются метаморфический, создающий условия зеленосланцевой и лавсонит-глаукофановой фаций, благоприятные для формирования жил молочного-белого кристаллизованного кварца, и тектонический, отвечающий за появление поздних «холодных» зон смятия и динамометаморфизма, приводящего к рекристаллизации раннего метаморфогенного, а в принципе, первичного кварца любого происхождения. Если при образовании бласто-катаклизгранулированного кварца тектонические преобразования обязательно должны быть синметаморфическими в «горячих» структурно-метаморфических зонах этапа диафореза, то при формировании рекристаллизованно-гранулированного кварца — они могут осуществляться и в относительно «холодных» «зонах смятия».

Хрусталеносный кварц. Минералогия месторождения пьезокварца и горного хрусталя разработана предыдущими исследователями, причем наибольший вклад внесли А. Е. Карякин, В. А. Смирнова, Я. Н. Соколов, Ю. Н. Ануфриев, А. В. Осинский, Ю. М. Соколов и др. В геотектоническом плане формации горного хрусталя приурочены к зонам тектоно-магматометаморфической активизации с мобильными областями в пределах складчатых поясов. Особенность тектонического контроля хрусталеносных жил, в отличие от жил гранулированного кварца, заключается в том, что они локализируются в подвижных зонах, где на первых этапах преобладали динамические напряжения, а на заключительных — в основном термические воздействия в спокойной тектонической обстановке, способствовавшей не только кристаллизации горного хрусталя, но и его последующей сохранности. Так же как и для гранулированного, для хрусталеносного кварца не лимитируются динамические нагрузки на ранних этапах кристаллизации первичного кварца, когда они могут варьировать в широком диапазоне, но строго детерминируется их практическое отсутствие на заключительных этапах роста кристаллов в хрусталеносных полостях и при их дальнейшей консервации в относительно жестких блоках. При этом допустимы лишь незначительные тектонические подвижки.

Исходя из метаморфогенной природы абсолютного большинства промышленных хрусталеносных объектов, становится очевидной второстепенная роль магматического фактора, так же как и для охарактеризованных выше типов кварцевых образований. Влияние структурно-стратиграфического фактора на хрусталеобразование рассмотрено В. А. Смирновой, А. Е. Карякиным, роль литологического фактора в размещении хрусталеносных жил показана в работах А. А. Евстропова, Ю. Н. Ануфриева и других исследователей.

Следует обратить внимание на опосредованную роль литологии в данном вопросе (например, преимущественную позицию хрусталеносных жил среди пород с высоким содержанием SiO_2 — кварцитах, песчаниках, гранитоидах, кварц-плагиоклазовых породах и определенным отношением $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$). Главным же, как и

для вторичных зернистых разновидностей жильного кварца, является и в этом случае проявление определенного типа метаморфических (метасоматических) процессов. Ведущими для хрусталеобразования служат диафторез зеленосланцевой фации по породам, ранее метаморфизованным в более высокотемпературных условиях, и интенсивное проявление метасоматоза, определяющего коэффициент натриевости в период роста кристаллов горного хрусталя. По составу метасоматические изменения должны отвечать кварц-серицитовым, кварц-альбит-карбонатным и гидрослюдисто-каолинитовым (монтмориллонитовым) парагенезисам, которые с определенной долей условности и учетом конвергентности признаков метасоматитов магматогенного и метаморфогенного генезиса могут быть сопоставлены с серицитолитами и аргиллизитами.

ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ ОСНОВНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ

В практике геологоразведочных работ с целью повышения их геологической и экономической эффективности предлагается использование следующих главных поисковых критериев для выявления выходящих на поверхность и скрытых метаморфогенных месторождений кварцевого сырья наиболее важных типов — хрусталеносного, гранулированного и рекристаллизованного кварца.

Критерии для поиска хрусталеносного кварца.

Не останавливаясь детально на рассмотрении известных и применяемых на практике критериев поиска месторождений горного хрусталя и учитывая изложенный в предыдущих главах материал по обоснованию их метаморфогенного происхождения, подчеркнем здесь лишь два момента, которые могут оказаться полезными при описковании конкретных площадей на пьезокварц.

1. Наличие зон наложенной тектоно-метаморфической и в меньшей мере тектоно-магматической активизации древних кристаллических щитов, платформ и областей ранней консолидации (срединных массивов, гранито-гнейсовых и гнейсо-мигматитовых комплексов) в антиклинорных структурах складчатых поясов на заключительных этапах их развития со сменой ранних динамических (разрывных и складчатых) преобразований поздними преимущественно термальными с их стабилизацией и сохранением вплоть до повейшего времени.

2. Интенсивное проявление в пределах подвижных зон диафтореза, в общем отвечающего регрессивному этапу зеленосланцевой фации орогенного типа метаморфизма (по А. А. Маракушеву) по породам, ранее метаморфизованным в различных термодинамических условиях с широко проявленной предрудной «подготовкой» вмещающих пород. Последняя выражается, в зависимости от исходного состава пород и химизма восходящих метаморфогенных растворов, в альбитизации, хлоритизации, серицитизации, калишпатизации, приводящих к возникновению первичных кварцевых жил. Последующее интенсивное развитие сорудных метасоматитов.

серицит-альбитового, альбит-хлорит-карбонатного состава типа серицитолитов и аргиллизитов сопровождается ростом кристаллов горного хрусталя в гнездах среди кварцевых жил или в минерализованных полостях.

Критерии для поиска бласто-, катаклазгранулированного кварца.

1. Наличие зон тектоно-метаморфической активизации платформ («зон смятия» глубинных разломов) и консолидированных участков (микроконтинентов, гнейсо-мигматитовых комплексов) складчатых поясов (сланцевые обрамления и зоны сочленения обрамлений и гнейсовых ядер), проявившихся на средних этапах эволюции геосинклипалей и выразившихся в интенсивном развитии синметаморфических динамических напряжений вплоть до завершения геологической истории зон активизации.

2. Полихронное развитие зон тектоно-метаморфической активизации («зон смятия» глубинных разломов уфалейского типа), выражающееся в неоднократном (минимум двукратном) проявлении регионального метаморфизма высоких ступеней. Ранние метаморфические процессы, протекавшие на уровне амфиболитовой и гранулитовой фаций, приводили к возникновению жил первичного, преимущественно прозрачного высокотемпературного метаморфогенного кварца. Регрессивный метаморфизм поздних этапов, отвечавший *PT*-условиям эпидот-амфиболитовой фации повышенных давлений раннеорогенного типа метаморфизма, сопровождавшийся кислотным выщелачиванием и образованием околожильных слюдитов, преобразовывал ранний крупно-, гигантозернистый кварц в зернистый (бластогранулированный) агрегат со структурой *B*-тектонита.

Критерии для поиска рекристаллизованно-гранулированного кварца.

1. Наличие зон тектоно-метаморфической активизации мугджарского типа платформ и антиклинорных структур геосинклипалей, проявившихся на конечных этапах их развития с преобладанием динамических, в основном дизъюнктивных, преобразование пород самого различного состава и возраста.

2. Слабое проявление и прогрессивного и регрессивного метаморфизма в пределах зон обычно не превышающего уровня зеленосланцевой фации и приводившего к неравномерной рекристаллизации ранних кварцевых жил вдоль узких линейных направлений.

Кроме перечисленных определяющих поисковых критериев, при геологоразведочных работах на различные виды кварцевого сырья должны учитываться также магматический, структурно-стратиграфический и литологический факторы, но при этом всегда нужно иметь в виду, что они не являются первопричиной образования метаморфогенных кварцевых месторождений, а влияют только на их локализацию в пределах зон активизации и на масштабы кварце- и хрусталеобразования.

Первостепенной задачей минерагенического анализа является выделение внутри региональной перспективной провинции локаль-

ных структурно-формационных и отвечающих им структурно-минералогических зон, представляющих собой образования определенного этапа эволюции подвижного пояса и соответствующие времени становления в их пределах конкретных формаций полезных ископаемых (в данном случае кварцевого сырья).

Использование установленных закономерностей локализации жил гранулированного кварца при региональных поисковых работах на жильный кварц позволит более целенаправленно проводить поисковые и разведочные работы в Прибайкалье, Забайкалье, Енисейском крае, на Алтае. Геологическими предпосылками для обнаружения данного вида минерального сырья обладают Амуро-Охотская, Южно-Тувинская, Западно-Монгольская части Монголо-Охотского складчатого пояса и другие регионы полиметаморфизма.

Систематическое комплексное исследование природных кварцевых образований, сырьевой базы кварцевой промышленности СССР, выявление новых видов полезных ископаемых (бластогранулированного, рекристаллизованно-гранулированного кварца, силектитов, стекловидного кварца силекситов), вовлечение в сферу промышленного освоения кварцевых тел, считавшихся ранее «безрудными», а в настоящее время обеспечивающих создание надежной минерально-сырьевой базы страны по производству прозрачного кварцевого и многокомпонентного оптического стекла, обеспечивалось объединением нескольких научных направлений: детальным всесторонним изучением свойств и лабораторно-технологическим испытанием выделенных формаций кварца, определением пространственной и временной геологической позиции кварцевых формаций различного происхождения, изучением закономерностей проявления метаморфизма (как природного технологического процесса) и, наконец, разработкой минералогических месторождений кварцевого сырья, связывающей закономерности образования формаций эндогенного кварца с тектоно-метаморфической эволюцией длительно и сложно развивающихся геологических комплексов. Это позволило в определенной степени решить проблему обеспечения промышленности высококремнеземистым сырьем и предложить поисковые и оценочные критерии для месторождений кварца различных геолого-промышленных типов (главным образом, бластогранулированного и рекристаллизованно-гранулированного), дающие возможность вести специализированные поисковые работы в других регионах страны.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЦИОНАЛЬНОМУ НАПРАВЛЕНИЮ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА КВАРЦЕВОЕ СЫРЬЕ

Изложенные материалы по дальнейшему развитию прогнозно-ревизионных и поисково-разведочных работ на кварцевое сырье могут использоваться при корректировке региональных направлений работ в определенные периоды и при уточнении направления изучения перспективных районов и новых видов кварцевого сырья.

В большей степени это касается формаций blastogranулированного, рекристаллизованно-гранулированного, первично прозрачного кварца, силекситов, силектитов и в меньшей — хрусталеносного, рудного, редкометалльно- и слюдоносно-пегматитового кварца.

Практические рекомендации по рациональному направлению дальнейших геологоразведочных работ на кварцевое сырье подразделяются на общие и региональные. Общие рекомендации состоят, в свою очередь, из предложений по проведению ревизионных, прогнозных и поисковых работ на кварцевое сырье определенного назначения.

Рекомендации по ревизионным работам, с учетом материалов по качеству и масштабам кварцевой минерализации различных геолого-промышленных типов, сводятся к следующему.

1. Проведение систематической, целенаправленной ревизии известных объектов редкометалльных и слюдоносных пегматитов с выявлением качества и количества содержащегося в них стекловидного блокового кварца, а также установление по технологическим испытаниям на заводах-потребителях возможных областей его применения, рациональных методов обогащения прозрачного и многокомпонентного кварцевого стекла, синтеза монокристаллов.

2. Организация попутной и специальной добычи стекловидного пегматитового кварца с коэффициентом светопропускания более 40 % на действующих горно-обогатительных предприятиях и на новых объектах по результатам положительных технологических испытаний на стадии ревизионных работ.

3. Проведение ревизионных работ на проявлениях силекситов Забайкалья и других районов Сибири с целью их вовлечения в сферу промышленного освоения на основе положительного опыта изучения и эксплуатации Уральских силекситовых месторождений и организация при необходимости их освоения в качестве возможных источников стекловидного ядерного кварца силекситового происхождения.

4. Специализированная ревизия крупных и уникальных по запасам рудно-кварцевых месторождений, в частности, жил золото-кварц-березитовой формации с целью определения качества и рациональных направлений использования громадных масс кварцевого сырья, сосредоточенных в этих объектах. При положительных результатах ревизионных работ на рудно-кварцевых жилах — разработка и внесение в соответствующие органы предложений по организации добычи и строительства современных горно-обогатительных предприятий с комплексной переработкой кварцевого сырья для нужд электротехнической, керамической, химической, металлургической промышленности и удовлетворением потребностей крупных территориально-промышленных комплексов.

5. Ревизия известных проявлений перекристаллизованных кварцитов джетыгаринского, макбальского, златоустовского типов с целью выяснения возможности использования сосредоточенных в них значительных запасов кварцевого сырья в различных отраслях народного хозяйства. Главным направлением исследований следу-

ет считать детальное изучение вещественного состава и качества этих специфических образований на основе лабораторных и технологических испытаний.

Если для перечисленных выше магматогенных типов кварцевых образований, являвшихся традиционными источниками высококремнеземистых материалов, представляется достаточным, с учетом действующих программ развития геологоразведочных работ на кварцевое сырье, выполнение указанного комплекса ревизионных исследований для установления их перспектив, то для кварцевых образований более перспективной и во многих случаях новой, впервые выделенной метаморфогенной группы рациональное направление дальнейших геологоразведочных работ должно включать исследование прогнозного этапа и широкие целенаправленные поиски, базирующиеся на научной основе. Специализированные поиски кварцевых объектов метаморфогенного типа составляют основу рекомендаций регионального характера и их использование применительно к конкретному региону обуславливается приведенными ранее закономерностями локализации объектов и особенностями геологии территории.

Предложения по выполнению прогнозных исследований, относящихся к разряду общих рекомендаций, состоят из:

1) минерагенического анализа с выделением структурно-формационных зон, благоприятных для локализации blastогранулированных силектитов;

2) минерагенического анализа и выделения зон, благоприятных для локализации blasto-, катаклазгранулированных неметаллоносных кварцевых жил метаморфогенного генезиса;

3) минерагенического анализа и выделения зон, благоприятных для локализации метаморфогенных хрусталеносных кварцевых жил;

4) минерагенического анализа с выделением структурно-формационных зон, благоприятных для размещения кварцевых жил, содержащих прозрачные участки.

Практическим следствием установленных закономерностей размещения известных месторождений blasto-катаклазгранулированных силектитов и метаморфогенных кварцевых жил является необходимость выявления при прогнозных минерагенических исследованиях региональных и локальных «зон смятия». «Зоны смятия» обнаружены при геологических исследованиях (Б. Я. Хорева, В. Ю. Забродин, В. И. Ленных, А. И. Русин и др.) на Алтае, Урале, Дальнем Востоке, Енисейском кряже, даны их описание и систематика с разделением на зоны джагдинского и иртышского типов.

Из известных «зон смятия», обладающих признаками, указывающими на возможность обнаружения в их пределах гранулированного кварца, можно назвать Тукурингскую, Джагдинскую и Чампулинскую зоны в Амуро-Охотской части Монголо-Охотского складчатого пояса, связанные с Тукурингским, Южно-Тукурингским и Чампулинским глубинными разломами, а также Та-

тарскую и Предивинскую зоны Енисейского кряжа, сопряженные с Главным Приенисейским и Татарским глубинными разломами.

В обеих зонах присутствуют как динамометаморфический, так и ультраметаморфический структурные парагенезисы. В южной части Енисейского кряжа Татарская и Предивинская зоны смятия рассекают преимущественно высокометаморфизованные образования глубокого докембрия и раннего протерозоя, поэтому в пределах названных зон могут быть обнаружены и частично уже выявлены гранулированные силектиты и высокотемпературные кварцевые жилы. Заслуживают внимания Бирюсинская и Алагинская зоны Восточного Саяна, приуроченные к Бирюсинскому и Главному Саянскому глубинным разломам, Маркакульская зона Монгольского Алтая, Ильдугемо-Кубадринская и Тигерецко-Чуйская зоны Горного Алтая, Агардагская зона одноименного глубинного разлома и другие зоны на северной окраине Сангилене, Шилкинская и Приаргунская зоны в Забайкалье. Во всех названных зонах динамометаморфизм отвечает эпидот-амфиболитовой, амфиболитовой, а иногда гранулитовой и эклогитовой фашиям, в условиях которых может возникать гранулированный кварц.

В других известных зонах смятия метаморфизм не поднимается выше уровня зеленосланцевой фашии (Успенская, Джалаир-Наймманская и Спасская зоны Казахстана, Иртышская и Северо-Восточная зоны Алтая, Южно-Ануйская зона Чукотки и др.), в связи с чем в их пределах может быть обнаружен лишь рекристаллизованно-гранулированный кварц. Здесь следует оговориться, что перечисленные зоны, сопровождающиеся и высокотемпературным и низкотемпературным метаморфизмом, конечно, представляют только определенную часть действительно существующих в природе региональных и локальных зон смятия, сопряженных с одиночными или парными глубинными разломами. Их обнаружение является задачей дальнейших прогнозных и поисковых работ.

Прогнозно-поисковые работы на горный хрусталь и пьезокварц могут быть уточнены в направлении выявления факторов, свидетельствующих о наличии на перспективных площадях зон тектонометаморфической и метасоматической активизации. Поскольку хрусталеобразование является наложенным процессом на самые различные геологические образования, связанным не только с поздними зонами активизации, но с такими зонами, где интенсивно проявлен диафторез, теоретической и методологической основой изучения перспективных площадей должно служить выявление зон диафтореза с широким развитием низкотемпературного метасоматоза определенного типа: кварц-альбит-серпичитовых, кварц-карбонат-альбитовых и гидрослюдисто-каолинитовых изменений, сопутствующих хрусталеобразованию. Отметим здесь, что высказанные рекомендации, в дополнение к установленным ранее (А. Е. Карякин, Ю. А. Ануфриев и др.), акцентируют внимание на углубленном изучении признаков сопутствующего хрусталеобразованию метасоматоза, хотя и учитывавшегося при ранее проводимых исследованиях, но, по нашему мнению, в недостаточной степени.

В первую очередь прогнозно-поисковые работы следует сосредоточить в наиболее перспективных хрусталеносных провинциях СССР — Уральской и Якутской. Методологической основой прогнозно-поисковых работ, направленных на обнаружение кварцевых жил формации П.Б.З, содержащих в своей массе значительное количество участков первично кристаллизованного прозрачного и полупрозрачного кварца, должно являться обнаружение тектонически ослабленных зон, сопровождающихся метаморфизмом глаукофановой, зеленосланцевой и в меньшей мере эпидот-амфиболитовой фаций. Такие условия создаются обычно на сопряжении региональных структур противоположного знака — прогибов и поднятий. Особенно благоприятно сочленение зон глубинных разломов с глубоко метаморфизованными комплексами.

Региональные рекомендации даются на примере Урала и касаются наиболее важной в практическом отношении метаморфогенной кварцево-жильной минерализации (гранулированный кварц, пьезокварц).

Поиски пьезокварцевых месторождений рекомендуется проводить в пределах комплексов, обладающих эрозийным срезом и геологическим строением, близкими к комплексам с известными месторождениями, наличием зон тектоно-метаморфической активизации с широким проявлением диафтореза и низкотемпературных метасоматитов, а также прямыми признаками хрусталеносности южноуральского типа, являющихся наиболее перспективными, особенностью которых является интенсивное проявление зеленосланцевого диафтореза, благоприятное сочетание развивающихся в определенной последовательности серицитолитовых, низкотемпературных карбонат-альбитовых и аргиллизитовых изменений с минеральными парагенезисами, зависящими от состава вмещающих пород. Выделение тектоно-метаморфических и метасоматических зон в пределах конкретных комплексов и их анализ с разделением по перспективности на пьезокварц возможны лишь с использованием дополнительных объемов горно-буровых работ и являются задачей предстоящих исследований.

Методика поисков месторождений гранулированных силектитов и высокотемпературных кварцевых жил представляется состоящей из следующих основных направлений.

1. Проведение минерагенического анализа на предложенной формационной основе ряда перспективных глубокометаморфизованных комплексов с задачей выделения региональных и локальных зон смятия пород, метаморфизованных в условиях эпидот-амфиболитовой, амфиболитовой и эклогитовой фаций, сопряженных с глубинными разломами и благоприятных для образования гранулированного кварца.

2. Проведение специализированных поисковых работ на гранулированный кварц на площадях «зон смятия», соприкасающихся или пересекающих глубокометаморфизованные «горячие» гнейсо-мигматитовые, гнейсо-амфиболитовые, гранито-гнейсовые и гнейсо-сланцевые комплексы.

Поисковые работы в первую очередь должны быть направлены на выявление и изучение зон смятия с целью их разбраковки по перспективности на гранулированный кварц. Методика этих работ должна включать структурно-тектонические (изучение динамометаморфических и ультраметаморфических структурных парагенезисов, малых структурных форм, интенсивности трещиноватости, катаклаза, бластомилонитизации, грануляции с количественной оценкой параметров), литологические, геофизические и метаморфические (парагенетический анализ, изучение индекса-минералов, степени метаморфизма, интенсивности диафореза и, в частности, кислотного выщелачивания) исследования. На базе этих исследований, сопровождающих все полевые (маршрутные, горные и буровые) работы, выделяются перспективные зоны или отдельные участки зон для постановки дальнейших поисковых и разведочных работ.

3. Оценка комплексом горно-буровых и лабораторно-аналитических работ масштабов кварцеобразования конкретных зон, качества обнаруженного в их пределах гранулированного кварца и его соответствия существующим ОСТАм и техническим условиям. Кроме вышеперечисленных методов исследований, здесь должны использоваться декрептофонические, структурно-минералогические и пьезоэлектрические методы для выявления гранулированных силектитов и высокотемпературных кварцевых жил, а также комплекс бестехнологических методов опробования (определение светопропускания, суммы элементных и минеральных примесей, декрепитации, масс-спектрометрии и отношений V_{H_2O}/V_{CO_2} и Na/K кварца) для установления качества гранулированного кварца.

4. Разведка глубоких горизонтов наиболее перспективных из известных месторождений гранулированного кварца скважинами колошкового бурения и изучение кварцевого материала керна скважин указанными методами и технологическими испытаниями с целью подсчета запасов по промышленным категориям и реализации прогнозов по увеличению разведанных запасов на этих месторождениях примерно в 1,5—2 раза. Бурение должно быть сосредоточено в выделенных ранее тектонически ослабленных локальных кварцево-жильных зонах в пределах региональной зоны смятия, сопряженной с Главным Уральским глубинным разломом, положение которых подлежит уточнению в процессе поисково-оценочных и разведочных работ с изучением динамометаморфических структурных парагенезисов и применением пьезометода и декрептокаротажа. Кроме того, в разведку будут вовлечены новые площади и объекты, выявленные в результате поисковых работ. Здесь следует обратить внимание на то, что одной из важнейших задач, связанной не только и даже не столько с геологоразведочными, сколько с последующими эксплуатационными работами на месторождениях гранулированного кварца, является совершенствование технологических схем глубокого обогащения сырья и плавления кварцевого стекла. Это диктуется необходимостью получения высококачественных кварцевых обогащенных концентратов, повыше-

нием процента выхода кондиционного сырья (до обоснованных лабораторно-технологическими методами 70—80 % вместо достигнутых 10—30 %) и выпуском продукции на уровне лучших мировых образцов (Великобритания, Япония, США, Франция, ЧССР и др.).

При поисках месторождений кристаллизованного прозрачного кварца необходимо проведение: 1) минерагенического анализа метаморфических комплексов, образованных в условиях, близких к глаукофановой фации метаморфизма; 2) поисковых работ с целью обнаружения локальных подвижных зон повышенных давлений; 3) комплекса геологических, горных и буровых работ с целью установления масштабов кварценосности зон и качества прозрачного кварца. Кроме традиционно используемых для этого параметров рекомендуется определять коэффициент натриево-калиевого отношения (Na/K) и количество CO_2 в ГЖВ, являющихся отличительными для формации П.Б.З.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе комплексного изучения эндогенных кварцевых месторождений получены следующие результаты.

1. Разработана уточненная генетическая классификация природных кварцевых образований. Главным отличием классификации является отражение теоретической и практической роли метаморфогенной группы месторождений кварцевого сырья, характеризующегося наивысшей стерильностью кварца и поэтому наиболее пригодного для получения прозрачного кварцевого и оптического стекла. На основе изучения геологии, состава и термобарогеохимии природных кварцевых образований установлены общие и специфические особенности эндогенного кварца постмагматического и ортометаморфического классов.

Условия петрогенеза определяют принадлежность кварца редкометалльных, хрусталоносных пегматитов, силекситов и рудно-кварцевых жил к постмагматическому классу, а слюдоносных пегматитов, силектитов и монокварцевых метаморфитов — к ортометаморфическому классу, различающихся геологической позицией объектов, структурой, вещественным составом и геохимическими особенностями слагающего их кварца и являющихся функцией термодинамического уровня формирования природных кварцевых тел.

Под кварцем постмагматически-гидротермального происхождения понимается кварц, возникающий в результате кристаллизации при эволюции расплава—раствора. Кварц, слагающий тела постмагматического класса, обладает повышенным содержанием рудных компонентов, создающих в стекле окрашивающие включения, наследуя их из исходного расплава—раствора. Метаморфогенно-гидротермальный кварц является продуктом химических реакций между минералами в процессе их метаморфизма под воздействием флюидов. Кварц метаморфогенных жил, наряду с другими специфическими особенностями, отличается пониженным содержанием окрашивающих кварцевое стекло компонентов. Отражением различий генезиса кварца постмагматического и ортометаморфического классов является установленное существование двух самостоятельных ветвей фигуративных точек параметров газовой-жидкой включений на PT -диаграмме.

Генетическая и формационная принадлежность природных кварцевых образований наряду с их геологическими особенностями устанавливается по следующим среднестатистическим геохимическим параметрам кварца: общая сумма элементов-примесей ($\Sigma_{\text{общ. эл.}}$), сумма рудных компонентов, создающих в стекле окрашивающие включения ($\Sigma_{\text{окр. эл.}}$), сумма щелочных элементов ($\Sigma_{\text{щел. эл.}}$), содержание Al, Ge, коэффициенты титанистости ($K_T =$

$= \text{Ti} / \Sigma_{\text{общ. эл.}} \cdot 100 \%$), алюминievости ($K_a = \text{Al} / \Sigma_{\text{общ. эл.}} \cdot 100 \%$), щелочности ($K_{\text{щ}} = \frac{\text{Na} + \text{Li} + \text{K}}{\Sigma_{\text{общ. эл.}}} \cdot 100 \%$) и натриевости ($K_n = \text{Na} / K$).

Кварцевые образования постмагматического и ортометаморфического происхождения образуют две вариационные серии в координатах $\Sigma_{\text{общ. эл.}}$, $\Sigma_{\text{окр. эл.}}$, $\Sigma_{\text{щел. эл.}}$, Ti, Al, фиксирующие различия в исходном составе флюидов и объединяющиеся в виде обособленных полей в одну вариационную серию в координатах $V_{\text{H}_2\text{O}} / V_{\text{CO}_2} - \text{Na}/\text{K}$, отражающую единый режим растворов. Метаморфогенный кварц в целом характеризуется меньшими значениями $\Sigma_{\text{общ. эл.}}$ (до $220 \cdot 10^{-4} \%$), $\Sigma_{\text{окр. эл.}}$ (до $10 \cdot 10^{-4} \%$) и при одном и том же содержании Ti — большей $\Sigma_{\text{щел. эл.}}$ ($K_{\text{щ}} > 0,3$) и меньшим содержанием Al ($K_a < 0,55$). Вариационные серии в указанных координатах отражают, кроме генетических особенностей кварцев, увеличение в них с повышением температуры содержания CO_2 , Na, Al и Ti, а также наивысшую стерильность метаморфогенного кварца в отношении большинства элементов-примесей. Наибольшая чистота кварца ортометаморфического класса по сравнению с постмагматическим в отношении микропримесей, в том числе и изоморфного алюминия, составляющего от 40 до 80 % их количества, кроме результатов спектрохимического и фотометрического анализов подтверждается данными прецизионных рентгеноструктурных (минимальные параметры элементарной ячейки), ИК-спектроскопических (низкие значения коэффициента поглощения полосы с максимумом 3385 см^{-1} ИК-спектров) и нейтронно-активационных (минимальное количество фотопиков) исследований.

Среди формаций ортометаморфического класса содержание Na во флюидах понижается примерно в 1,5 раза от ранних формаций (слодоносные пегматиты и силектиты) к поздним (гранулированные, нехрусталеносные и хрусталеносные кварцевые жилы). Для постмагматически-гидротермальных редкометалльных, хрусталеносных пегматитов, силекситов и грейзено-кварцевых жил наблюдается приблизительное равенство во флюидах содержаний Na и K или незначительное преобладание Na, а для полевошпат-кварцевых, березито-кварцевых, аргиллизито-кварцевых и джаспероидных тел, также относящихся к постмагматическому классу, но формирующихся на заключительных этапах развития складчатых поясов, отмечается резкое преобладание K в растворах.

Обосновано выделение формаций кварцевых образований для всех генетических типов, тесно увязанных с эволюцией подвижных поясов и областей тектоно-метаморфической и магматической активизации и в историко-геологическом аспекте обусловленных ею. Внутри метаморфогенной группы установлены самостоятельные формационные ряды важных в генетическом и практическом отношениях силектитов (неполнозональные или азональные преимущественно кварцевые метапегматиты) и монокварцевых метаморфитов (кварцевые тела метаморфогенного происхождения). Введены понятие и соответственно классификационное подразделение — диафторированные формации кварца этапа тектоно-мета-

морфической активизации (бластогранулированного, катаклазгранулированного, рекристаллизованногранулированного и хрусталеносного кварца). Определены их геологическая позиция и промышленная значимость, во многих случаях превышающая таковую равнин материнских формаций.

Гранулированный кварц представляет собой вторичный зернистый кварцевый агрегат и является полигенным образованием, возникающим в результате метаморфизма или диафореза более крупных индивидов кварца первичных формаций пегматитов, силекситов, силектитов и кварцевых жил постмагматического и ортометаморфического класса с участием ряда петрогенетических процессов (бластез, α — β -инверсия, рекристаллизация, катаклаз, регенерация) в зависимости от фациального уровня наложенного метаморфизма. Установлено, что в различных фациальных условиях возникают различные структурно-генетические типы гранулированного кварца. На формационной основе проведено подразделение генотипов месторождений для всех групп природных кварцевых образований.

2. С учетом материалов по генотипам месторождений каждой конкретно выделенной формации предложен вариант геолого-промышленной систематики месторождений кварцевого сырья, отражающий положение с природными источниками сырья для кварцевой промышленности и представляющий научную базу для разработки принципов целенаправленного поиска и разведки конкретных видов минерального сырья.

Доминирующую промышленную ценность из всех широко распространенных в литосфере эндогенных образований кремнезема представляют формации метаморфогенного пьезо- и тикокварца, испытывающие полиэтапные метаморфические преобразования, выполняющие роль природного технологического процесса обогащения кварца и составляющие естественное звено общей эволюции подвижных поясов.

3. Уточнен или установлен генезис выделенных формаций эндогенного кварца на основе геологических, минералого-петрологических и термобарогеохимических данных и использования современных методов анализов вещества и статистической обработки материалов. В генетическом плане наиболее существенным является доказательство принципиального различия в происхождении различных типов зернистых кварцевых агрегатов. Бластогранулированный кварц образуется с обязательным участием бластеза, α — β -трансформации его первичных индивидов с последующей тектонической переработкой, способствующей его очищению от минеральных и газово-жидких примесей в условиях повышенного давления, и формированием характерных В-тектонитов. В этом случае осуществляется «объемная» грануляция целиком кварцевых тел в пределах «горячих» тектонических «зон смятия», уровень метаморфизма которых выше эпидот-амфиболитовой фации, а давления отвечают дистен-силлиманитовой серии. Рекристаллизованный микро-тонкозернистый кварц возникает при узко-

линейных тектонических напряжениях в условиях обычно зеленосланцевой фации метаморфизма при низких давлениях андалузит-силлиманитовой серии в относительно «холодных» комплексах и зонах, где происходит лишь слабое очищение от примесей при неравномерности развития процесса рекристаллизации, что снижает практическую ценность кварца такого типа из-за нестабильности его свойств. Другими словами, гранулированный и рекристаллизованный кварц имеет не только различное происхождение, но и различное промышленное значение. В то же время и гранулированный, и рекристаллизованный кварц представляет собой вторичный агрегат катакластической или гранобластовой структуры, возникающий на основе первичного кварца в различной термодинамической обстановке с преобладанием деформационной составляющей.

4. Разработана специальная (отраслевая) минералогия месторождений кварцевого сырья. Главное внимание при этом уделено закономерностям образования и распределения слабо изученной метаморфогенной силектитовой и кварцево-жильной минерализации и, в частности, таким новым видам минерального сырья, как гранулированный и рекристаллизованный кварц, приобретающим важный практический интерес. Силектиты — существенно кварцевые пегматиты, впервые выделяемые в качестве самостоятельной формации ортометаморфического класса, — относятся к глубинным выделениям дистен-силлиманитовой метаморфической серии, предшествуют формированию генетически ассоциирующей с ними ранних синкинематических мусковитовых пегматитов, в отличие от силекситов постагматического класса, завершающих процесс кристаллизации генетически родственных им хрусталеносных и редкометальных пегматитов. Силектиты приурочены исключительно к гнейсовым ядрам и зонам мигматитовых комплексов, образовавшихся в средние стадии эволюции геосинклинали в условиях дистен-силлиманитовой метаморфической серии высоких давлений при K—Na геохимическом режиме. В отличие от силекситов, имеющих магматогенное происхождение, тесно пространственно связанных с редкометальными и особенно хрусталеносными пегматитами, формирующихся в заключительные периоды развития геосинклиналей и завершающих процесс кристаллизации генетически родственных пегматитов, силектиты, составляющие единый генетический ряд с метаморфогенными мусковитовыми пегматитами, образуются на средних стадиях развития геосинклиналей и предшествуют кристаллизации ранних синкинематических слюдоносных пегматитов.

5. Изучение закономерностей пространственного распределения кварцевых жил в их связи с уровнем и типом регионального метаморфизма и общей эволюцией Уральской геосинклинали позволило выделить четыре крупных формации жильного кварца, занимающих определённую геологическую позицию и отвечающих отдельным этапам геосинклинального развития: формация П.Б.2 средне-, крупнозернистого гранулированного кварца, формация

II.Б.3 крупнозернистого кварца, иногда с прозрачными участками, формация II.Б.4 гетерозернистого молочно-белого кварца, формация II.Б.5 крупно-гигантозернистого (хрусталеносного) кварца. Уровень метаморфизма, которому неметаллоносные кварцевые жилы обязаны своим происхождением, понижается в ряду от формации II.Б.2 к формации II.Б.5 от амфиболитовой и гранулитовой фаций до зеленосланцевой. Две первые формации метаморфогенных кварцевых жил являются изофациальными с вмещающими их породами, две последние — неизофациальными, причем они могут быть как более, так и менее высокотемпературными по сравнению с вмещающими их породами.

6. Анализ данных по абсолютной геохронологии кварцевой и хрустальной минерализации в эволюции земной коры позволил установить, что первый период формирования монокварцевых образований в виде кварцевых ядер и блоков в редкометалльных пегматитах фиксируется в раннем (более 3,0 млрд. лет) архее. Позднеархейская — раннепротерозойская (2,7—1,8 млрд. лет) эпоха представлена кроме редкометалльных пегматитов жилами древней золото-кварц-березитовой формации. В раннем протерозое (2,0—1,8 млрд. лет) отмечается появление существенно кварцевых метасоматитов. Среднепротерозойская (1,9—1,7 млрд. лет) эпоха кварцеобразования включает магматогенные хрусталеносные пегматиты с метаморфогенными слюдоносными пегматитами, силектитами и хрусталеносными кварцевыми жилами. Поздний протерозой — ранний палеозой (1,6—0,5 млрд. лет) представляет собой период мощного кварцеобразования в виде ядер редкометалльных и слюдоносных пегматитов, силекситовых и силектитовых тел, высокотемпературных безрудных и низкотемпературных хрусталеносных кварцевых жил. Для позднепалеозойской — раннемезозойской эпохи (400—200 млн. лет) характерны хрусталеносные пегматиты, силекситы, скарно-кварцевые, грейзено-кварцевые, полевошпат-кварцевые, вторичнокварцитовые тела с березито-кварцевыми и аргиллизито-кварцевыми рудными и нерудными жилами и джаспероидами и метаморфогенными слюдоносными пегматитами, силектитами, неметаллоносными средне- и высокотемпературными гранулированными и рекристаллизованными кварцевыми жилами и хрусталеносными жилами. В позднемезозойско-кайнозойский (менее 200 млн. лет) период формировались скарно-кварцевые, грейзено-кварцевые, вторичнокварцитовые, пропиито-кварцевые тела, агатовые и джаспероидные образования, а также мелкие месторождения хрусталеносных пегматитов и кварцевых жил.

В связи с кварценосностью наибольшее значение имеют: раннеархейская эпоха с концентрацией больших масс кварцевого материала в редкометалльных пегматитах Африки, Канады и Австралии, позднеархейская — раннепротерозойская эпоха с крупными скоплениями кварца в месторождениях древней золото-кварцевой формации Канады, Австралии и Африки, среднепротерозойская — с хрусталеносными пегматитами и кварцевыми жилами на Украинском и Алданском щитах, позднепротерозойско-раннепалеозой-

ская, представленная крупнейшими редкометальными пегматитами Африки, Северной и Южной Америки, силекситами Анголы и Нигерии, слюдоносными пегматитами Индии, Бразилии, сидектитами Урала, Прибайкалья, Мугоджар, Индии и хрусталеносными кварцевыми жилами Бразилии и Мадагаскара, и позднепалеозойская эпоха с крупными месторождениями силекситов на Урале и в Казахстане, березито-кварцевых жил на Алтае, в Калифорнии, слюдоносных пегматитов (кристаллизованных и гранулированных) Урала и Северо-Байкальского нагорья, жил гранулированного кварца и хрусталеносных кварцевых жил Урала.

На основе анализа генетической классификации и геологических формаций природных кварцевых образований, особенностей генотипов месторождений кварцевого сырья, условий их формирования и закономерностей размещения рассмотрена роль конкретных металлогенических факторов, контролирующих распределение кварце- и хрусталеобразования во времени и пространстве. Сформулированы поисковые критерии для выявления месторождений кварцевого сырья наиболее важных типов — хрусталеносного, blasto-гранулированного, катаклазгранулированного и рекристаллизованно-гранулированного кварца.

8. Рекомендации по рациональному направлению дальнейших геологоразведочных работ на кварцевое сырье, базирующиеся на полученных эмпирических данных, теоретических представлениях и установленных закономерностях образования и размещения кварцевых месторождений различного генезиса и промышленного значения, подразделены на общие и региональные. Общие рекомендации состоят из предложений по проведению ревизионных, прогнозных и поисковых работ на кварцевое сырье определенного назначения. Если для магматогенных типов кварцевых образований, являющихся издавна традиционными источниками высококремнеземистых материалов, представляется достаточным выполнение комплекса ревизионных работ для выяснения их перспектив, то для кварцевых образований более перспективной и во многих случаях новой, впервые выделенной метаморфогенной группы рациональное направление дальнейших геологоразведочных работ должно включать исследования прогнозного этапа и широкие целенаправленные поиски, базирующиеся на научной основе. Специализированные поиски кварцевых объектов метаморфогенного типа в пределах зон смятия глубинных разломов и тектонически-подвижных зон выделенных типов относятся к рекомендациям регионального характера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ануфриев Ю. Н.* Основные закономерности размещения хрустальной минерализации в земной коре.— Изв. вузов, 1979, № 2, с. 109—117.
2. *Балицкий В. С.* Экспериментальное изучение процессов хрусталеобразования. М., Недра, 1978.
3. *Белевцев Я. Н.* Метаморфогенное рудообразование. М., Недра, 1979.
4. *Белковский А. И., Локтина И. Н.* Уфалейская клинопироксенит-эктогит-амфиболит-сланцевая ассоциация.— В кн.: Метаморфические породы в офиолитовых комплексах Урала. Свердловск, 1979, вып. XXVI, с. 63—89.
5. *Болтыров В. Б.* Генетическая систематика метаморфогенных перудных месторождений Урала.— Геология рудных месторождений, 1979, № 2, с. 38—46.
6. *Буряк В. А.* Метаморфизм и рудообразование.— М., Недра, 1982.
7. *Гинзбург А. И.* Современное состояние учения о пегматитах.— В кн.: Проблемы минерального сырья. М., 1975, с. 114—161.
8. *Григорьев Д. П., Жабин А. Г.* Оптогенция минералов. М., Наука, 1975.
9. *Добрецов Н. Л.* Глаукофан-сланцевые и эклогит-глаукофан-сланцевые комплексы СССР. Новосибирск, Наука, 1974.
10. *Долгов Ю. А.* Включения в минералах метаморфических пород как показатель условий метаморфизма.— В кн.: Проблемы петрологии и генетич. минералогии. М., 1970. Т. II, с. 272—280.
11. *Дроздов В. П., Мирочников И. И., Коваленко В. П.* Жильный кварц СССР и перспективы его промышленного использования.— Обзор. Экопом. минералогии, сырья и геологоразв. работ. М., ОНТИ ВИЭМС, 1979.
12. *Ермаков Н. П.* Геохимические системы включений в минералах. М., Недра, 1972.
13. *Жариков В. А., Омеляненко Б. И.* Классификация метасоматитов.— В кн.: Метасоматизм и рудообразование. М., 1978, с. 9—28.
14. *Жильный кварц восточного склона Урала/Г. Н. Вертушков, Э. Ф. Емлин, Г. А. Синкевич и др.* Свердловск, Изд. СГИ, 1969, вып. 58, ч. 1.
15. *Забродин В. Ю.* Зоны смятия. М., Наука, 1977.
16. *Кейльман Г. А., Мельников Е. П., Мельникова Н. Н.* О фацialsных условиях метаморфизма пород Уфалейского гнейсового комплекса.— В кн.: Метаморфизм горных пород Урала. Свердловск, 1970, с. 8—17.
17. *Кейльман Г. А.* Мигматитовые комплексы подвижных поясов. М., Недра, 1974.
18. *Кейльман Г. А., Мельников Е. П.* Особенности породообразующих минералов последовательных генераций в полихронных метаморфических комплексах.— В кн.: XI съезд Междунар. минералогич. ассоциаций: Тез. докл. Новосибирск, 1978, т. 1, с. 61—62.
19. *Коваленко В. П., Мельников Е. П., Якишин В. И.* Вопросы классификации и промышленной оценки месторождений высококремнеземистого сырья.— В кн.: Геология метаморфич. комплексов Урала. Свердловск, 1974, вып. 108, с. 81—97.
20. *Кошиль И. М., Мельников Е. П., Петруха Л. М.* Жильный кварц северной части Ларинского гнейсового купола.— В кн.: Геология, поиски и разведка рудн. и перудн. полезн. ископаемых Урала. Свердловск, 1978, вып. 2, с. 113—120.
21. *Ларинское месторождение жильного кварца/Е. П. Мельников, В. В. Мещинский, Л. М. Петруха и др.* Разведка и охрана недр, 1978, № 3, с. 13—17.
22. *Лекух В. Б., Смертенко В. М.* Генетические и морфологические типы кварцево-жильных образований Мугоджар.— Зап. Всесоюз. минер. об-ва, 1978, 107, № 2, с. 158—164.
23. *Ленных В. И.* Бластомилониты различных уровней метаморфизма в полиметаморфических комплексах Урала.— В кн.: Метаморфизм горных пород Урала. Свердловск, 1979, вып. 146, с. 16—34.
24. *Лукашев А. Н.* Глубины образования пегматитов. М., Недра, 1976.

25. *Маракушев А. А.* Петрогенезис и рудообразование. М., Наука, 1979.
26. *Мельников Е. П., Мельникова Н. И.* Закономерности размещения гранулированного кварца в южной части Уфалейского антиклинория.— В кн.: Жильный кварц Восточн. склона Урала. Свердловск, 1970, с. 41—50.
27. *Мельников Е. П.* Химический состав и физические свойства гранатов из метаморфических пород юго-восточной части Уфалейского антиклинория (Средний Урал).— В кн.: Вопросы геологии и магматизма Урала. Свердловск, 1970, с. 139—148.
28. *Мельникова Н. И., Мельников Е. П.* Формации жильного безрудного кварца метаморфических комплексов Среднего и Южного Урала.— Докл. АН СССР, 1974, т. 214, № 6, с. 1423—1426.
29. *Мельников Е. П., Мельникова Н. И.* Прогнозирование месторождений гранулированного кварца на Южном и Среднем Урале.— В кн.: Прогнозирование, поиски и оценка месторождений пьезооптич. минералы. сырья. М., 1975, с. 64—68.
30. *Мельников Е. П.* Термодинамические условия метаморфизма пород Уфалейского гнейсового комплекса.— В кн.: Проблемы биминеральной геотермометрии. Свердловск, 1976, вып. 130, с. 106—126.
31. *Мельников Е. П.* Роль термодинамических и тектонических процессов в формировании метаморфогенных месторождений гранулированного кварца.— В кн.: Металлогения докембрия. Тез. докл. II Всесоюзн. совещ. Иркутск, 1981, с. 354—355.
32. *Мельников Е. П., Оболкин В. Д., Евстропов А. А.* Месторождение жильного кварца Гора Хрустальная.— Сов. геология, 1981, № 8, с. 36—39.
33. *Менчинский В. В., Аеров Г. Д., Ташкер Э. М.* Промышленно-генетические типы месторождений кварцевого сырья.— В кн.: Материалы по геологии и неметаллическим полезным ископаемым. Алма-Ата, 1973, вып. 1, с. 6—18.
34. *Минерагеня метаморфогенных месторождений горного хрусталя и гранулированного кварца/Ю. М. Соколов, Е. П. Мельников, Е. К. Маханек и др.*— Л., Наука, 1977.
35. *Мирочников И. И.* Минерально-сырьевые ресурсы для производства кварцевого и оптического стекла.— М., Недра, 1981.
36. *Оболкин В. Д., Мельников Е. П., Евстропов А. А.* Вещественный состав силексита месторождения Гора Хрустальная (Средний Урал).— Изв. АН СССР. Серия геол., 1981, № 6, с. 119—128.
37. *Осинский А. В., Соколов Я. Н., Лебедев В. В.* Формационно-генетические типы безрудной кварцево-жильной минерализации и основные принципы ее мелкомасштабного прогнозирования.— В кн.: Принципы прогноза эндогенных неметаллических полезных ископаемых. Нов. сер., т. 292, Л., 1981, с. 18—37.
38. *Особенности химического состава метасоматически измененных пород хрусталеносных зон по данным ядерно-физических исследований/Г. С. Возжеников, Е. П. Мельников, А. Л. Загрюев и др.*— В кн.: Рудоносные метасоматические формации Урала: Тез. докл. совещ. Свердловск, 1981, ч. 3, с. 12—14.
39. *Оценка качества кварцевого сырья при проведении поисковых и разведочных работ/В. В. Менчинский, Е. П. Мельников, А. В. Глазов и др.*— В кн.: Методы изучения и оценки месторожд. жильного кварца: Тез. докл. семинара. Свердловск, 1976, с. 8—9.
40. *Перчук Л. Л.* Термодинамический режим глубинного петрогенезиса. М., Наука, 1973.
41. *Петров Н. А., Мельников Е. П.* Геологическое строение Кыштымского месторождения гранулированного кварца.— Сов. геология, 1967, № 12, с. 56—66.
42. *Соколов Ю. М., Глебовицкий В. А., Турченко С. И.* Генетическая классификация месторождений полезных ископаемых метаморфогенного типа.— Сов. геология, 1975, № 2, с. 52—66.
43. *Тугаринов А. И., Наумов В. Б.* Физико-химические параметры гидротермального минералообразования.— В кн.: I Междунар. геохим. конгресс. Гидротермальные процессы. М., 1973, т. II, с. 7—19.
44. *Филогенез мусковитовых месторождений Урала/Е. П. Мельников, Г. А. Кейльман, Ю. М. Соколов и др.*— В кн.: Мусковитовые пегматиты СССР, Л., 1975, с. 214—218.

45. Эволюция метаморфогенных кварцево-жильных образований Уральского подвижного пояса/Е. П. Мельников, Н. И. Мельникова, Г. И. Страшненко и др.— В кн.: Геология метаморфических комплексов. Свердловск, 1977, с. 99—102.

46. Юсупов С. Ш., Мельников Е. П., Фаттахутдинов С. Г. РТ-условия грануляции жильного кварца Урала.— Докл. Презид. Баш. филиала АН СССР. Уфа, 1979.— 48 с. (Препринт/Ин-т геологии Баш. фил. АН СССР).

47. Blankenburg H. J. Quarzrohstoffe. Monographienreihe Nutzbare Gesteine und Industriemineralien. Leipzig: Veb Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1978.

48. Machairas G. Un nouveau gisement de quartz dive à Cassongue (Angola).— Bull. Soc. Franc. Miner. et Cristallograf., 1973, t. 96, N 6, p. 395—397.

49. Miller W. J. Pegmatite, silexite and aplite of northern New York.— Bull. Geol., 1970, vol. 170, p. 28—54.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	6
История использования кремнезема	14
Главнейшие генетические и промышленные типы природных кварцевых образований	18
Общая схема систематики	18
Постмагматический класс магмогенной группы	25
Ортометаморфический класс метаморфогенной группы	26
Типовые формации и месторождения постмагматического кварца	29
Редкометалльно-пегматитовая формация	29
Хрусталеносно-пегматитовая формация	33
Силектитовая формация	37
Кварц-апоскарнивая формация	44
Кварц-апогрейзенная формация	45
Кварц-полевошпатовая формация	46
Вторичнокварцитовая формация	47
Кварц-пропилитовая формация	48
Кварц-березитовая формация	49
Кварц-аргиллизитовая формация	51
Джаспероидная формация	53
Формации и генотипы месторождений метаморфогенного кварца	56
Слюдоносно-пегматитовая формация	56
Силектитовая формация	64
Формационный ряд монокварцевых и существенно кварцевых метасоматитов	88
Дистен-кварц-метасоматитовая формация	89
Формационный ряд неметаллоносных кварцевых жил	91
Дистен (эклогит)-сланцевая кварцево-жильная формация	93
Глаукофан-зеленосланцевая кварцево-жильная формация	105
Зеленосланцевая кварцево-жильная формация	110
Диалфторез-зеленосланцевая хрусталеносная кварцево-жильная формация	113
Генезис метаморфогенных кварцевых образований	122
К вопросу о мобилизации и аккумуляции кремнезема в земной коре	123
Термодинамические условия формирования природных кварцевых образований	125
Физико-химические параметры кварца магмогенного и метаморфогенного происхождения	130
Геологические и термодинамические условия грануляции пегматитов, силектитов и метаморфогенных кварцевых жил	142
Основные особенности генезиса природных кварцевых образований	151
Минерагния метаморфогенных месторождений кварцевого сырья	157
Основные особенности размещения кварцевых образований различных формационных типов	157
Геолого-промышленная классификация месторождений кварцевого сырья	176
Геохронология кварцеобразования	192
Факторы локализации метаморфогенного кварце- и хрусталеобразования	194
Поисковые критерии основных промышленных месторождений кварцевого сырья	198
Рекомендации по рациональному направлению геологоразведочных работ на кварцевое сырье	200
Заключение	207
Список литературы	213

